



La Radio Cognitiva y su Impacto en el Uso Eficiente del Espectro de Radio

Raikel Bordón López, Samuel Montejo Sánchez

RESUMEN / ABSTRACT

La radio cognitiva emerge como una novedosa tecnología de las comunicaciones inalámbricas con el potencial de cambiar la forma ineficiente en que el espectro radioeléctrico es utilizado actualmente. Las técnicas de acceso dinámico al espectro constituyen un elemento clave en la implementación de la tecnología radio cognitiva. En este trabajo se analizan las cuatro funcionalidades principales que forman parte del ciclo cognitivo para garantizar el acceso dinámico al espectro: (1) la identificación de las oportunidades de acceso al espectro; (2) la selección de las bandas de frecuencia a utilizar; (3) la coordinación entre usuarios para el acceso al espectro; y (4) la movilidad espectral. Además, se presenta una síntesis de las plataformas de desarrollo más utilizadas en las investigaciones sobre esta tecnología y de las actividades desarrolladas con el fin establecer regulaciones para el uso oportunista del espectro.

Palabras claves: acceso dinámico al espectro, detección del espectro, radio cognitiva.

Cognitive radio emerges as a new technology for wireless communication with the potential to solve the actual spectrum scarcity issue resulting from the inefficiency in the spectrum usage. Dynamic spectrum access techniques are a key element in the implementation of cognitive radio technology. In this paper we analyze the four main features that are part of the cognitive cycle to ensure dynamic spectrum access: (1) identification of opportunities for spectrum access, (2) selection of frequency bands for transmission; (3) coordination between users to access the spectrum, (4) spectral mobility. In addition, we provide a summary of the most popular testbed used in cognitive radio research and discuss the recent efforts made by various institutions in order to establish regulations for opportunistic spectrum usage.

Key words: dynamic spectrum access, spectrum sensing, cognitive radio.

Cognitive Radio

INTRODUCCION

En la actualidad, la explotación de gran parte del espectro radioeléctrico asignado bajo licencia se realiza de forma ineficiente debido a las políticas de asignación fija de las bandas de frecuencias. La ineficiente utilización del espectro, cuando se examina su explotación como una función de la frecuencia, tiempo y espacio, ha sido demostrada por estudios recientes [1]. Las restricciones impuestas por las políticas regulatorias actuales constituyen las principales limitantes en el uso eficiente del espectro. Como resultado, algunas bandas de frecuencia se utilizan intensivamente y se encuentran congestionadas, mientras que otras regiones del espectro están parcial o totalmente desocupadas la mayor parte del tiempo. Para sustentar las demandas crecientes de las nuevas tecnologías y servicios de comunicaciones inalámbricas, son necesarios esquemas de administración del espectro más eficientes. Por otro lado, el éxito de los servicios en las bandas de acceso libre ha motivado el desarrollo de novedosas tecnologías que posibilitan la utilización del espectro de una forma inteligente, coordinada y oportunista, sin perjudicar a los servicios existentes. La radio cognitiva (RC) es una tecnología con el potencial de cambiar dramáticamente la forma en que el espectro radioeléctrico es utilizado actualmente y al mismo tiempo, incrementar su disponibilidad para nuevos servicios de comunicaciones inalámbricos [2].

La idea original de la radio cognitiva fue presentada por Mitola en [3], donde fue definida como “*el punto en el cual las PDAs inalámbricas y las redes relacionadas son, en términos computacionales, lo suficientemente inteligentes con respecto a los recursos de radio y las correspondientes comunicaciones de terminal a terminal como para detectar las necesidades eventuales de comunicación del usuario como una función del contexto de uso y proporcionarle los recursos de radio y servicios inalámbricos más adecuados a sus necesidades*”. La investigación destaca el potencial de la tecnología radio cognitiva para incrementar la flexibilidad de los servicios de comunicaciones inalámbricas actuales a través de un lenguaje de representación del conocimiento denominado RKRL (*Radio Knowledge Representation Language*).

El concepto de radio cognitiva formulado originalmente por Mitola ha sido revisado y reformulado por varios autores. Según Haykin, “*la radio cognitiva es un sistema de comunicaciones inalámbricas inteligente que es consciente de su entorno y emplea la metodología ‘understanding-by-building’ para aprender de su entorno y adaptar su estado interno a las variaciones estadísticas en los estímulos de radiofrecuencia de entrada haciendo los correspondientes cambios en ciertos parámetros de operación (por ej., la potencia de transmisión, frecuencia portadora y tipo de modulación) en tiempo real, con dos objetivos fundamentales: hacer un uso eficiente del espectro y proporcionar una comunicación altamente confiable*”[4].

La radio cognitiva difiere de la radio convencional en tres aspectos fundamentales: 1) capacidad cognitiva; 2) capacidad de aprendizaje y adaptación; 3) capacidad de auto-reconfiguración [4]. La capacidad cognitiva se refiere a la habilidad de obtener información del entorno y del propio estado interno del sistema a través de múltiples sensores. La capacidad de aprendizaje y adaptación permite utilizar esta información para ajustar, dinámica y autónomamente, los parámetros de operación a través de la capacidad de auto-reconfiguración, con el objetivo de optimizar el desempeño del sistema. Nótese que el uso del término sistema implica que las tres capacidades anteriores pueden estar distribuidas a través de múltiples capas de protocolos y dispositivos en una red. En la figura 1a se muestran los componentes funcionales mínimos que debe poseer la arquitectura de la radio cognitiva ideal: 1) funciones de interfaz del usuario, 2) sensores del entorno, 3) aplicaciones del sistema, 4) interfaz de radio reconfigurable, 5) funciones cognitivas y 6) funciones de salida para la interacción con el usuario. Entre cada uno de los componentes funcionales se establecen varias interfaces a través de las cuales se produce el intercambio de datos y señales de control que definen el funcionamiento del sistema.

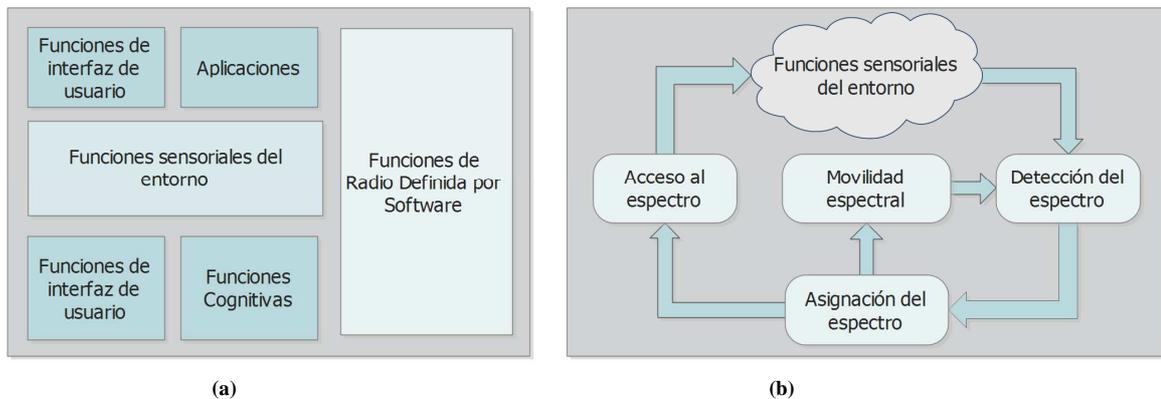


Figura 1. Radio Cognitiva. (a) Arquitectura. (b) Ciclo cognitivo para el acceso dinámico al espectro.

Tomando como punto de partida esta arquitectura, la operación de un sistema radio cognitivo puede describirse a través de un modelo denominado ciclo cognitivo [3]. El ciclo cognitivo representa una máquina de estado de las diferentes etapas del proceso cognitivo. La idea del ciclo cognitivo inicialmente propuesta en [3] fue modificada por diversos autores para adaptarla al concepto de radio cognitiva como tecnología de acceso dinámico al espectro. Como se muestra en la figura 1b, el ciclo cognitivo para el acceso dinámico al espectro incluye el análisis y detección del espectro, la selección de las bandas de frecuencias que más se adecuen a los requerimientos de los usuarios, la coordinación el acceso al espectro con otros usuarios y la movilidad espectral de las frecuencias utilizadas cuando son requeridas por los usuarios autorizados [1].

En este artículo se presenta una revisión de la tecnología radio cognitiva y las técnicas de acceso dinámico al espectro. Adicionalmente son tratadas las plataformas de desarrollo para dicha tecnología así como las regulaciones y normas relacionados con su aplicación. Debido a la utilización del idioma inglés como lenguaje universal de la ciencia, para evitar confusiones producto de las traducciones algunos términos son referidos directamente en este idioma y otros, aunque han sido traducidos aparecerán la primera vez citados en el texto acompañados de sus homólogos en inglés.

ACCESO DINÁMICO AL ESPECTRO

En la actualidad, el término radio cognitiva por lo general se asocia a un sistema de radio que accede de forma dinámica al espectro basado en la observación del entorno radioeléctrico. De acuerdo a las bandas de frecuencias utilizadas, pueden distinguirse dos modelos de acceso dinámico al espectro: modelo de acceso libre y modelo de acceso jerárquico [1]. El primero de estos modelos se refiere al uso del espectro en las bandas de acceso libre, tales como la banda de uso Industrial, Científico y Médico (ISM: *Industrial, Scientific, and Medical*). En estas bandas de frecuencias todos los usuarios tienen los mismos derechos para la utilización del espectro y no requiere de licencia, siempre que se respeten las regulaciones establecidas. Estas regulaciones incluyen la definición los límites espectrales, frecuencias portadoras y máxima potencia de transmisión. Algunas de las aplicaciones más conocidas que utilizan la banda ISM son *WiFi* (802.11) y *Bluetooth*.

En el modelo de acceso jerárquico se realiza una distinción entre dos tipos de usuarios: usuarios primarios (PU) y usuarios secundarios (SU). Para el acceso de los usuarios secundarios al espectro asignado legalmente a los PU pueden distinguirse tres paradigmas de comunicación: *interweave*, *underlay* y *overlay*.

En el esquema *interweave*, los SU son capaces de identificar porciones disponibles del espectro, comúnmente denominadas “agujeros espectrales” (*spectrum holes*), que utilizan para sus propias transmisiones sin interferir a los usuarios autorizados [5]. La estrategia de acceso dinámico al espectro *underlay*, también denominada acceso concurrente al espectro en [2], impone severas restricciones en la potencia de transmisión de los SU de modo que al operar de forma concurrente con los PU, la interferencia en el receptor primario se encuentre por debajo de un umbral preestablecido [5]. Para la operación concurrente con los PU, los usuarios secundarios deben ser capaces de estimar el nivel de interferencia generado en los receptores primarios. En el esquema *overlay* los SU utilizan parte de sus recursos para asistir las comunicaciones de los PU. De acuerdo con este modelo, es necesario que los SU posean información de los esquemas de codificación utilizados por los PU, información que puede ser obtenida si los PU utilizan un estándar de comunicación basado en códigos públicos.

Las distinciones que se realizan entre estas estrategias de acceso dinámico al espectro resultan útiles para su estudio desde el punto de vista teórico, pero ello no implica que todo modelo de acceso dinámico al espectro pueda categorizarse unívocamente como *underlay*, *interweave* u *overlay*. En sentido general, el acceso dinámico al espectro requiere de cuatro funcionalidades estrechamente vinculadas al ciclo cognitivo:

- 1) Identificar las oportunidades de acceso al espectro (*spectrum awareness*).
- 2) Seleccionar las bandas de frecuencia a utilizar (*spectrum decision*).
- 3) Coordinar el acceso al espectro con otros usuarios secundarios (*spectrum sharing*).
- 4) Desocupar los canales utilizados cuando son requeridos por los PU (*spectrum handoff*).

IDENTIFICACIÓN DE LAS OPORTUNIDADES DE ACCESO AL ESPECTRO

En [4] se define oportunidad espectral como “una banda de frecuencia que no es utilizada por el usuario primario de dicha banda en un momento dado en un área geográfica específica”. En [6] el autor considera que esta definición de oportunidad espectral es insuficiente, dado que solo explota tres dimensiones del espectro radioeléctrico: frecuencia, espacio y tiempo. Se proponen otras dimensiones en que puede explotarse el acceso oportunista al espectro, como el código de espectro extendido y el ángulo de arribo de la señal. Los métodos de identificación de las oportunidades de acceso al espectro pueden clasificarse como *pasivos* o *activos*. En primer caso, la información sobre la disponibilidad del espectro se recibe desde fuentes externas al sistema radio cognitivo. En el segundo caso, los SU identifican las oportunidades de acceso al espectro mediante la detección del espectro individual o cooperativa.

Métodos pasivos de detección

En el caso de los métodos pasivos de detección del espectro los PU directamente distribuyen información sobre la bandas de frecuencias disponibles a los usuarios secundarios y los recursos espectrales pueden ser obtenidos mediante la negociación con los sistemas primarios. La negociación puede incluir parámetros técnicos (potencia de transmisión, esquema de modulación, frecuencia portadora, localización), financieros (precio, opciones de pago), y/o de calidad de servicio (relación señal a ruido, umbral de interferencia). Estos parámetros dependen de las características de los servicios ofrecidos por los usuarios primarios y secundarios. De forma similar, las bandas de frecuencias asignadas bajo licencia y que son utilizadas ineficientemente por los PU pueden ser identificadas por las autoridades regulatorias y liberadas para su explotación dinámica, estableciendo un conjunto de políticas y restricciones concernientes a su utilización. En este caso, los SU deben actualizar periódicamente las políticas pertinentes a su dominio regulatorio y adaptar sus parámetros de operación para cumplir con las regulaciones establecidas.

En [7] se propone un esquema de acceso dinámico al espectro que utiliza una base de datos para obtener información de uso del espectro. La base de datos, mantenida por las autoridades regulatorias o los propios sistemas primarios, puede ser accedida y actualizada por usuarios secundarios y primarios. La base de datos puede incluir información de localización y una estimación del rango de interferencia de los usuarios secundarios. Cuando un SU necesita transmitir, consulta la base de datos, selecciona una banda de frecuencia disponible y la reserva para su uso. Cuando un usuario primario o secundario finaliza las transmisiones, la banda asociada es liberada y queda disponible para otros usuarios. Los PU pueden iniciar las transmisiones en una frecuencia reservada por un SU en cualquier momento y por tanto, los SU tienen que comprobar la base de datos periódicamente para evitar interferencias al sistema primario. Este método tiene como desventaja que requiere de una infraestructura o red dedicada para el acceso a la base de datos. Además, comparado con otros métodos, resulta menos flexible y eficiente para el acceso dinámico al espectro.

Con el objetivo de permitir la operación de los usuarios secundarios en las bandas de TV, uno de los métodos propuestos por la FCC utiliza una base de datos para facilitar el acceso de los SU al espectro. De acuerdo con el esquema propuesto, los PU (en este caso transmisores de TV) deben estimar su localización y facilitar esta información, conjuntamente con los patrones de uso del espectro, a una base de datos centralizada que emite mensajes de difusión con la información suministrada por todos los PU. Los SU, equipados con dispositivos que les permiten estimar su localización, envían su localización y las solicitudes de uso del espectro a una estación base cognitiva, que se encarga de asignar los canales para la comunicación con los usuarios secundarios y difundir la base de datos.

Otra alternativa para proporcionar información sobre la disponibilidad del espectro es la difusión periódica de mensajes para autorizar o denegar el acceso al espectro a los SU. Al igual que el esquema anterior, el uso de mensajes de difusión elimina la necesidad de detección del espectro por parte de los SU. Sin embargo, el desempeño de este método se degrada significativamente cuando los mensajes no pueden alcanzar a los SU debido a fenómenos del canal inalámbrico como la pérdida de trayecto, el ensombrecimiento y el desvanecimiento.

Detección local del espectro

El objetivo de la detección local del espectro es decidir entre las hipótesis de ausencia (H_0) y presencia (H_1) de las transmisiones primarias a partir de la observación de la señal recibida. El desempeño de un método de detección en particular puede caracterizarse a partir de la probabilidad de detección incorrecta $\delta = P\{H_0 | H_1\}$ y la probabilidad de falsa alarma $\xi = P\{H_1 | H_0\}$.

En [6] el autor considera que en el contexto de la radio cognitiva, la detección del espectro, más que una decisión binaria sobre el estado libre u ocupado de una banda de frecuencias, implica obtener las características del espectro radioeléctrico en múltiples dimensiones tales como tiempo, espacio, frecuencia, ángulo de arribo y código. También involucra la determinación de los tipos de señal que ocupan el espectro incluyendo características como modulación, forma de onda, ancho de banda y frecuencia portadora. Sin embargo, como el propio autor reconoce, para lograr implementaciones prácticas de los métodos de detección que se ajusten a esta definición se requieren de avanzadas técnicas de procesamiento digital de señales, con complejidades computacionales adicionales.

La detección local del espectro puede ser realizada utilizando dos arquitecturas: interfaz de radio dual (IRD) e interfaz de radio simple (IRS) [6]. En la arquitectura IRD se dedica un receptor para la detección del espectro y un transmisor/receptor para la transmisión y recepción de los datos, lo cual implica un mayor costo de hardware. La arquitectura IRS emplea un único transmisor/receptor y por tanto la etapa de comunicación se alterna con la etapa de detección. Como el proceso de detección se realiza en ranuras de tiempo de duración finita, solo se garantiza una precisión limitada en la detección de los PU. Con respecto a la arquitectura IRD, esta arquitectura hace un uso menos eficiente del espectro, ya que parte del tiempo se utiliza para la detección en lugar de transmitir datos. En el diseño de algoritmos de detección debe llegarse a una relación compromiso entre la detección de oportunidades de acceso al espectro y la explotación de las oportunidades identificadas. Cuanto mayor es el valor del intervalo de detección más eficaz es la detección de los PU, pero menor es la eficiencia en la utilización del espectro por parte de los SU.

En la literatura han sido investigadas extensivamente diversas técnicas para identificar la presencia de las transmisiones primarias. Entre las más comunes se encuentran el detector de energía, el detector cicloestacionario y el detector de filtro adaptado.

Detector de Energía: La señal es detectada comparando la salida de un detector de energía con un umbral preestablecido. Este detector puede ser implementado en el dominio del tiempo o de la frecuencia. La señal recibida es elevada al cuadrado e integrada en el intervalo de observación. La salida del integrador es comparada con un umbral para decidir sobre la presencia del usuario primario. Este método de detección es uno de los más utilizados debido a su generalidad, debido a su facilidad de implementación y bajos requerimientos computacionales [8]. Sin embargo, a través de este método solo pueden ser detectadas señales cuya energía

se encuentre por encima del umbral de detección. En consecuencia, la selección de un valor apropiado para el umbral de detección constituye un problema debido a la variabilidad en el nivel de ruido e interferencia de la señal a detectar. Además, su desempeño se degrada ante valores bajos de SNR y no es posible distinguir entre ruido, interferencia de otros usuarios secundarios y transmisiones primarias. Los análisis teóricos muestran que cuando $SNR \ll 1$ el número de muestras requeridas para alcanzar determinada probabilidad de detección y falsa alarma es proporcional a $1/SNR^2$ asintóticamente. El desempeño del detector de energía es muy sensible al error en la potencia de ruido estimada. Estos errores en la detección del espectro pueden ser minimizados mediante una correcta selección del umbral de detección.

Detector cicloestacionario: En este método, para la detección del espectro se explotan las periodicidades implícitas de las señales moduladas, tales como portadoras sinusoidales, trenes de pulsos o prefijos cíclicos [1]. Una señal es cicloestacionaria cuando alguno de sus parámetros estadísticos como el valor medio o la autocorrelación es una función periódica del tiempo [5]. Las señales cicloestacionarias exhiben una correlación entre las componentes espectrales que se encuentran muy separadas, debido a la redundancia espectral causada por la periodicidad. Estas características pueden ser detectadas analizando la función de densidad espectral cíclica (CSD: *Cyclic Spectral Density*) de la señal recibida [8]. Las características cicloestacionarias pueden utilizarse para distinguir y clasificar distintos tipos de señales. Debido a que el ruido es un proceso estacionario, la ventaja principal de la detección cicloestacionaria es que discrimina la energía de ruido de la señal a detectar. Con respecto al detector de energía, tiene como ventaja que puede operar ante valores menores de SNR . Tiene como desventajas que requiere una elevada razón de muestreo de la señal, el cálculo de la CSD requiere de gran cantidad de muestras y el error del tiempo de muestreo y los desplazamientos de frecuencia pueden afectar el valor de la frecuencia cíclica [9].

Detección de filtro adaptado: Cuando los usuarios secundarios tienen información de las características de las señales transmitidas por los PU, la detección de filtro adaptado es el método óptimo [1]. Tales características incluyen la frecuencia central, tipo de modulación, ancho de banda, forma del pulso y formato de trama. La mayoría de los sistemas de comunicaciones incluyen señales pilotos, preámbulos o secuencias de sincronización utilizadas para asistir el control, ecualización, sincronización, mantener la continuidad o propósitos de referencia. Si los SU tienen a su disposición información parcial de las señales de los PU, el uso del filtro adaptado aún es posible para la detección del espectro. La principal ventaja del método es el reducido número de muestras y en consecuencia el corto tiempo requerido para obtener una baja probabilidad de falsa alarma o de detección incorrecta en comparación con otros métodos [6]. Los análisis teóricos muestran cuando $SNR \ll 1$ el número de muestras requeridas para alcanzar determinada probabilidad de detección y falsa alarma es proporcional a $1/SNR$ asintóticamente. Su desventaja fundamental es la complejidad de implementación y el incremento en el consumo de potencia cuando se requiere detectar señales de varios tipos [5].

Detección cooperativa

Afectaciones en la propagación de la señal como resultado del ruido, la interferencia, el ensombrecimiento y el desvanecimiento presentes en el canal inalámbrico impiden que las técnicas de detección local garanticen en todo momento un desempeño satisfactorio en cuanto a probabilidad de detección y de falsa alarma. La detección cooperativa ha sido propuesta en la literatura como solución a este problema [6,9]. La colaboración entre varios usuarios secundarios permite explotar la diversidad espacial en la detección del espectro, incrementando consecuentemente la probabilidad de detección y disminuyendo la ocurrencia de falsos positivos.

En [10] se presenta un estudio de factibilidad de las técnicas de detección del espectro empleando una plataforma experimental para el desarrollo de sistemas radio cognitivos. Se consideran los detectores de energía, de características cicloestacionarias y de señales pilotos. A través de resultados experimentales se demuestra que el desempeño teórico de estos métodos no es alcanzable en la práctica para la detección de señales con bajos niveles de SNR . Además, se muestra que es posible incrementar la efectividad de los métodos de detección explotando la diversidad multitrayecto del canal inalámbrico mediante el empleo de arreglos de antenas y la diversidad espacial a través de métodos cooperativos de detección en entornos cerrados.

La detección cooperativa del espectro puede realizarse de forma centralizada o distribuida [6]. En una arquitectura centralizada de detección cooperativa la información de detección del espectro de múltiples usuarios secundarios es enviada a una unidad central que se encarga de identificar bandas de frecuencia disponibles a partir del análisis de las observaciones individuales de los nodos detectores. Por otra parte, en una arquitectura distribuida de detección cooperativa, la información de detección local del espectro es compartida entre múltiples nodos secundarios, pero la decisión final acerca de la estimación de las bandas de frecuencia vacantes es tomada de forma independiente por cada nodo. Con respecto a la arquitectura centralizada, la arquitectura distribuida tiene como ventaja que no requiere de infraestructura [1].

Tomando en consideración que la información compartida puede ser el resultado de la detección dura o suave realizada por los nodos individuales, los métodos de detección cooperativa pueden clasificarse según la forma en que las observaciones

individuales son reportadas [9]. Cuando los nodos comparten los datos observados o procesados, el esquema de detección se denomina detección cooperativa basada en la fusión de datos. Alternativamente, si los nodos detectores comparten sus decisiones de 1 bit (H_0 ó H_1), se denomina detección cooperativa basada en la fusión de decisiones.

Fusión de datos: Las observaciones pueden ser reportadas de forma comprimida o procesada con el objetivo de minimizar el tráfico generado, en lugar de enviar las muestras originales de la señal recibida. En [9] son propuestos esquemas basados en el detector de energía, donde la energía de la señal observada por cada nodo es enviada a una unidad central, donde la métrica de detección es obtenida como la combinación lineal de las observaciones individuales asignando un coeficiente de peso a cada muestra. Los valores óptimos de los coeficientes de peso pueden determinarse usando el criterio de *Neyman-Pearson*, el cual maximiza la probabilidad de detección para una probabilidad de falsa alarma dada [2].

Fusión de decisiones: En este caso, la información proveniente de varios nodos detectores se combina mediante operaciones *AND*, *OR*, ó *K-out-of-N*. En la operación *AND* la decisión final es H_1 si todas las observaciones son H_1 . En la operación *OR*, la decisión final es H_1 si al menos una de las observaciones es H_1 . En la operación *K-out-of-N* la decisión final es H_1 cuando al menos K de las N observaciones son H_1 , donde el valor de K es un parámetro de diseño que puede optimizarse a partir de varios criterios.

ASIGNACIÓN DEL ESPECTRO

De acuerdo con la disponibilidad de las bandas de frecuencias, los requerimientos de los SU y las políticas regulatorias, el sistema debe asignar uno o varios canales a cada SU. La decisión de utilizar una banda de frecuencia determinada se toma en función de las características estimadas del canal, tales como su capacidad, ancho de banda, nivel de interferencia, pérdida de trayecto, retardo, razón de error y patrones de uso del canal por parte de los PU. Los mecanismos de decisión del espectro pueden además explotar los resultados históricos de la detección, basándose en la distribución condicional de la disponibilidad de las bandas de frecuencias. A partir de estos resultados puede construirse un modelo estadístico para la disponibilidad de espectro de utilidad en el seguimiento de las oportunidades espectrales.

Los mecanismos de decisión del espectro pueden categorizarse como centralizados o distribuidos [11]. En el primer caso, la asignación de los canales a todos los SU puede ser formulada como un problema de optimización. En los mecanismos centralizados de decisión del espectro una gran cantidad de información debe intercambiarse entre una unidad central de control y los usuarios de la red, resultando en sobrecargas del tráfico de señalización. En [12] el problema de la asignación de las bandas de frecuencias entre un conjunto de SU es formulado como un problema de coloración de grafos, donde cada vértice del grafo representa un SU y los colores a asignar a cada vértice se corresponden con los canales disponibles para dicho SU. Una arista entre dos vértices representa una banda de frecuencias que no puede ser asignada simultáneamente a estos dos vértices debido a la interferencia mutua. Tomando en cuenta la restricción anterior, el objetivo es obtener una asignación de canales que maximice la función de utilidad del sistema.

En [13] se considera una red radio cognitiva (CRN: *Cognitive Radio Network*) basada en infraestructura, donde un nodo central coordina la asignación de los recursos entre los SU. Los SU envían información de detección del espectro al coordinador central y se realiza la asignación de los recursos en dos fases. En la primera fase, a partir de la información de detección recibida, se extraen características de los PU tales como ancho de banda, nivel de interferencia permitido y patrones de actividad utilizando una CAF. En la segunda fase las características identificadas de los PU se utilizan para calcular la capacidad disponible para cada *cluster* de la CRN. Por último, la asignación de la tasa de transmisión para los SU es formulada como un problema de optimización donde el objetivo es minimizar la diferencia entre la suma de las capacidades disponibles y la suma de las tasas de transmisión asignadas, sujeto a conjunto de restricciones que garantizan la protección de los PU y otros requerimientos del sistema.

En [14] los autores investigan el acceso oportunista a las bandas de TV en una arquitectura de malla basada en *clusters*. El objetivo es distribuir equitativamente la carga de tráfico de la red cognitiva entre las bandas secundarias y primarias limitando la interferencia generada. Los nodos cabecera de cada *cluster* comparten información del estado de la red (número de clientes y localización de sus puntos de acceso) y los resultados de la detección para estimar la interferencia generada por la red secundaria en el centro de los bloques de la malla. El problema de asignación del espectro se modela entonces como un problema de programación lineal entera donde la solución garantiza no sobrepasar el umbral de interferencia de la red primaria.

En los esquemas de asignación distribuida del espectro, los canales son seleccionados por los SU de forma individual y dinámica. Con el objetivo de distribuir uniformemente toda la carga de tráfico de los SU entre múltiples canales, en [11] se propone un esquema de selección del canal basado en la probabilidad de ocupancia estimada de acuerdo a las estadísticas de uso del espectro por parte de los PU. El valor óptimo de la probabilidad de selección se obtiene como la solución de un problema de optimización no lineal que cada SU formula con el objetivo de minimizar el tiempo total de acceso al espectro.

En [15] se investiga el desempeño de un protocolo de asignación del espectro donde los SU se organizan de forma autónoma en grupos locales para realizar la coordinación a través de un canal de control común. Las tramas de la capa MAC se organizan en súper-tramas consistentes en periodo de señalización, una ventana de coordinación y periodo de transmisión de datos. Durante la ventana de coordinación los usuarios conmutan al canal de coordinación y utilizan el protocolo CSMA/CA para comunicarse y coordinar el acceso a los canales de datos. A través de un protocolo de negociación se realiza la selección de los canales en función de una métrica de selección que considera de forma conjunta la carga de tráfico, la conectividad y la interferencia en los canales disponibles.

ACCESO AL ESPECTRO

Cuando múltiples usuarios secundarios comparten una misma banda de frecuencia, el acceso al espectro debe coordinarse entre los SU de modo que se minimicen las colisiones y la interferencia mutua. Convencionalmente, la capa MAC es responsable de la coordinación del acceso al espectro. Las estrategias de acceso múltiple al espectro pueden ser estáticas, aleatorias, por división en el tiempo (TDMA) o por división en la frecuencia (FDMA). En el diseño de un protocolo MAC para redes radio cognitivas deben tomarse en consideración cuestiones prácticas tales como la disponibilidad de un canal de control común para compartir información y el número de transmisores/receptores disponibles por usuario [2]. En [2] los protocolos MAC para redes radio cognitivas se clasifican tomando en consideración los siguientes aspectos:

- 1) Arquitectura de operación: distribuida o centralizada.
- 2) Esquema de acceso en el tiempo: en ranuras de tiempo asignadas, acceso aleatorio o una combinación de ambos esquemas.
- 3) Necesidad de un canal de control común.
- 4) Información requerida del sistema: global o local.

En el protocolo IEEE 802.22 la contención entre celdas vecinas se realiza a través del protocolo CBP (*Coexistence Beacon Protocol*). En este protocolo, las estaciones base de cada celda, al final de cada trama MAC, transmiten un mensaje que permite la comunicación y sincronización dentro de una comunidad de celdas. Cuando una estación base recibe un mensaje de sincronización difiere sus transmisiones para evitar la interferencia entre celdas vecinas.

Dentro de los protocolos MAC más extendidos para redes inalámbricas se encuentra el estándar IEEE 802.11, donde el acceso al canal inalámbrico es regulado a través del intercambio de mensajes de control RTS/CTS. Cuando un usuario A quiere enviar un paquete a un usuario B, primero emite un mensaje de control *Request to Send* (RTS), que contiene su identificación, la identificación del nodo destino y el tamaño del paquete de datos. Si el usuario B está en el rango de transmisión de A recibe el mensaje RTS y en caso de ser posible la comunicación, replica con un mensaje *Clear to Send* (CTS). Si el mensaje CTS es recibido por A, se inicia la transmisión de datos y espera por el mensaje ACK de recepción correcta de los datos. Los paquetes de control y de datos son transmitidos usando un nivel fijo (máximo) de potencia. Cualquier nodo que escuche estos mensajes de control retrasa sus propias transmisiones hasta que finalicen las transmisiones en curso. Para limitar las colisiones, cada nodo mantiene un vector de transmisiones en curso que es actualizado cada vez que un mensaje RTS, CTS o ACK es recibido.

Control de potencia

Los protocolos de control de acceso al medio basados en el intercambio de mensajes de control RTS/CTS a niveles fijos de potencia presentan varias deficiencias. Tómese como ejemplo el escenario ilustrado en la figura 2, donde el nodo A utiliza la máxima potencia de transmisión para enviar los paquetes de control al nodo B, resultando en la contención de las transmisiones de los nodos C y D. Sin embargo, ambas transmisiones (A→B y C↔D) pueden, en principio, tomar lugar simultáneamente si los nodos son capaces de adaptar sus niveles de potencia acorde a la interferencia y características de la propagación del enlace. Estudios teóricos y resultados obtenidos mediante simulaciones han demostrado que las técnicas de control de potencia de transmisión (TPC: *Transmit Power Control*) pueden proveer de beneficios significativos en cuanto a la reducción del consumo de energía e incremento en la capacidad del canal inalámbrico.

El problema de la asignación de los niveles de potencia ha sido investigado extensivamente en la literatura, tanto el contexto de la radio cognitiva como en el contexto de las redes inalámbricas de sensores (WSN: *Wireless Sensors Network*) y redes *ad hoc*

móviles (MANET: *Mobile Ad-Hoc Network*). En general, en el problema de la asignación de potencia puede ser abordado considerando tres restricciones: los límites superiores e inferiores de la potencia de transmisión de los SU, un valor mínimo de SINR requerido por los PU y un valor mínimo de SINR requerido por los SU. En ausencia de competición, el problema de TPC puede formularse como un problema de optimización, donde el objetivo es maximizar o minimizar una única función de utilidad para todos los SU sujeto a las restricciones mencionadas anteriormente. La relación entre la minimización del consumo de energía y la maximización del rendimiento para un enlace secundario es investigada en [16]. En [17] los autores proponen un algoritmo de TPC en el cual los nodos cognitivos explotan información de localización para encontrar el vector de potencia óptimo a través de una búsqueda exhaustiva y se demuestra cómo puede incrementarse el rendimiento de la red combinando el control de potencia con antenas directivas. En la mayoría de los algoritmos de control de potencia anteriores se asume que los SU tienen a su disposición una completa información del sistema, incluyendo la localización de todos los dispositivos y las características del canal inalámbrico.

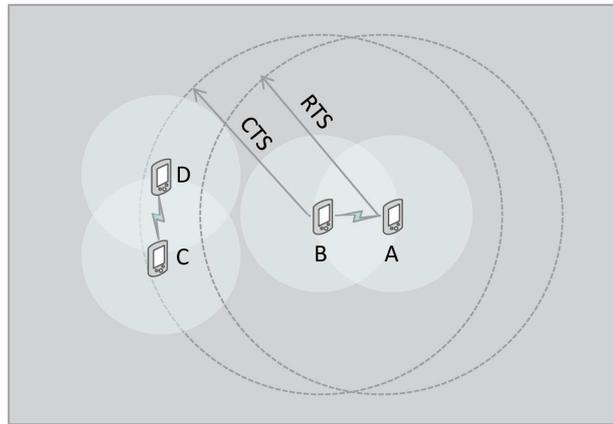


Figura 2. Acceso al medio basado en el intercambio de mensajes de control RTS/CTS a niveles fijos de potencia.

Durante la transmisión de un paquete de datos, el algoritmo de TPC puede asignar un nivel de potencia fijo o variable. En el primer caso, el nivel de potencia asignado es función del estado del sistema en el instante que se inicia la transmisión del paquete. Cualquier cambio en los valores de estas variables durante la transmisión (debido al inicio de otras transmisiones o variaciones en el canal inalámbrico) puede tener un impacto negativo en el desempeño del algoritmo de TPC. En una red descentralizada, para modificar dinámicamente los niveles de potencia de las transmisiones en curso, es necesario que cada nodo actualice constantemente su información sobre el estado del sistema. Para este fin pudiera utilizarse un canal de control común, pero la distribución del estado completo del sistema a todos los nodos implica una sobrecarga de tráfico adicional que puede afectar significativamente el desempeño del sistema.

En sistemas de comunicaciones inalámbricos basados en infraestructura, los niveles de potencia de transmisión son controlados por una estación base que tiene a su disposición una completa información del estado del sistema. En este caso, es menos complejo formular la asignación de potencia como un problema de optimización global. En sistemas celulares cada vez que se inicia o finaliza una sesión, los niveles de potencia de las transmisiones en curso son renegociados.

Como alternativa a la formulación de un problema de optimización global, el diseño de algoritmos descentralizados de TPC puede abordarse utilizando la teoría de juegos no cooperativos [4]. En la teoría de juegos se utilizan modelos para estudiar interacciones en estructuras formalizadas de incentivos (los llamados *juegos*) y llevar a cabo procesos de decisión. En la elección de una conducta óptima los costes y beneficios de cada opción no están fijados de antemano para cada jugador, sino que dependen de las elecciones de otros individuos. Un juego consiste en un conjunto de jugadores, un conjunto de movimientos (o estrategias) disponible para estos jugadores y una especificación de recompensas para cada combinación de estrategias. Durante el juego, el objetivo de cada jugador es seleccionar una acción de un espacio de posibles acciones para maximizar una función de utilidad dada. En el caso del control de potencia, los niveles de TP representan las estrategias que puede adoptar cada jugador. El concepto central en la teoría de juegos no cooperativos es un estado, denominado equilibrio de Nash, en el cual ningún jugador se beneficia modificando su estrategia mientras los otros no cambian la suya. Un juego puede no tener equilibrio de Nash, o tener más de uno. Si permitimos *estrategias mixtas* (en las que los jugadores pueden escoger estrategias al azar con una probabilidad

predefinida), entonces todos los juegos de N jugadores en los que cada jugador puede escoger entre un número finito de estrategias tienen al menos un equilibrio de Nash. Si un juego tiene un único equilibrio de Nash y los jugadores son completamente racionales, los jugadores escogerán las estrategias que forman el equilibrio.

En [18] la cooperación entre usuarios secundarios y primarios en un escenario de acceso dinámico al espectro *overlay* es investigada utilizando un modelo basado en la teoría de juegos. Se compara este esquema con un modelo de acceso dinámico al espectro *underlay* en términos de calidad de servicio, probabilidad de interrupción y temperatura de interferencia. En el escenario *underlay*, las estrategias que puede adoptar cada jugador consisten en seleccionar una banda de frecuencia y un nivel de potencia de transmisión. La utilidad de la estrategia seguida es función de la interferencia que se genera a los PU y demás SU que operan en la banda de frecuencia seleccionada, de la interferencia percibida de otros SU y de la potencia de la señal recibida. En el escenario *overlay*, los SU pueden seleccionar como parte de su estrategia, además de la potencia y el canal, los niveles de potencia que destinan a sus propias transmisiones y a la repetición de los mensajes de los PU de forma cooperativa. En este caso la función de utilidad incorpora, en adición a los términos que se consideran para el escenario *underlay*, un quinto término que representa el beneficio reportado a la red primaria como resultado de la cooperación.

En [19] se estudia el impacto de la incertidumbre en la información de estado del canal y niveles de interferencia en el rendimiento total de un conjunto de SU utilizando la teoría de juegos. El nivel de interferencia más ruido percibido por cada usuario, normalizado con respecto a la función transferencial del canal, se modela como la suma de su valor nominal (o estimado) y un error aditivo. Basado en la información disponible del error aditivo, se considera un algoritmo de TPC basado en la teoría de optimización robusta. Se proponen dos métodos para garantizar la robustez del algoritmo. En el primer caso el desempeño de la red se garantiza probabilísticamente, tomando en consideración la distribución estadística del error. En el segundo de los métodos propuestos el desempeño de la red se garantiza para cualquier valor de los parámetros inciertos dentro de ciertos límites.

MOVILIDAD ESPECTRAL

En un entorno de radiocomunicaciones de acceso dinámico al espectro, la disponibilidad y calidad de los canales inalámbricos puede cambiar frecuentemente en el tiempo. Cuando en un sistema radio cognitivo se detecta la presencia de un PU en la banda de frecuencia en uso, dicha banda debe ser liberada inmediatamente para uso de los usuarios con licencia. El procedimiento que permite la transición de un canal a otro con una degradación mínima en el desempeño se conoce como *handoff*. El retardo que se produce durante el *handoff* o movilidad espectral tiene un impacto negativo en el desempeño del sistema y es un elemento a tener en cuenta en el diseño de protocolos de comunicación para la radio cognitiva. Otro factor importante es el retardo que se produce entre el momento que se detecta la presencia de las transmisiones primarias en una banda de frecuencia y el momento en que se desocupa dicha banda, ya que las transmisiones de los SU durante este período pueden provocar interferencia perjudicial a los PU.

Los mecanismos de movilidad espectral pueden clasificarse reactivos o proactivos [11]. Los mecanismos proactivos permiten mitigar la latencia al reservar cierto número de bandas de frecuencias, de modo que puedan ser utilizadas de forma inmediata en caso de *handoff*. De acuerdo con las observaciones a largo plazo de la actividad de los usuarios primarios en determinadas bandas de frecuencias, los patrones de utilización del espectro de los PU pueden ser inferidos y de esta forma predecir con antelación los eventos, de movilidad y degradación de la calidad del canal, que originan el *handoff*. El número de bandas reservadas debe ser escogido cuidadosamente, de modo que exista un balance entre la eficiencia en la utilización del espectro y el desempeño del mecanismo de *handoff* [8]. Los mecanismos proactivos requieren complejos algoritmos para la estimación del comportamiento de la red y se necesitan al menos dos transmisores/receptores para realizar la detección fuera de banda y la comunicación en paralelo. Por otro lado, los mecanismos de *handoff* reactivos, con una mayor latencia, determinan los canales disponibles bajo demanda. Una comparación entre ambas estrategias puede encontrarse en [11].

El estándar IEEE 802.22 propone el manejo del *handoff* espectral a través del protocolo IDR (Incumbent Detection Recovery Protocol), que permite a la red restaurarse a un estado de actividad normal manteniendo un nivel aceptable de QoS luego un evento que activa el mecanismo de *handoff*. El procedimiento propuesto explota una lista de canales de reserva para reconstruir el enlace de comunicación. Para limitar la sobrecarga de señalización y el retardo, los pares transmisores-receptores conocen por adelantado que banda utilizar para restaurar los servicios cuando se detecta un PU en la banda en uso. Estos canales de reserva son identificados mediante la detección fuera de banda y se mantienen en una lista de prioridad utilizada por los dispositivos durante el procedimiento de recuperación. Los usuarios que transmiten en el mismo canal comparten la misma lista de prioridades con el objetivo de minimizar la señalización y recuperar rápidamente las comunicaciones.

PLATAFORMAS DE DESARROLLO

Aunque se las investigaciones sobre el acceso dinámico y la detección del espectro son numerosas, la mayoría de ellas se enfocan en el análisis teórico y mediante simulación de modelos matemáticos. Considerando el volumen de estas investigaciones teóricas, muy pocos de los resultados obtenidos han sido verificados en la práctica. Hasta la actualidad, algunas plataformas experimentales han sido presentadas en diversos centros de investigación y universidades. Una revisión y análisis de los resultados más relevantes en este contexto para el período 1999-2011 puede encontrarse en [20].

Dentro de las plataformas de software/hardware se encuentran los proyectos *OSSIE*, *GNU Radio* e *Iris*. El proyecto *OSSIE* (*Open Source SCA Implementation:: Embedded*) es un paquete de software de código abierto para el desarrollo de sistemas SDR basado en *Linux*, desarrollado en el Instituto Tecnológico de Virginia. Debido a que *SCA* (*Software Communication Architecture*) es una arquitectura diseñada específicamente para SDR y no para la radio cognitiva, la plataforma *OSSIE* no soporta configuración en tiempo real.

El sistema SDR de uso más extendido es el proyecto de código abierto GNU Radio, el cual soporta el procesamiento de señales independiente del hardware. En este sistema los bloques de procesamiento de señales están escritos en C/C++, mientras que las herramientas de visualización están desarrolladas en *Python*. Una de las desventajas fundamentales de la plataforma *GNU Radio* es que la latencia en el procesamiento de datos puede ser severa, impuesta por el diseño de estructura en bloques en que se encuentra implementado el sistema.

Iris es una arquitectura de software para la investigación y desarrollo de sistemas de radio reconfigurables. Ha constituido la base de un amplio rango de demostraciones sobre las tecnologías de radio cognitiva y de acceso dinámico al espectro presentadas en varias conferencias internacionales entre el 2007 y el 2010. Enfocada hacia la reconfiguración en tiempo real, *Iris* ofrece soporte para todas las capas de la pila de protocolos y provee de una plataforma no solo para el desarrollo de enlaces de radio punto a punto sino también para una completa implementación de redes radio cognitivas. En adición, *Iris* es compatible con una amplia variedad de arquitecturas de hardware y sistemas operativos.

En las plataformas anteriores la mayor parte de las funcionalidades como modulación, codificación y acceso al medio se realizan por software y las funcionalidades de la etapa de RF son mínimas. Existe otro grupo de plataformas compuestas que contienen todos los componentes requeridos (software y hardware dedicado) para el desarrollo inmediato de sistemas CR. Dentro de estas se encuentran los sistemas BEE/BEE2 (*Berkeley Emulation Engine*) [10], WARP (*Wireless Open-Access Research Platform*) y KUAR (*Kansas University Agile Radio*).

REGULACIONES Y ESTANDARIZACIÓN

En los últimos años varias instituciones han realizado esfuerzos significativos por acelerar los procesos de normalización y establecimiento de regulaciones para el uso oportunista del espectro. Dentro de las instituciones involucradas en los procesos de estandarización de los sistemas radio cognitivos se encuentran la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), la Asociación Europea para la Estandarización de los Sistemas de la Información y las Comunicaciones (ECMA) y el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI).

Coexistencia en las bandas de acceso libre

En las bandas de frecuencia de acceso libre, los dispositivos de comunicaciones inalámbricas deben incluir la capacidad de coexistir con otros dispositivos que operan en el mismo canal y que utilizan protocolos de comunicaciones diferentes. Los mecanismos de coexistencia que se especifican en estándares como *Bluetooth*, *WiFi* (IEEE 802.11), *ZigBee* (IEEE 802.15.4) y *WiMAX* (IEEE 802.16) comparten similitudes con las técnicas de acceso dinámico al espectro, que pueden verse como una evolución de los mecanismos de coexistencia. La coexistencia no requiere el uso de técnicas cognitivas, pero las técnicas cognitivas pueden utilizarse para facilitar la coexistencia.

El estándar *Bluetooth* incluye una característica, denominada salto adaptativo de frecuencia, introducida con el objetivo de reducir la interferencia entre las tecnologías inalámbricas que comparten la banda de frecuencia de los 2.4 GHz. El salto adaptativo de frecuencia requiere de un algoritmo de detección para determinar la presencia de otros dispositivos en la banda ISM. Las frecuencias identificadas como ocupadas son evitadas. El algoritmo de detección utiliza varias estadísticas del canal, incluyendo el indicador de potencia de la señal recibida y la razón portadora a interferencia más ruido, para clasificar los canales diferentes categorías según su disponibilidad [6].

En la especificación IEEE 802.11k, extensión propuesta del estándar IEEE 802.11, se utilizan varias estadísticas del canal inalámbrico para hacer más eficiente el uso de los recursos de radio. Algunas de estas estadísticas incluyen el reporte de la carga del canal y el histograma de ruido. Los puntos de acceso (APs: *Access Points*) obtienen información del canal desde cada unidad móvil y realizan sus propias mediciones. El AP entonces utiliza la información disponible para regular el acceso al canal y realizar una distribución equitativa del tráfico en la red. En otras especificaciones del estándar 802.11, los dispositivos móviles usualmente se conectan al AP con el nivel de señal más intenso, lo cual puede resultar en la sobrecarga de unos APs y la utilización ineficiente de otros. En 802.11k, cuando el AP de señal más intensa se encuentra a su máxima capacidad, las nuevas solicitudes de conexión se asignan a los APs subutilizados.

En el estándar IEEE 802.15.2 se definen una serie de técnicas colaborativas y no colaborativas que pueden ser aplicadas en función de mejorar la coexistencia con otros tipos de sistemas, particularmente con sistemas basados en los estándares IEEE 802.11 e IEEE 802.15. En la especificación 802.11h se incluyen capacidades de selección dinámica de frecuencia (DFS: *Dynamic Frequency Selection*) y TPC. En este caso, las funciones de DFS tienen como objetivo la detección de radares militares y reasignación de un conjunto básico de servicios potencialmente interferentes a otras bandas de frecuencias. IEEE 802.16-2004 es otro estándar que incluye capacidades de DFS y TPC. En el estándar IEEE 802.15.4 se incluyen técnicas de selección dinámica del canal, similares a las técnicas de DFS.

Estandarización

En el caso del IEEE, las actividades de estandarización llevadas a cabo por el Comité de Coordinación de Estándares (SCC) 41 sobre las Redes de Acceso Dinámico al Espectro y el Comité de Estándares 802 sobre redes LAN/MAN se resumen en las tablas 1 y 2, respectivamente. En el estándar IEEE 802.22 se especifican las interfaces inalámbricas, capas física y de control de acceso al medio de redes inalámbricas de área regional (WRAN) punto a multipunto, compuestas por estaciones base y dispositivos móviles/fijos operando en las bandas VHF/UHF de TV entre 54MHz y 862MHz.

Tabla 1. Estandarización de la radio cognitiva (IEEE SCC 41).

Estándar	Propósito
P1900.1	Terminologías y conceptos relacionados con los sistemas de radio de próxima generación y redes de acceso dinámico al espectro.
P1900.2	Guía técnica para el análisis de la interferencia y coexistencia entre sistemas de radio operando en las mismas bandas de frecuencias.
P1900.3	Análisis y pruebas técnicas para la evaluación de los sistemas de radio con capacidades de acceso dinámico al espectro.
P1900.4	Arquitectura para la optimización del uso de los recursos de radio en redes inalámbricas heterogéneas.
P1900.4.1	Interfaces y protocolos la optimización del uso de los recursos de radio en redes inalámbricas heterogéneas.
P1900.4a	Arquitecturas e interfaces de redes de acceso dinámico al espectro.
P1900.5	Requerimientos de los lenguajes de especificación de regulaciones y arquitectura para el acceso dinámico al espectro.
P1900.6	Interfaces y estructuras de datos para el intercambio de información de detección del espectro.

Para operar en las bandas asignadas a los sistemas de televisión, se definen como requerimientos una probabilidad de detección mayor del 90 % y una probabilidad de falsa alarma menor del 10 %. Los sistemas secundarios deben ser capaces de detectar señales de -116dBm y -94 dBm para los sistemas de TV digitales y analógicos, respectivamente. En el caso de los dispositivos inalámbricos de baja potencia que operan en las bandas de TV, como cámaras y teléfonos inalámbricos, en el estándar se establece como requerimiento un umbral de detección de -107 dBm. Para facilitar su detección, las estaciones bases de estos dispositivos transmitirían periódicamente señales indicando su presencia. Estas señales, definidas en el documento 802.22.1, consisten en secuencias pseudo-aleatorias de un ancho de banda de 78 kHz.

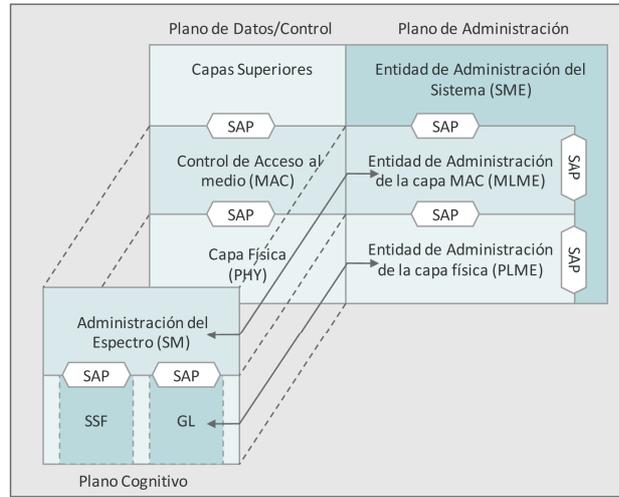


Figura 3. Arquitectura del protocolo IEEE 802.22.

Muchas de las características del estándar 802.16 han sido adoptadas en las especificaciones de las capas física, control de acceso al medio y convergencia. En la figura 3 se muestra la arquitectura de protocolos propuesta en el estándar, donde se separa el sistema en los siguientes planos: cognitivo, información/control y administración. Las funciones de geolocalización (GL) y detección del espectro (SSF) y que interactúan con la etapa de RF del dispositivo, proporcionan al módulo de administración del espectro (SM) información de localización y sobre la presencia de señales primarias, respectivamente. La mayor parte de la inteligencia y capacidad de tomar decisiones residen en la estación base y no en el usuario final. Las funciones de seguridad para los planos cognitivo, de información, control y administración incluyen la integridad de los datos, identificación, autenticación, autorización y confidencialidad /privacidad.

Tabla 1. Estandarización de la radio cognitiva (IEEE 802).

Estándar	Propósito
P802.22	Políticas y procedimientos para la operación de las WRANS en las bandas de TV.
802.11y	Mecanismos de coexistencia en las bandas de 3650 a 3700 MHz. Estos mecanismos incluyen la especificación de nuevas regulaciones, detección de otros transmisores, TPC y DFS.
P802.11af	Es una modificación de las especificaciones de las capas física y MAC del estándar 802.11, con el objetivo de cumplir con los requerimientos legales para el acceso y coexistencia en las bandas de TV.
P802.22.1	Métodos de protección de los dispositivos de baja potencia en las bandas de TV.
P802.19.1	Mecanismos de coexistencia en las bandas de TV.

CONCLUSIONES

En este trabajo ha sido presentada una visión general de la radio cognitiva como tecnología clave para lidiar con el actual problema de escasez espectral, mediante el acceso dinámico al espectro. La explotación de las oportunidades de reutilización del espectro constituye la función básica y la característica más distintiva de la radio cognitiva, siendo además una de las más investigadas en la literatura científica. Sin embargo, la radio cognitiva representa un paradigma de las comunicaciones inalámbricas mucho más amplio. Al respecto, se ha de señalar que la formulación original de la radio cognitiva ideal, donde un agente autónomo percibe la situación del usuario y de forma proactiva asiste al usuario en sus necesidades, permanece insuficientemente desarrollada.

La implementación de la radio cognitiva, como tecnología emergente, plantea interesantes cuestiones y retos desde el punto de vista práctico. En términos generales, entre los retos fundamentales a los que nos enfrentamos para hacer posible este nuevo horizonte de aplicaciones tecnológicas se encuentran los siguientes:

- *Diseño del canal de control común*: La utilización de un canal de control común es un método eficaz para el intercambio de información durante las etapas de detección y coordinación de acceso al espectro. En varias investigaciones se asume la existencia de un canal de control común para el intercambio de información, sin describir el diseño del mismo. Además, en un sistema que dependa exclusivamente de un canal de control común para el intercambio de información de control, la indisponibilidad de dicho canal puede comprometer seriamente la operación del sistema. Para garantizar un desempeño óptimo son necesarias investigaciones más avanzadas en relación a la utilización de un canal de control común.
- *Estimación del canal*: Con el fin de garantizar la protección de los usuarios primarios y optimizar el desempeño de la red secundaria, la información de estado del canal entre usuarios secundarios y primarios es de gran importancia. En la práctica, es difícil obtener exactamente esta información debido a las exigencias de cooperación por parte del sistema primario. Por otro lado, la estimación del canal a partir de la información de localización requiere el uso de técnicas de localización y modelos de propagación que se adecuen a los requerimientos del sistema.
- *Integración de las etapas de detección y acceso al espectro*: Para optimizar el tiempo de detección, en el diseño de la arquitectura de un sistema radio cognitivo debe tomarse en consideración la integración entre los módulos de detección y de acceso al espectro. Sin embargo, en múltiples investigaciones ambas etapas del ciclo cognitivo se consideran de forma independiente.

REFERENCIAS

1. WANG, B. AND K. J. R. LIU Advances in Cognitive Radio Networks: A Survey. *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, 2011, 5(1), 5 - 22.
2. LIANG, Y.-C., K.-C. CHEN, G. Y. LI AND P. MÄHÖNEN Cognitive Radio: Networking and Communications An Overview. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2011, 60(7), 3386 - 3407.
3. MITOLA, J. AND G. Q. MAGUIRE Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Comm.*, 1999, 6(4), 13-18.
4. HAYKIN, S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2005, 23(2), 201-220.
5. CHEN, K.-C. AND R. PRASAD *Cognitive Radio Networks*. Edtion ed. Chippenham: John Wiley & Sons Ltd. , 2009. ISBN 978-0-470-69689-7.
6. YUCEK, T. AND H. ARSLAN A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 2009, 11(1), 116-130.
7. BROWN, T. X. An analysis of unlicensed device operation in licensed broadcast service bands. In *DySPAN 2005*. 2005, p. 11–29.
8. LU, L., X. ZHOU, U. ONUNKWO AND G. Y. LI Ten years of research in spectrum sensing and sharing in cognitive radio. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012, (28), 1 -16.
9. ZENG, Y., Y.-C. LIANG, A. T. HOANG AND R. ZHANG A Review on Spectrum Sensing for Cognitive Radio Challenges and Solutions. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2009, 2010, 1 -15.
10. CABRIC, D. Addressing the Feasibility of Cognitive Radios. *IEEE Signal Process. Mag.*, 2008, 25(6), 85-93.
11. WANG, L.-C. AND C.-W. WANG. Spectrum Management Techniques with QoS Provisioning in Cognitive Radio Networks. In *Wireless Pervasive Computing (ISWPC), 2010 5th IEEE International Symposium on*. IEEE, 2010, p. 116-121.
12. WANG, W. AND X. LIU. List-coloring based channel allocation for open-spectrum wireless networks. In *IEEE Vehicular Technology Conference*. Dallas, Texas: IEEE, 2005, vol. 62, p. 690-694.
13. VIZZIELLO, A., I. F. AKYILDIZ, R. AGUSTI, L. FAVALLI, et al. Cognitive radio resource management exploiting heterogeneous primary users. In *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE*. IEEE, 2011, p. 1-5.
14. CHOWDHURY, K. R. AND I. F. AKYILDIZ Cognitive Wireless Mesh Networks with Dynamic Spectrum Access. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, January 2008, 26(1), 168–181.
15. ZHAO, J., H. ZHENG AND G.-H. YANG. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks. In *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*. 2005, p. 259 –268.
16. MONTEJO, S., R. D. SOUZA, E. M. G. FERNANDEZ AND V. ALFONSO Rate and Energy Efficient Power Control in a Cognitive Radio Ad Hoc Network. *IEEE Signal Process. Lett.*, 2013, 20(5), 451-454.
17. MONTEJO, S., R. D. SOUZA, E. M. G. FERNANDEZ AND V. ALFONSO Impact of Power Allocation and Antenna Directivity in the Capacity of a Multiuser Cognitive Ad Hoc Network. *Radioengineering*, Dec. 2012, 21(4), 1110-1116.
18. GIUPPONI, L. AND C. IBARS. Distributed cooperation in Cognitive Radio Networks: Overlay versus Underlay Paradigm In *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*. 2009, p. 1-6.
19. SHARAFAT, A. R. Worst-Case Robust Distributed Power Allocation in Shared Unlicensed Spectrum. arXiv preprint arXiv:1105.2989, 2011, 1-25.

20. **PAWELCZAK, P., K. NOLAN, L. DOYLE, S. W. OH, et al.** Cognitive Radio: Ten Years of Experimentation and Development. IEEE Commun. Mag., 2011, 90-100.

AUTORES

Raikel Bordón López, Ing. Profesor de la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba. rbardon@uclv.edu.cu.

Samuel Montejo Sánchez, DrSc. Profesor Asistente de la Universidad Central de Las Villas (UCLV), Cuba. montejo@uclv.edu.cu.