

## TÉCNICAS Y ALGORITMOS PARA LA TRANSMISIÓN EFICIENTE DE DATOS EN REDES RADIO COGNITIVAS.

**UNIDAD EJECUTORA PRINCIPAL DEL RESULTADO:** Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

**AUTORES PRINCIPALES:** Dr. Vitalio Alfonso Reguera<sup>1</sup>, Dr. Samuel Montejo Sánchez<sup>1</sup>, Dr. Erik Ortiz Guerra<sup>1</sup>.

**OTROS AUTORES:** Dr. Richard Demo Souza<sup>2</sup>, Dr. Evelio M. García Fernández<sup>3</sup>, M.Sc. Raikel Bordón López<sup>1</sup>, Dr. Samuel Baraldi Mafra<sup>3</sup>, Dr. João Luiz Rebelatto<sup>2</sup>, Dr. Glauber G. Oliveira Brante<sup>2</sup>.

### OTRAS ENTIDADES PARTICIPANTES:

<sup>1</sup> Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV)

<sup>2</sup> Laboratório de Sistemas de Comunicações, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná (UFPR)

### COLABORADORES:

Marcelo Eduardo Pellenz (PUC, Curitiba, Brasil).

Walter Godoy Jr (UTFPR, Curitiba Brasil).

Reinier Alonso Quintana (UCLV, Cuba)<sup>a,b</sup>.

Dayana Hernández Rodríguez (UCLV, Cuba)<sup>a</sup>.

Yaime Fernández Jiménez (UCLV, Cuba).

Julio Cesar Pérez García (UCLV, Cuba).

Andy Rodríguez Morales (UCLV, Cuba)<sup>a</sup>.

Hirley Alves (UTFPR, Curitiba Brasil).

Carlos Manuel Garcia Algora (UCLV, Cuba).

Danay Díaz Ledón (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Dainery Gamboa Rodriguez (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Yoan Molina Puerto (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Luis Alejandro Roig Martínez (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Yoan Molina Puerto (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Dayana Hernández González (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Luis Alejandro Roig Martínez (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Onel Luis Alcaraz López (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Rónier Sierra Dávila (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Hector René Bermúdez Gil (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Beatriz Fortún Tavio (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

Wilder Paz Rodríguez (UCLV, Cuba)<sup>b</sup>.

<sup>a</sup> Participó siendo estudiante de Maestría

<sup>b</sup> Participó siendo estudiante de Pregrado

### **AUTOR PARA LA CORRESPONDENCIA**

Vitalio Alfonso Reguera

Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Carretera a Camajuaní Km 5½

54830 Santa Clara, Villa Clara, Cuba

[vitalio@uclv.edu.cu](mailto:vitalio@uclv.edu.cu)

### **Resumen:**

**Antecedentes:** Este trabajo recoge un conjunto de resultados originales en el campo de las telecomunicaciones, específicamente en el área de la radio cognitiva. No existen antecedentes de premios nacionales ACC relacionados con esta propuesta.

**Problema que se ha resuelto:** El desarrollo vertiginoso de las comunicaciones inalámbricas ha traído aparejado la saturación y consecuente agotamiento del espectro radioeléctrico. Esto constituye un obstáculo para la introducción de nuevas aplicaciones y servicios. Este problema y su solución se abordan en este trabajo a partir de un conjunto de mecanismos basados en el paradigma de la radio cognitiva que permiten un uso eficiente de los recursos radioeléctricos.

**Resultados:** Fueron obtenidos un conjunto de técnicas para elevar la eficiencia espectral en redes inalámbricas. Los resultados incluyen el diseño de algoritmos para minimizar el tiempo de establecimiento de las conexiones en las redes radio cognitivas, así como mecanismos de control que maximizan el uso de los recursos disponibles en las redes inalámbricas. La novedad científica de los resultados alcanzados está avalada por la publicación de 10 artículos en revistas de la corriente principal de la Web de la Ciencia (Grupo I), 4 artículos en bases de datos especializadas de reconocimiento internacional (3 del Grupo II y 1 del Grupo III) y 12 trabajos presentados en eventos nacionales e internacionales. Además, de otros resultados relacionados con la formación de recursos humanos que comprenden la defensa exitosa de 2 tesis doctorales, 4 tesis de maestría y 14 trabajos de diploma. El valor de los aportes realizados también se hace palpable a partir de la obtención de un premio CITMA a nivel provincial así como del reconocimiento emitido por la Dirección de Programas Estratégicos de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba (ETECSA). Estos resultados están vinculados a un proyecto internacional donde intervienen, además de la unidad ejecutora principal, dos universidades brasileñas. Los resultados obtenidos contribuyen significativamente al uso racional del espectro radioeléctrico y al desarrollo de nuevas y futuras aplicaciones soportadas por las redes inalámbricas a escala global. En el contexto nacional, estos resultados sientan las bases para el despliegue exitoso de la infraestructura de telecomunicaciones que se requiere para dar soporte a los programas de informatización de la sociedad.

### **COMUNICACIÓN CORTA DEL RESULTADO**

## 1 Introducción

La creciente demanda y desarrollo de aplicaciones inalámbricas ha conducido a la saturación y consiguiente escasez de parte del espectro radioeléctrico disponible. Esto se ha convertido en un obstáculo para la introducción de nuevas aplicaciones y servicios inalámbricos. La asignación del espectro es realizada mediante licencias otorgadas por agencias reguladoras que destinan diferentes bandas de frecuencia para tecnologías o servicios específicos (difusión de radio y televisión, redes celulares, redes de datos inalámbricas, etc.). Mientras ciertas bandas se encuentran congestionadas y sometidas a un uso intensivo, otras regiones del espectro se hallan infrutilizadas. Por ejemplo, en el ámbito nacional, el por ciento de utilización del espectro asignado a la televisión terrestre es extremadamente bajo; al tiempo que, el despliegue actual de las zonas Wi-Fi se ve limitado por la carencia de recursos espectrales y las interferencias que aparecen en las bandas de frecuencia asignadas a esta tecnología. Esto repercute negativamente en la “calidad de la experiencia” percibida por los usuarios finales. La actual insuficiencia de las reglas convencionales de asignación fija del espectro sugiere el uso de un nuevo paradigma de comunicación que permita emplear el espectro de radio de un modo más exhaustivo, inteligente y flexible. En este contexto, las redes radio cognitivas (RC) constituyen la tecnología de elección para enfrentar el problema de la escasez de espectro radioeléctrico al tiempo que permite dar un uso eficiente al mismo.

En una red RC (también denominada red secundaria) los usuarios secundarios (US) intentan operar sobre las mismas bandas de frecuencia previamente otorgadas a otro sistema de comunicaciones (red primaria). Se establece así una relación de compromiso entre la protección de los usuarios primarios (UP) y el desempeño de la red secundaria, el cual debe ser optimizado sin producir interferencias significativas a los UP; premisa básica de la RC.

Entre los principales problemas que aparecen en el desarrollo de las redes RC se encuentra el establecimiento de un canal de control y la identificación de oportunidades de transmisión que permitan un uso eficiente de los recursos de radio. Para establecer un canal de control, los UP deben coincidir en una misma banda de frecuencia e intercambiar la información de señalización necesaria. Este proceso es denominado *rendezvous* y es particularmente complejo durante la fase de inicialización de las redes *ad hoc* RC. Una vez establecidos los canales de control, se puede hacer un uso eficiente del espectro por medio de la identificación y adecuada explotación de las oportunidades de transmisión. Para esto resulta de gran utilidad un mecanismo capaz de asignar y controlar eficientemente los recursos de transmisión, tales como: la potencia, la tasa de transmisión y la direccionalidad de las antenas; con el fin de garantizar la protección de los UP y elevar los parámetros de desempeño de los US. Estos mecanismos pueden combinarse además con el uso de técnicas de codificación de red, que unido a esquemas de comunicación cooperativa permitan incrementar la eficiencia energética, la eficiencia espectral y la robustez de las redes radio cognitivas.

## 2 Novedad científica

En este trabajo se presentan como principal aporte científico un conjunto de técnicas y algoritmos para elevar el desempeño de las redes RC. Los resultados

incluyen el diseño de algoritmos para minimizar el tiempo de establecimiento de las conexiones en las redes RC, así como mecanismos de control que maximizan el uso de los recursos disponibles en estas redes.

Los principales logros se concentran en la obtención de tres algoritmos de *rendezvous* que presentan un mejor desempeño que los algoritmos precedentes en escenarios de interés práctico. También se incluye, el estudio del impacto de la diversidad de *rendezvous* y el análisis de estas estrategias en escenarios complejos con múltiples usuarios y múltiples saltos [1-3]. Se presentan además, dos modelos analíticos para determinar la región y probabilidad de transmisión concurrente de las redes primaria y secundaria, los cuales superan el alcance de las propuestas precedentes al incluir criterios relacionados con la variación de la potencia de transmisión y la incertidumbre asociada a la localización [4,5]. A partir de estos modelos se diseñaron sendos mecanismos para el control de la tasa de transmisión y para el control de la potencia de transmisión, basado en la ubicación de los dispositivos del sistema, que permiten la expansión de la región de transmisión concurrente, incrementando las oportunidades de reutilización del espectro [6-8]. Finalmente se explotan las ventajas asociadas a la codificación de red y la comunicación cooperativa para conseguir una reducción significativa del consumo de energía en las redes RC [9,10].

## **2.1. Algoritmos de *rendezvous***

Se diseñaron tres nuevos algoritmos de *rendezvous* para redes radio cognitivas, denominados algoritmo simple basado en roles (SRB) [1], algoritmo basado en secuencia corta (SSB) [2] y algoritmo de secuencia de salto de diversidad máxima (FDCH) [3]. Las propuestas se acompañan de un modelo analítico para calcular el valor esperado y el valor máximo del tiempo de *rendezvous* (ETTR y MTTR, respectivamente). El algoritmo SRB emplea una estrategia basada en roles que exhibe un ETTR equivalente al menor valor teóricamente previsible para este parámetro en escenarios ideales. Además garantiza que el *rendezvous* se produzca en los canales menos congestionados, proporcionando así un mecanismo espontáneo de balance de carga. De forma alternativa el algoritmo SSB se sustenta en una estrategia común en la que los usuarios cognitivos utilizan una secuencia de salto periódica para visitar los canales. Esta secuencia es la de menor período entre las conocidas hasta el momento, lo cual le permite obtener el valor de MTTR más bajo para los algoritmos de su clase. Por último, el algoritmo FDCH combina las fortalezas de las estrategias de los algoritmos anteriores mediante el uso de dos radios. Con este algoritmo se obtienen los mejores indicadores de desempeño en la mayoría de los escenarios de interés práctico. A diferencia de la mayoría de las investigaciones precedentes, en este trabajo el análisis se extiende a escenarios complejos con múltiples usuarios y múltiples saltos [3].

## **2.2. Mecanismos de control y asignación de los recursos de transmisión**

Para facilitar el desarrollo de mecanismos eficientes de asignación de los recursos de transmisión se elaboraron varios modelos analíticos [4,5]. Estos modelos están en función de la ubicación de los nodos del sistema, permitiendo determinar el área de la región de transmisión concurrente de una red *ad hoc* RC, que opera en la

región de trabajo de una red primaria basada en infraestructura. Estos modelos incluyen criterios relativos al control de la potencia de transmisión y a la incertidumbre asociada al proceso de localización. Además, se desarrollaron mecanismos que basados en la información de localización, así como el control y la asignación eficiente de los recursos de transmisión, son capaces de elevar el desempeño de la red secundaria en términos de: probabilidad de coexistencia, tasa de transmisión y eficiencia energética [5]. A partir de estos métodos se implementan algoritmos que mediante el control integrado de la potencia y la tasa de transmisión permiten maximizar la tasa de transmisión o minimizar el consumo de energía de la red secundaria [6-7]. En escenarios con múltiples pares cognitivos se presentan un algoritmo que incrementa la capacidad conjunta de la red secundaria mediante la conveniente asignación de la potencia de transmisión y la incorporación de antenas directivas [8].

## **2.2. Mecanismos para incrementar los ahorros energéticos basados en comunicación cooperativa**

Con el objetivo potenciar el ahorro energético se investigó el problema de la asignación de potencia en una red cooperativa radio cognitiva asistida por codificación de red. Se obtuvo una expresión analítica para el cálculo de la probabilidad de corte de las transmisiones secundarias [9]. Tomando en consideración las restricciones en la probabilidad de los usuarios secundarios, se presentan dos mecanismos de asignación de potencia para reducir el consumo de energía de la red secundaria [10]. En el primer mecanismo, la potencia de transmisión se ajusta en función de los valores medios de la ganancia de potencia de los canales del sistema y la asignación de potencia se formula como un problema de optimización convexa donde el objetivo es minimizar la potencia de transmisión total sujeto a restricciones en la probabilidad de corte de los US. En el segundo mecanismo, la potencia de transmisión se ajusta dinámicamente en función de los valores instantáneos de la ganancia de potencia del canal para garantizar la tasa de transmisión requerida en el enlace directo. Se evaluó el desempeño de los mecanismos de asignación de potencia desarrollados considerando estrategias de transmisión cooperativas y no cooperativas para diferentes geometrías de red. Los resultados obtenidos demostraron que los beneficios de la codificación de red en términos de reducción del consumo de energía son significativos en comparación con estrategias de transmisión sin codificación de red.

## **3. Impactos y consideraciones finales**

Las técnicas y algoritmos presentados contribuyen al uso eficiente del espectro radioeléctrico y al desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios. Estos logros son el fruto de un proyecto de investigación conjunto entre la unidad ejecutora principal (UCLV) y dos universidades brasileñas (UTFPR y UFPR) en el marco de la colaboración entre el Ministerio de Educación Superior (MES) de Cuba y la *Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior* (CAPES), Brasil. En el contexto nacional, estos resultados sientan las bases para el despliegue exitoso de la infraestructura de telecomunicaciones que se requiere para dar soporte a los programas de informatización de la sociedad. Se destaca la formación de recursos humanos de alto nivel, capaces de asimilar, implementar y desarrollar tecnologías

de primera línea a nivel mundial, para dar solución a problemas globales del desarrollo humano.

Estos logros están avalados por la publicación de 10 artículos en revistas de la corriente principal de la Web de la Ciencia (Grupo I), de estos 4 en publicaciones del primer cuartil en el área de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 4 artículos en bases de datos especializadas de reconocimiento internacional (3 del Grupo II y 1 del Grupo III) y 12 trabajos presentados en eventos nacionales e internacionales. Además, de otros resultados relacionados con la formación de recursos humanos que comprenden la defensa exitosa de 2 tesis doctorales (seleccionadas respectivamente, en 2013 y 2015, como mejores tesis defendidas en el Tribunal Permanente de Electrónica y Telecomunicaciones), 4 tesis de maestría y 14 trabajos de diploma. El valor de los aportes realizados también se hace palpable a partir de la obtención de un premio CITMA a nivel provincial (Villa Clara) así como del reconocimiento emitido por la Dirección Nacional de Programas Estratégicos de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba (ETECSA).

#### 4. Principales Publicaciones

(Corriente principal de la Web de la Ciencia)

Q1 Pertenciente al primer cuartil en el área de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

1. Guerra, E.O.; Reguera, V.A.; Fernandez, E.M.G.; Brante, G.; Souza, R.D. Simple role-based rendezvous algorithm for cognitive ad hoc radio networks. *Electronics Letters*, v. 50, p. 182-184, 2014.
2. Q1 Reguera, V.A.; Guerra, E.O.; Souza, R.D.; Fernandez, Evelio M. G.; Brante, G. Short Channel Hopping Sequence Approach to Rendezvous for Cognitive Networks. *IEEE Communications Letters*, v. 18, p. 289-292, 2014.
3. Guerra, E.O.; Reguera, V.A.; Souza, R.D.; Fernandez, E.M.G.; Pellenz M.E. Systematic construction of common channel hopping rendezvous strategies in cognitive radio networks. *EURASIP J WIREL COMM.* v.2015, p.1 - 16, 2015.
4. Sanchez, S.M.; Souza, D.R.; Fernandez, E. M. G.; Reguera, V.A.; Godoy, W. Jr. Effect of Location Accuracy and Shadowing on the Probability of Non-Interfering Concurrent Transmissions in Cognitive Ad Hoc Networks. *Radioengineering*, v. 22, p. 1139, 2013.
5. Q1 Montejo S. Samuel, Souza Richard Demo, Evelio M. G., Reguera, V.A., Impact of Rate Control on Concurrent Transmission for Cognitive Radio Ad Hoc Networks. *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 9, pp. 1424-1427, 2012.
6. Sanchez, Samuel Montejo; Reguera, V.A.; Fernandez, Evelio M. G.; Godoy, Walter. Power Control and Concurrent Transmission for Cognitive Ad Hoc Networks. *IEEE Latin America Transactions*, v. 11, p. 857-864, 2013.
7. Q1 Sanchez, Samuel Montejo; Souza, Richard Demo; Fernandez, Evelio M. G.; Reguera, V.A. Rate and Energy Efficient Power Control in a Cognitive Radio Ad Hoc Network. *IEEE Signal Processing Letters*, v. 20, p. 451-454, 2013.
8. Montejo S. Samuel, Souza Richard Demo, Evelio M. G., Reguera, V.A., Impact of Power Allocation and Antenna Directivity in the Capacity of a Multiuser Cognitive Ad Hoc Network. *Radioengineering*, v. 21, no. 4, pp. 1110-1116, 2012.
9. Bordón, Raikel, S. Baraldi Mafra, S. Montejo Sánchez, R. Demo Souza, J. L. Rebelatto and E. M. Garcia Fernandez. Energy efficient outage constrained

power allocation based on statistical channel knowledge for dual hop cognitive relay networks. *International Journal of Communication Systems*, 2015.

10.  R. Bordón, S. Montejo Sánchez, S. Baraldi Mafra, R. Demo Souza, J. L. Rebelatto and E.

M. G. Fernandez, Energy Efficient Power Allocation Schemes for a Two-User Network- Coded Cooperative Cognitive Radio Network. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 7, pp. 1654-1667, April1, 2016.