

Radio cognitiva – Estado del arte

Cognitive radio – State of the Art

Julio Héctor Aguilar Rentería

Investigador - Grupo de Informática y
Telecomunicaciones (I2T)

Universidad ICESI. Cali (Colombia)

jhaguilar@icesi.edu.co

Andrés Navarro Cadavid, Ph.D.

Director - Grupo de Informática y
Telecomunicaciones (I2T)

Universidad ICESI. Cali (Colombia)

anavarro@icesi.edu.co

Fecha de recepción: 28 de Febrero / 2011

Fecha de aceptación: 18 de Marzo / 2011

Palabras clave

Radio Cognitiva, Radio
Software, Acceso Dinámico de
Espectro, Gestión de Espectro.

Keywords

Cognitive Radio, Software
Defined Radio, Dynamic
Spectrum Access, Spectrum
Management

Colciencias **3**
tipo

Resumen

El crecimiento de la tecnología radio en los últimos años ha sido muy grande y presenta retos importantes para el uso adecuado del espectro. Es bien conocido que el uso actual del espectro radio no es el más eficiente, por lo que se han planteado tecnologías que permitan usar de manera más eficiente este espectro. Los desarrollos en tecnologías de Radio Software en los años noventa y en la primera década del 2000, han permitido que la tecnología de Radio Cognitivo empiece a tomar fuerza en diversos ámbitos de los sistemas de radio. En este artículo se hace una revisión detallada de esta tecnología y los avances recientes, así como algunos de los retos por superar

Abstract

The wireless technology is growing very quickly, in the actuality the new technologies applied to the radius link appear with a multiplicity of names that change as the application and the use that do of them: Bluetooth, GSM, Microwaves, Links Satellites, Wi-Fi, WiMax, ZigBee, etc. Each system uses a hardware and devoted software and exclusive chord to his functionalities to send and receive the waves of radio. Some of these bands of the spectrum can justify by the fact that some applications work better in determinate spaces inside the spectrum electric radio. This exponential growth of wireless applications creates an every time main demand of spectrum electric radio what has motivated the research of technologies of radio that can scalar to satisfy the future demands, so much in terms of efficiency of spectrum and performance of the applications.

I. Introducción

En la actualidad, en la gran mayoría de países, las redes y aplicaciones inalámbricas están reguladas mediante una política de asignación de espectro fija: El espectro está regulado por el Estado, que administra y asigna la utilización de las diferentes bandas de frecuencia a distintas empresas, usuarios y/o servicios mediante autorización, permiso o licencia a largo plazo en amplias regiones geográficas. Cada país tiene un cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencias, conforme lo acordado en las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) [1]. El espectro es un recurso escaso donde cada vez es más difícil encontrar bandas libres para el despliegue de nuevos sistemas, especialmente en las bandas por debajo de los 3 GHz, particularmente valiosas para los sistemas inalámbricos debido a sus favorables características de propagación.

Sin embargo, estudios recientes llevados a cabo por la FCC (Federal Communications Commission) [2] han demostrado que gran parte del espectro licenciado asignado está infrautilizado, observándose grandes variaciones temporales y geográficas en su uso, con rangos de utilización desde el 15% al 85%. Además, medidas recientes de utilización de espectro [3, 4] muestran que, mientras que ciertas partes son altamente utilizadas, otras permanecen prácticamente sin usar, incluso por debajo de los 3GHz.

Desde esta perspectiva, que muestra la ineficiencia de las actuales políticas de asignación de espectro, diferentes organismos empezaron a considerar la necesidad de introducir reformas, no sólo para mejorar su utilización sino también para intentar proveer nuevo espectro disponible para nuevas aplicaciones. En el 2003, la FCC emitió una NPRM (*Notice of Proposed Rulemaking*) [5], donde apremia por el replanteamiento de las actuales arquitecturas de redes inalámbricas. El principio básico para el diseño de estas nuevas redes propuesto por la FCC es Radio Cognitiva (*Cognitive Radio, CR*). Según la FCC [6], un dispositivo de CR es un sistema de radiofrecuencia capaz de variar sus parámetros de transmisión basándose en su interacción con el entorno en el que opera.

Dada esta definición, las dos características principales de un dispositivo de este tipo son:

- » **Capacidad cognitiva:** Tecnología necesaria para capturar la información de su entorno de radiofrecuencia e identifica las partes del espectro que no estén siendo utilizadas.
- » **Auto-reconfiguración:** Tecnología necesaria para que el dispositivo pueda variar, de manera dinámica, distintos parámetros relacionados con la transmisión o recepción (frecuencia, potencia, modulación, etc.), de acuerdo con su entorno.

Con el objetivo de aumentar la eficiencia en la utilización del espectro disponible, la FCC propuso la apertura de ciertas bandas asignadas a televisión para su uso por usuarios no licenciados, denominados Usuarios Secundarios, mediante técnicas de compartición del espectro basado en la oportunidad (*OSS por Opportunistic Spectrum*

Sharing). También en los Estados Unidos, la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) ha sido la primera organización en desarrollar nuevas tecnologías que permiten que múltiples sistemas de radiocomunicaciones compartan el mismo espectro mediante mecanismos adaptativos como el DSA (*Dynamic Spectrum Access*), dentro del programa *NeXt Generation* (xG) [7, 8]. El ejército de los Estados Unidos (*US Army*) también ha realizado investigaciones en el mismo sentido, desarrollando técnicas ASE (*Adaptive Spectrum Exploitation*) [9, 10].

Igualmente, debido a la NPRM emitida por la FCC, el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) empezó a desarrollar el que probablemente sea el primer estándar en utilizar tecnología CR, denominado IEEE 802.22 WRAN, que tiene como principal objetivo proporcionar acceso a Internet utilizando el espectro asignado a sistemas de televisión (entre 54 MHz y 862 MHz). Por este motivo, muchas de las investigaciones y trabajos relacionados con radio cognitiva se han centrado en el estudio de señales ATSC DTV (*Advanced Television System Committee for Digital Television*), cuyo ancho de banda es de 6 MHz, así como la modulación AM usada en los micrófonos inalámbricos, con ancho de banda de 200kHz. Sin embargo, dado que actualmente la mayor parte del espectro está asignado, cualquier iniciativa civil para la utilización compartida del espectro ha de tener como premisa fundamental la no interferencia con los usuarios licenciados o Usuarios Primarios, por lo que resulta evidente que para el desarrollo de futuros dispositivos, aplicaciones o sistemas basados en Radio Cognitiva es necesaria la detección de todo tipo de señales.

Así pues, el primer paso para la creación de un dispositivo CR es el desarrollo de técnicas que permitan la detección fiable de las partes inutilizadas del espectro, lo que se conoce como *Spectrum Sensing*. Así, un dispositivo CR debe escanear periódicamente su entorno de radiofrecuencia para detectar las partes del espectro que no están siendo utilizadas temporalmente por sus usuarios primarios. Estas bandas sin utilizar se denominan espacios en blanco o bandas blancas (*White Bands* [11]).

II. Antecedentes de la radio cognitiva

Uno de los problemas que genera la constante evolución de las comunicaciones móviles, es el surgimiento de un gran número de estándares (GSM, PDC, WCDMA, TD-SCDMA, GSM-GPRS, CDMA200) y técnicas de acceso al medio (FDMA, TDMA, CDMA, WCDMA), que facilitan el uso eficiente del espectro, pero que necesitan ser soportados por distintas industrias de terminales y de estaciones base. Además, se ha generado una gran demanda en la conectividad inalámbrica de Internet pero con múltiples servicios, por ejemplo la integración para ofrecer una perfecta cobertura global y un control sobre la calidad de servicio (QoS), todo esto mediante protocolos o estándares (WAP, i-mode, WiFi, WiMax, *Bluetooth*) que propiciarán el desarrollo de futuros dispositivos inalámbricos [12].

El término SR (*Software Radio*) fue acuñado por Joseph Mitola III, en 1991, para referirse a un tipo de radios reprogramables o reconfigurables [13], equipos donde

un mismo elemento de hardware es capaz de realizar diferentes funciones, en distintos instantes de tiempo, con la introducción de cambios en su configuración mediante software. La definición dada por Joseph Mitola III:

A Software Radio is a radio whose channel modulations waveforms are defined in software. That is, waveforms are generated as sampled digital signals, converted from digital to analog via wideband DAC (Digital to Analog Converter) and the possibly unconverted from IF (Intermediate Frequency) to RF (Radio Frequency). The receiver, similarly, employs a wideband ADC (Analog to Digital Converter) that captures all the channels of the software radio node. The receiver then extracts, down converts and demodulates the channel waveform using software on a general purpose processor [14]

En un sistema SR la digitalización de la señal se realiza en la antena. Sin embargo, el estado actual de la tecnología hace que un sistema SR ideal no se pueda implementar.

Por eso se considera que un SDR (*Software-Defined Radio*) es una versión de un SR *implementable* con la tecnología disponible, donde la conversión se realiza en la etapa de Frecuencia Intermedia (IF), tras un filtrado selectivo.

La estructura básica de un sistema SDR se compone de tres bloques o etapas, tal y como se muestra en la figura 1. La etapa de RF se encarga de transmitir/recibir las señales de radiofrecuencia para, en el caso de recepción, adecuarlas y convertirlas a frecuencia intermedia o bien, en el caso de transmisión, amplificar y modular las señales de IF adecuándolas para su posterior transmisión vía radio.

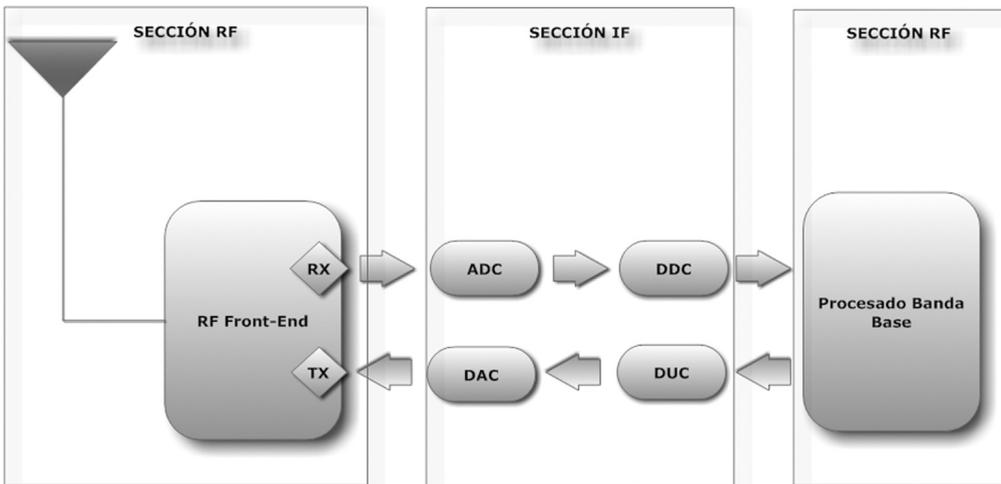


Figura 1. Estructura de un SDR

La primera implementación conocida del concepto SDR fue el proyecto militar estadounidense *SpeakEasy* [15], cuyo objetivo principal era establecer más de diez tipos de tecnologías de telecomunicaciones inalámbricas (las más usadas por el ejército americano) en un solo equipo programable, que operaría en un rango de frecuencias desde los 2 MHz hasta los 200 MHz. Un objetivo adicional del proyecto era que el prototipo debía tener la posibilidad de actualizar su código para así tener en cuenta posibles futuros estándares. Dicho proyecto empezó en 1991 y sólo en 1995 fue posible lograr todos los objetivos planteados. Sin embargo, en el proyecto inicial sólo se podía mantener una comunicación a la vez, por lo cual se modificó y se planteó una segunda fase del mismo, en la que se trabajaron aspectos como la disminución de peso y coste, el incremento de la capacidad de procesamiento, la simultaneidad de comunicaciones y el diseño basado en software libre.

El *Joint Tactical Radio Systems (JTRS)*, pronunciado “Jitters” en círculos militares) [16] es un programa del departamento de defensa estadounidense, cuyo objetivo es desarrollar sistemas de radiocomunicaciones reconfigurables vía software para el ejército americano, desde terminales de bajo costo con modulaciones concretas de banda estrecha, hasta sistemas multi-modo, multi-banda y multi-canal, capaces de soportar un gran número de modulaciones, tanto de banda estrecha como de banda ancha.

Por ejemplo, AN/USC-61 *Digital Modular Radio (DMR)*, diseñado por *General Dynamics*, es un equipo full-duplex de cuatro canales, reconfigurable y controlado por software, que actualmente incorporan tanto submarinos como barcos de la marina americana. Soporta múltiples modulaciones implementadas vía software, como por ejemplo: MIL-STD-188-181A, 183, SINCGARS SIP/ESIP, Have-Quick I/II, VHF/UHF LOS; AM para aviación civil y militar, FM para voz y datos, y FSK/BPSK/SBPSK/QPSK [17].

Además de permitir seleccionar diferentes modos y parámetros operacionales, también accede a descargar actualizaciones relacionadas con los mismos.

Este proyecto surgió a raíz de los problemas en las comunicaciones que surgieron durante las operaciones Furia Urgente (*Grenada*) y Tormenta del Desierto (Irak), debido a las insuficiencias en cuanto a interoperabilidad y ancho de banda de los equipos existentes en aquel momento. En el desarrollo del proyecto se ha creado toda una familia de sistemas de radiocomunicaciones para transmisión de datos, voz y vídeo en el rango de 2 MHz a 2000 MHz, sustituyéndose un total de 750.000 equipos por 180.000 SDR.

En Europa, la EDA (*European Defence Agency*) desarrolla desde el año 2006 varios proyectos relacionados con la tecnología SDR, con objetivos similares a los del proyecto JTRS, como WINTSEC (*Wireless Interoperability for Security*) o ESSOR (*European Secured Software Definid Radio Referencial*) [18].

Como usuario, la iniciativa más popular desarrollada con tecnología SDR es la plataforma GNU Radio [19], Es un conjunto de herramientas para el procesamiento de señal y el control del hardware. Está programado en Python y C++, software libre,

para el desarrollo de sistemas SDR, creado en 1998 por Eric Blossom. GNU Radio se creó a partir del código Pspectra, desarrollado por el MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) en el proyecto *SpectrumWare*. Sin embargo, actualmente GNU Radio no contiene nada de *Pspectra*, tras la reescritura completa de su código en 2004.

GNU Radio ha sido el creador de USRP (*Universal Software Radio Peripheral*), desarrollado por Matt Ettus [20], un sistema de adquisición y generación digital de señal, capaz de procesar señales de hasta 16 MHz de ancho de banda, formado por cuatro ADC de 12 bits y 64 Ms/s, cuatro DAC de 14 bits y 128 Ms/s y circuitería de soporte, que incluye una interfaz USB 2.0 de alta velocidad.

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

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

III. Definición de radio cognitiva

Cognitive Radio es un sistema SDR inteligente o cognitivo. El término fue acuñado por Joseph Mitola III en su tesis doctoral [21] en el año 1999. La tesis se centró principalmente en la descripción del RKRL (Radio Knowledge Representation Language), y nombraba un dispositivo de CR como una pequeña parte del mundo físico, capaz de detectar las necesidades de comunicación de su usuario y, mediante la adquisición de conocimiento de su entorno, disponer los mecanismos para satisfacer dichas necesidades:

“Cognitive Radio is a radio that employs model based reasoning to achieve a specified level of competence in radio-related domains” [21].

Otras definiciones del término son:

“An intelligent wireless communications system that is aware of its surrounding environment (i.e., outside world), and uses the methodology of understanding-by-building to learn from the environment and adapt its internal states to statistical variations in the incoming RF stimuli by making corresponding changes in certain operating parameters (e.g. transmit-power, carrier frequency and modulation strategy)

in real time, with two primary objectives in mind: highly reliable communications whenever and wherever needed; efficient utilizations of the radio spectrum.” Simon Haykin [22].

“A radio that can change its transmitter parameters based on interaction with the environment in which operates.” FCC [8].

“A radio or system that senses its operational electromagnetic environment and can dynamically and autonomously adjust its radio operating parameters to modify system operation, such as maximize throughput, mitigate interference, facilitate interoperability, and access secondary markets.” NTIA [23].

“A radio frequency transmitter/receiver that is designed to intelligently detect whether a particular segment of the radio spectrum is currently in use, and to jump into (and out of, as necessary) the temporarily-unused spectrum very rapidly, without interfering with the transmissions of other authorized users.” IEEE USA [24].

“A type of radio that can sense and autonomously reason about its environment and adapt accordingly. This radio could employ knowledge representation, automated reasoning and machine learning mechanisms in establishing, conducting or terminating communication or networking functions with other radios. Cognitive radios can be trained to dynamically and autonomously adjust its operating parameters.” IEEE 1900.1 [25].

El SDR Forum ha creado dos grupos de trabajo sobre el tema. *Cognitive Radio Working Group*, centrado en la parte más tecnológica, utiliza la siguiente definición:

“A radio that has, in some sense, (1) awareness of changes in its environment and (2) in response to these changes adapts its operating characteristics in some way to improve its performance or to minimize a loss in performance.” [26].

Por su parte, el SDR Forum Special Interest Group for Cognitive Radio, el cual se centra en el desarrollo de aplicaciones para Cognitive Radio, lo define como:

“An adaptative, multi-dimensionally aware, autonomous radio (system) that learns from its experiences to reason, plan and decide future actions to meet user needs.” [26]

IV. Características de la radio cognitiva

El Radio Definido por Software (RDS) tiene como propósito integrar una cobertura global libre de irregularidades a través de cualquier región geográfica, establecer interfaces con diferentes sistemas y estándares que proveen de servicios completos y libres de irregularidades.

Las características básicas que debería poseer un sistema *Cognitive Radio* son:

- » Percibir el entorno en el que opera, mediante técnicas de *spectrum sensing*.
- » Poseer conciencia de dicho entorno, así como de sus propias capacidades y recursos.
- » Variar y adaptar, de forma inteligente, sus parámetros de transmisión/recepción.

» Poder actuar tanto de transmisor como de receptor, de forma autónoma.

A criterio de la FCC [26], un dispositivo de radio cognitiva debería poder reconfigurar los siguientes parámetros:

- » Sistemas de comunicación: operar a través de distintos sistemas de comunicación.
- » Modulación: Seleccionar el tipo de modulación adecuado en función de las características de canal y los requerimientos del usuario.
- » Frecuencia Portadora: Con Base en la información sobre el espectro radioeléctrico disponible y del tipo de transmisión a realizar, debería ser capaz de seleccionar la frecuencia portadora más adecuada.
- » Potencia transmitida: Si las características del medio permiten reducción en la potencia transmitida, el CR debería reducirla hasta un cierto nivel de manera que continuara manteniendo la calidad de la transmisión pero, a la vez, permitiera aumentar el número de usuarios que comparten esa porción de espectro, reduciendo la interferencia entre ellos.

Todos los parámetros de transmisión de un CR deberían poder reconfigurarse adaptándose a los cambios que se produzcan en su entorno. Existen otra serie de características adicionales, como por ejemplo:

- » Sensores de localización, a la hora de implementar el spectrum sensing, por lo que el sistema debería incorporar algún sistema de posicionamiento, como por ejemplo GPS (Global Positioning System).
- » Algoritmos de inteligencia artificial, porque el CR debe monitorear su entorno y aprender de él.
- » Protocolos de comunicación, con el objetivo de minimizar las interferencias con los usuarios primarios o con otros dispositivos de CR.
- » Asumiendo un entorno en el que varios CR pretenden acceder a los mismos recursos, es necesario implementar protocolos para la negociación. En este aspecto algunos autores han sugerido la utilización de resultados de la teoría de juegos, teniendo presente que:
 - » Un juego es un modelo (representación matemática) de una situación de decisión interactiva.
 - » Su principal objetivo es crear un marco formal que capture la información pertinente, de tal manera que sea adecuada para el análisis.
 - » Diferentes situaciones indican el uso de diversos modelos de juego [27].

V. Arquitectura de radio cognitiva

La arquitectura del sistema de radio cognitiva es una plataforma independiente, definida por un paquete de algoritmos mediante software, llamado motor cognitivo, con una interfaz general de radio. Dentro del motor cognitivo los módulos funcionales son diferentes y están definidos para tener en cuenta las capacidades

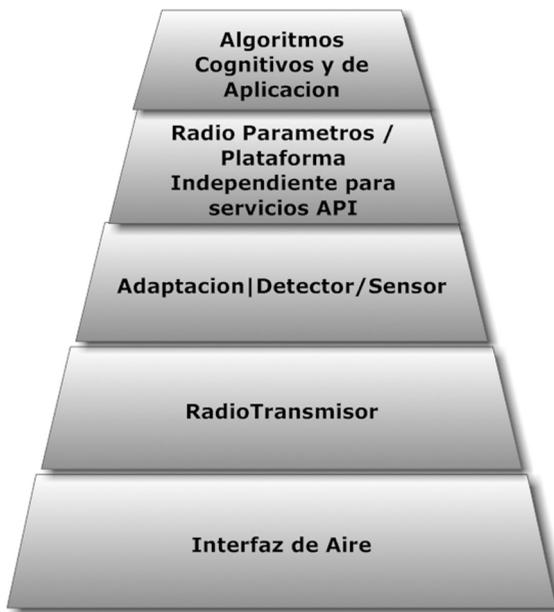


Figura 2. Modelo de un sistema de radio cognitivo

cognitivas como conciencia, razonamiento, creación de soluciones óptimas y control adaptable del radio.

Una solución general del radio cognitivo está definida en la forma del paquete del software que pueda trabajar con plataformas de radio reconfigurable para proveer funcionalidad cognitiva. Este paquete de software, llamado motor cognitivo, consta de un conjunto de mecanismos generales de aprendizaje y algoritmos de aplicaciones específicas, que puede ser aplicado para plataformas de radio con implementación de hardware. Como se muestra en el bloque de la arquitectura del sistema del radio cognitivo representado en forma de diagrama en la figura 2, el motor cognitivo maneja recursos y adapta la operación del radio para optimizar su función.

La interacción entre el motor cognitivo y la plataforma de radio se da a través de un estándar de interfase entre ellos como se muestra en la figura 2 [28].

Un paquete de software de algoritmos, llamado el motor cognitivo (CE, **Cognitive Engine**), se diseña y superpone sobre la plataforma de hardware de radio. El CE maneja los recursos de la radio para llevar a cabo funciones cognitivas, de tal manera que adapta su operación para un óptimo rendimiento. Como ilustra la figura 2, el CE le da a la radio funcionalidades cognitivas combinando los procesos de aprendizaje de maquina con la radio operación

- » Un núcleo de aprendizaje de maquina se desarrolla para dotar de capacidades cognitivas a aplicaciones inalámbricas. El refuerzo en el aprendizaje y la optimización evolutiva son los principios claves del diseño del núcleo de aprendizaje. Un ciclo doble de conocimientos queda integrado al núcleo de aprendizaje.

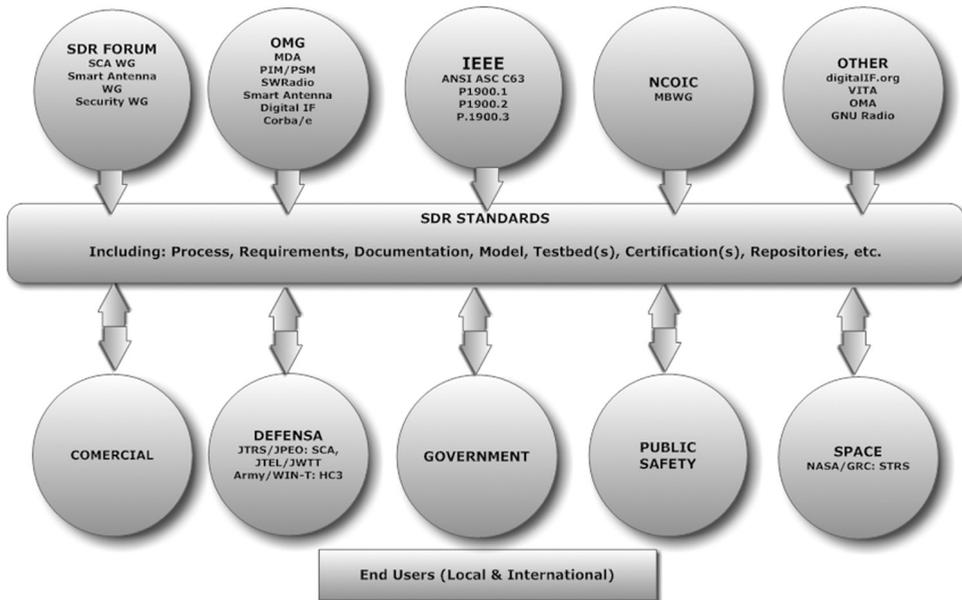


Figura 3. Arquitectura que soporta aplicaciones actuales y futuras

- » Cualquier radio con un nivel apropiado de capacidad de reconfiguración puede soportar y ser controlado por el CE, a través de la plataforma de una interface de radio independiente. Gracias a que el CE no es una plataforma específica, es posible implementar conocimientos generales y aprendizaje en la solución de una variedad de problemas de aplicativos.
- » La funcionalidad cognitiva se enfoca en las capas 1 a 3, para asegurar optimización entre ellas. Los algoritmos de cognición generales pueden ser extendidos a las capas altas y configurados para reunir los requerimientos específicos de varias aplicaciones.
- » Como un nodo de red, por naturaleza un CR puede trabajar de manera individual o acompañado de gestores de recursos y optimizadores de desempeño. La estructura de aprendizaje de CR consta de tres pasos: reconocimiento, razonamiento y adaptación. Se puede implementar con flexibilidad. Tanto de manera centralizada, como un nodo CR totalmente funcional, o ser distribuido a través de la red, donde cada parte de ella va a requerir un nivel distinto de inteligencia y diferentes capas de optimización [28].

La figura 3 muestra un modelo general en el cual se ve la independencia del hardware del diseño principal de la solución del radio cognitivo. Esto posibilita tender un puente sobre los mecanismos de aprendizaje con el funcionamiento del radio. La plataforma de interfaz independiente tiene dos flexibilidades de diseño o propósito: dar soporte a los mecanismos generales de aprendizaje y a los algoritmos específicos de aplicación; y dar soporte y reconfigurabilidad a las plataformas de radio como las del RDS .

VI. Estandarización y regulación de la radio cognitiva

IEEE 802.22 [29, 30] es el primer estándar mundial basado en tecnología CR. Se pretende que sea un estándar para redes inalámbricas de área regional (WRAN, *Wireless Regional Access Network*), centrándose en la construcción de redes WRAN punto-multipunto fijas, que utilizarían las bandas UHF/VHF de televisión entre los 54MHz y los 862MHz.

En IEEE 802.22 se propone el uso tanto de los canales de televisión como de las bandas de guarda. En el proyecto se especifica una interfaz inalámbrica fija punto-multipunto, donde una estación base controla su celda y los usuarios presentes en la misma, a los que se denomina CPE (*Consumer Premise Equipments*). Esta estación base se ocupa de realizar el *spectrum sensing*, dando instrucciones a los distintos CPE para que tomen las medidas necesarias.

El grupo de trabajo IEEE 802.22 se formó en 2004. La principal diferencia entre el 802.22 y los anteriores estándares IEEE 802 es el radio de cobertura de las estaciones base. Actualmente, se continúa trabajando en el proceso de estandarización. Por ejemplo, puesto que está pensado para operar en bandas asignadas a sistemas de televisión, en dicho estándar se especifican los umbrales para desocupar un canal ante la presencia de las siguientes señales:

- » Televisión Digital: -116dBm sobre un canal de 6MHz.
- » Televisión Analógica (NTSC): -94dBm en el pico de la portadora.
- » Micrófonos inalámbricos: -107dBm en un ancho de banda de 200kHz.

Para mitigar la interferencia sobre estas señales, el protocolo 802.22 considera la utilización de tablas de ocupación de espectro, las cuáles serían actualizadas vía software, tanto por el propio CR como por el administrador del sistema. Además, también establece límites sobre la máxima potencia transmitida e interferencias sobre bandas adyacentes.

VII. Radio definido por software como plataforma para radio cognitiva

Una de las principales características de la radio cognitiva es la capacidad de adaptación en los parámetros de radio (incluida la frecuencia, potencia, ancho de banda de modulación). Se pueden cambiar en función del entorno de radio, la situación del usuario, las condiciones de la red, la localización geográfica. El SDR puede proporcionar una funcionalidad de radio muy flexible, para evitar el uso de aplicaciones específicas de circuitos analógicos y los componentes fijos. Por lo tanto, la radio cognitiva debe ser diseñada alrededor de SDR. El SDR es el núcleo que permite la tecnología para la radio cognitiva [31].

A pesar de que son posibles muchos modelos conceptuales, uno de los más simples es el que describe la relación entre la radio cognitiva y SDR, como se muestra en la figura 4 [32]. En este modelo, la radio cognitiva se envuelve alrededor del SDR. Este modelo

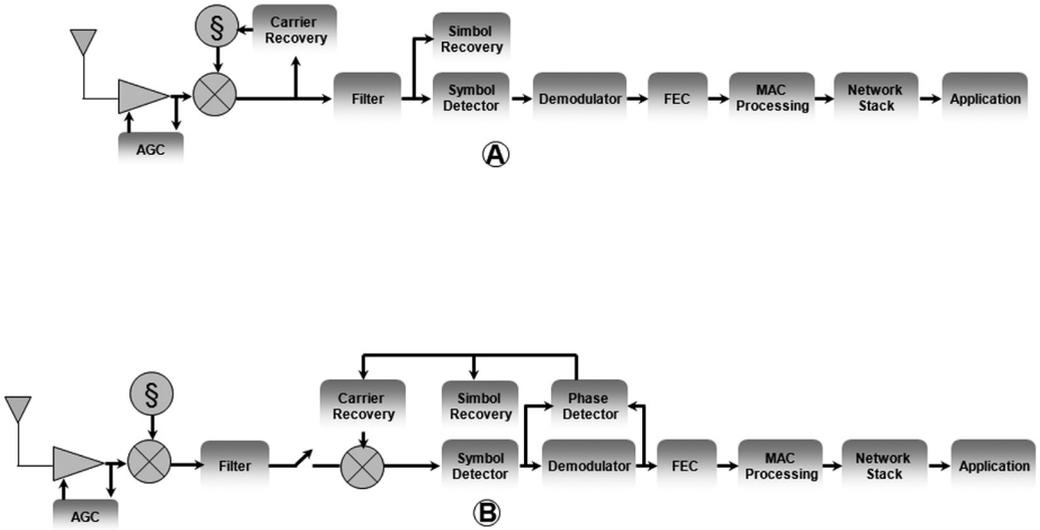


Figura 4. Relación CR / SDR

se ajusta bien a la citada definición de la radio cognitiva, que incluyen la combinación de motor cognitivo, SDR y las otras funciones de apoyo (por ejemplo, sensores).

El motor cognitivo es responsable de la optimización o el control de los SDRs sobre la base de algunos parámetros de entrada, como los que se detectan en el entorno de radio, el contexto del usuario y las condiciones de la red [33].

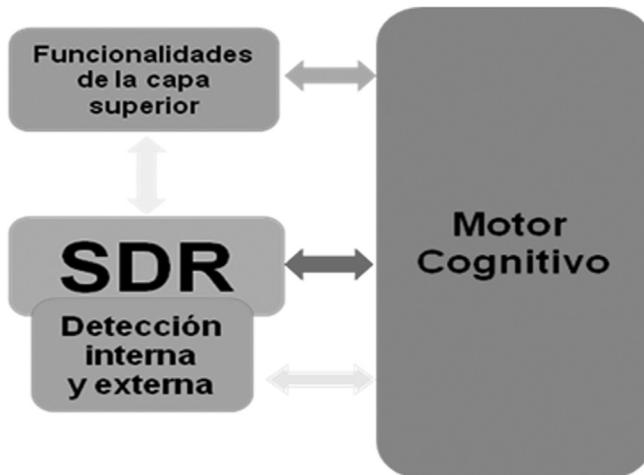


Figura 5. Modelo Conceptual del SDR

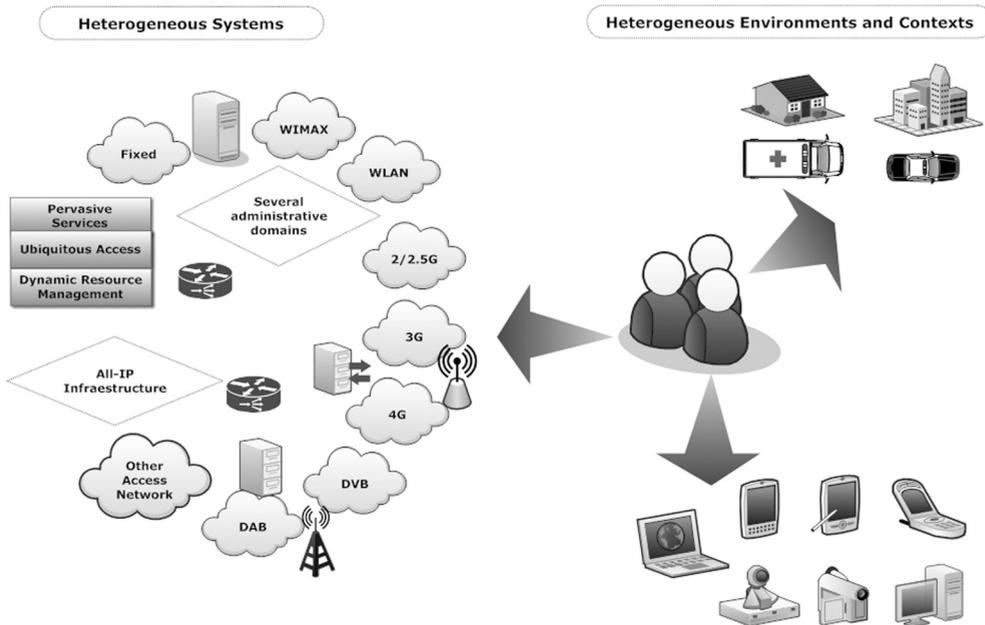


Figura 6. Reconfigurabilidad

VII. Servicios de radio cognitiva para el usuario

Las mejoras de servicios que se han activado por radio cognitiva están motivadas por un conjunto de casos de uso [34], que requieren que la radio cognitiva tenga un grado avanzado de “entendimiento” de los temas ilustrados en la figura 6.

Así, por ejemplo, una radio cognitiva puede inferir las implicaciones relacionadas con la radio de una solicitud de un taxi a una dirección específica. A continuación, puede indicarle a la red de su plan para moverse de su ubicación actual a *Grev Turgatan 16*. La red, entonces sabe que este usuario (con alta probabilidad) se moverá a través de tres sitios de la célula en un cuarto dentro de los próximos diez minutos. Si este usuario se dirige a un centro de conferencias equipado con una mordaza móvil local, es poco probable que ofrezca la carga habitual de la red después del viaje en taxi. Estos intercambios podrían reducir la incertidumbre sobre la carga ofrecida a una red, lo que podría mejorar la eficiencia del uso de los recursos de radio.

El SDR como está concebido actualmente no puede entablar una conversación inteligente con una red porque no tiene un modelo basado en razonamiento o capacidad de planificación, y no hay idioma en el que expresar estas cosas. Por ejemplo, un SDR de los Estados Unidos puede tener el acceso de RF, la memoria y recursos de procesamiento para operar en Suecia. Pero si carece de compatibilidad con el nivel de versión del proveedor de servicios de acogida, no va a funcionar. Un SDR no puede “discutir” su estructura interna con la red, para descubrir que puede ser configurado de

nuevo para aceptar la descarga de software necesario. La radio cognitiva, sin embargo, emplea un amplio conjunto de modelos internos de utilidad para una gama de cuadros de diálogo. Además, los modelos de espacio-tiempo del usuario, red, recursos de radio y servicios para personalizar y mejorar la experiencia del consumidor. El análisis de los casos de uso dado en un gran conjunto de modelos, primitivos conceptuales y esquemas de razonamiento necesarias para la radio cognitiva [35].

VIII. Tipos de radio cognitiva

Existen varios tipos de radios cognitivas (CR) que en particular pueden adaptar su tecnología de comunicaciones para interactuar con una variedad de redes existentes de radio [36].

Adapt4 XG1. El XG1 es la primera adaptación, de dispositivo inteligente, es un software que se ajusta a la expresión, “Cognitive Radio”. El *Automatic spectrum adaptation Protocol* administra el tiempo, espacio, frecuencia y potencia para proporcionar comunicaciones fiables, sin causar interferencia a otros usuarios con licencia [37].

¿Cómo funciona? Una característica patentada permite a todos los radios cognitivos XG1 dentro de una red monitorear la actividad de otros usuarios en una banda especificada y determinar el ancho de banda no utilizado. La red genera un conjunto de caminos paralelos y transmite en estos canales, si no están en uso. Cuando otro usuario con licencia se detecta, la red deja de utilizar esa frecuencia hasta que vuelven a estar inactivos.

Dos características adicionales se emplean para reducir aún más la probabilidad de interferencia a otros usuarios. Una técnica de salto de frecuencia, que reduce al mínimo la cantidad de tiempo que cualquier frecuencia única utiliza; y el poder de las radios para transmitir de forma dinámica regulada, de manera que se use la cantidad mínima de energía necesaria para establecer una comunicación.

Corvus. Las premisas básicas del sistema *Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum (Corvus)* son las siguientes:

- » La abundancia de espectro, que está disponible, utilizada de manera compartida por los usuarios secundarios (SU).
- » Utilizar técnicas de radio cognitiva para evitar interferir con los usuarios primarios (PU) cuando están presentes.

Se define un PU como una entidad legalmente propietaria de algunas bandas de frecuencia (F-Band) (por ejemplo, proveedor de teléfono celular, televisión, servicios de emergencia...). Los PU no son conscientes de radio cognitiva, es decir, no hay medios para el intercambio de información entre los usuarios primarios y secundarios proporcionada por un sistema de atención primaria. En concreto, los PU no ofrecen especiales de señalización con el fin de acceder a su banda de frecuencia. Por otro lado, un usuario secundario (SU) es una entidad que quiere adquirir espectro no utilizado de

los propietarios de licencia (usuario principal) para sus comunicaciones. Asumimos que todos los SUs tienen capacidad de radio cognitiva, es decir, el sistema sólo se compone de usuario primario y usuario secundario con capacidades de radio cognitivo [38].

CR1. Es una arquitectura desarrollada por Mitola, como parte de su tesis doctoral. Se basa en *case-based machine learning* y *natural language reasoning*, guiados mediante el ciclo cognitivo y una descripción ontológica de las capacidades del sistema, como es el RKRL [39].

DARPA xG. Investiga aspectos de la tecnología Cognitive Radio como parte del programa *NeXt Generation (xG) Networks*, también conocido como DSAN (*Dynamic Spectrum Access Networks*) [40].

E2R Project. El E2R (End-to-End Reconfigurability), es un proyecto de la Unión Europea donde participan numerosas universidades y empresas [41].

Nautilus. Proyecto de Microsoft, consiste en el análisis teórico y el diseño de un protocolo colaborativo y consciente del ambiente para el acceso dinámico al recurso espectral en ambientes de radio heterogéneos [42].

KNOWS. El proyecto KNOWS (*Kognitiv Networking Over White Spaces*), ha generado una serie de prototipos funcionales cuyos componentes incluyen hardware, un mecanismo para asignación de espectro, y un protocolo MAC (Media Access Control), Parte del desarrollo está basado en el estándar 802.11 del IEEE [43].

Spectrum Pooling. El reparto de espectro es una técnica basada en OFDMA que permite el acceso público a bandas de frecuencias privadas y crea reservas comunes de espectro. Fue propuesta por Timo A. Weiss y Friedrich K. Jondral como mejora de radio cognitiva. Se encuentra en fase de investigación y desarrollo y, en consecuencia, presenta limitaciones [44].

- » El panorama del IEEE802.22 define que un terminal móvil seleccione su espectro de radiofrecuencia preferente a partir de los espectros disponibles provistos por una estación base. Hay tres clases de componentes involucradas, terminales móviles, estaciones base y una fuente de base de datos del radio. Todas las estaciones base consultan a la base de datos durante la fase de inicialización para información sobre recursos e identificación de un canal candidato luego de censarlo y confirmar que se encuentra libre; después una estación base establece comunicación sobre el canal confirmado. Una terminal móvil escanea una lista predefinida de canales -o todos los canales- para encontrar uno que esté disponible, cuando trata de establecer comunicación y conectarse con al menos una estación base, luego obtiene los recursos de esos parámetros tal como la identificación de los canales de enlace superior e inferior o de los niveles de intensidad [45].

Las estaciones base y las terminales móviles están en un estado de comunicación después de la inicialización y ambos periódicamente reportan su información sobre

los recursos a la base de datos. La lista de información recomendada incluye la localización de la terminal móvil, su nivel de intensidad, su banda de transmisión, su formato de modulación y la relación señal a ruido. La base de datos reconfigura ambos, es decir, las estaciones base y las terminales móviles luego de obtener esta información. Cada estación base puede controlar la terminal móvil a la que le esté prestando el servicio, administrar el uso del espectro de radiofrecuencia para evitar interferencias y configurar de manera más poderosa y eficiente la modulación y la codificación con acceso a la base de datos.

El radio cognitivo IEEE802.22 usa esa información (el espectro de radiofrecuencia y la base de datos) dependiendo de la posición e independiente de la posición. Aunque una terminal móvil determinísticamente seleccione a una estación base a partir de las estaciones base disponibles y se enlace para consultar información, no hay negociación o coordinación entre las terminales móviles y las estaciones base en este escenario [46].

- » Múltiples radios con funciones cognitivas. Este escenario visualiza la integración de un radio, como un chip radiodifusor acoplado a estándares WiFi/WiMAX, que estará incrustado en las terminales móviles y las estaciones base para permitir respuestas radiodifusoras flexibles. Una terminal móvil selecciona su radio preferente para comprobar las características del sistema de radio proporcionadas por el operador.

Una terminal móvil con funciones radio cognitivas, el cual está esquematizado en la primera detecta a los radios, encuentra a los candidatos y consulta la base de datos para comprobar si hay algún conflicto potencial (por ejemplo, problemas de terminales ocultos). La base de datos recopila información de comunicación, desde las terminales móviles a estaciones base e informa a las terminales móviles qué radio es apropiado seleccionar en el área.

La terminal móvil reconfigura el control de acceso al medio (MAC) / nivel físico (PHY) para el radio seleccionado e inicia la autenticación siguiendo el protocolo especificado por el sistema del radio.

Este panorama también usa información dependiente de la posición para seleccionar el sistema del radio y la red de acceso, para establecer referencias para el operador de la información localizada independientemente.

Una terminal móvil tendría ambos estándares Wi-Fi y Wi-MAX y el control de acceso al medio (MAC) / nivel físico (PHY), con una “capa de convergencia” encima de los controles de acceso al medio (MAC) y el sensor del espectro de radiofrecuencia en la terminal, lo que detectaría la presencia de otros radios, y esta información le permitiría a la capa de control de acceso al medio (MAC) / nivel físico (PHY) ser seleccionada para cualquier sistema de radio, y mejorar los beneficios de la terminal para consultar la base de datos. La terminal móvil está bien posicionada para coordinar el cuerpo del área de red (CAR) que selecciona la más adecuada comunicación de largo alcance para enviar los datos del sensor a la red [46].

Seguridad en radio cognitiva

Los principales objetivos específicos con la radio cognitiva incluyen la preservación de la privacidad de la información. Esto puede ser una necesidad vital, especialmente en las comunicaciones militares [47].

En muchos sistemas de comunicación, la seguridad de la información está garantizada mediante el uso de una cantidad excesiva de cifrado. Sistemas de cifrado que sólo son conocidos por el emisor y el receptor objetivo, para evitar que los usuarios no deseados puedan espiar la comunicación.

En algunos otros sistemas, la seguridad de la información es un atributo inherente a la capa física propia. *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) y los sistemas de salto de frecuencia, que pueden ser considerados ejemplo de dichas tecnologías, permiten una comunicación segura mediante la asignación a cada usuario de un código específico de espaciamiento o de una secuencia de saltos.

De esta manera, un número de usuarios pueden utilizar la misma banda de frecuencias o el mismo fragmento de frecuencias sin escuchar el uno al otro [48].

La radio cognitiva se halla todavía en fase muy formativa. Por lo tanto, existen ejemplos limitados de los sistemas de trabajo. Con el fin de recurrir a un ejemplo relacionado con la seguridad se toma en cuenta la norma IEEE 802.22, un estándar para servicios de banda ancha inalámbrica en los espacios de televisión libres. La norma tiene en cuenta las cuestiones de seguridad a través de la especificación de subcapas de seguridad.

Las subcapas de seguridad se centran en la integridad de los datos; la identificación de los usuarios y su asociación con una identidad válida; la autenticación de los dispositivos; los procesos de autorización, confidencialidad, protección de la privacidad de los datos de espionaje; y la prevención de no repudio; entre otras cosas.

Algunas de las instrucciones y recomendaciones que se consideran son:

- » El objetivo es utilizar las funciones de base de datos para la autenticación, autorización, gestión de claves, el servicio de suspensión / reanudación, el traslado y la prevención del clonado.
- » No es un requisito que el firmware sea a prueba de falsificaciones para evitar la modificación no autorizada de firmware y/o funcionalidades. Cualquier intento de cargar el firmware en un dispositivo no aprobado debe dejarlo inoperante.
- » Un CPE debe autenticarse en la red cada vez que se registra allí. Esto evita que los CPE no autorizadas entren en la red y que estaciones base no autorizadas traten de emular a una estación base autorizada.
- » Existe la estipulación de que las contraseñas y la información de claves deben ser aprobadas a través de la interfaz inalámbrica.
- » Hay un interés en el uso de credenciales. Cada suscriptor tiene un conjunto de credenciales que describen lo que le está "permitido" hacer. Un conjunto estándar de las credenciales debe ser desarrollado para este propósito.

- » Los algoritmos de cifrado adecuado deben ser empleados. Hay una recomendación de que las instalaciones deben ser definidas en el protocolo para el uso de algoritmos criptográficos como una alternativa en localidades diferentes que puede sustituir a los algoritmos obsoletos.
- » La integridad de los mensajes debe ser facilitada para garantizar tanto la exactitud de los datos entregados, como que estos no hayan sido alterados sin autorización.

Es importante evaluar la fiabilidad de las entidades participantes, ya que la confianza es la principal fuerza motriz para la colaboración en la seguridad de la radio cognitiva.

IX. Aplicaciones de radio cognitiva

Existen muchas oportunidades en el ámbito comercial para operar nuevos regímenes de administración del espectro, brindar así varios servicios inalámbricos y mejorar los actuales sistemas de radio, al acceder a más frecuencias. Por ejemplo, se puede disponer del recurso radioeléctrico en una puesta en común o pool para una redistribución adecuada. CR tiene el potencial para realizar ofertas y acceder al *pool* [49].

Uso militar. La mayoría de los sistemas de comunicación de los ejércitos deben desplegarse en entornos desconocidos y hostiles, rápidamente, enfrentando problemas de interferencias, conectividad y variaciones impredecibles de éstas. CR puede ser una solución para este entorno, pues facilita la configuración autónoma de los equipos y garantiza la coexistencia, al utilizar frecuencias desocupadas.

Seguridad pública. Cuestiones como el despliegue rápido, disponibilidad inmediata y uso eficiente del espectro disponible, interoperabilidad entre sistemas (bomberos, paramédicos, policía), entre otros, son aplicables en esta área.

Emergencias. Cognitive Radio permitirá que las frecuencias no utilizadas se ocupen en la atención de emergencias, para facilitar la comunicación con los servicios de salud y ayuda implicados en la toma de decisiones para la salvaguarda de vidas.

Las organizaciones locales y regionales de los principales organismos que efectúan las operaciones de respuesta y socorro en el país (cuerpo de bomberos, defensa civil cruz roja) utilizan sistemas de radiocomunicaciones en los modos de operación simplex y semiduplex, mediante equipos fijos, móviles y portátiles, para desplegar sus actividades de ayuda y coordinación conjuntas. La figura 7 muestra un diagrama esquemático general de un sistema de radiocomunicaciones que define su operación.

Dadas las características de reconfiguración dinámica de los parámetros de operación, CR puede dar soporte a determinadas capacidades técnicas que son cruciales al momento de presentarse una emergencia. Estas capacidades listadas a continuación, son factibles, en gran parte, gracias a la habilidad de adaptación mediante software sobre cualquier plataforma de hardware:

- » Operabilidad
- » Interoperabilidad

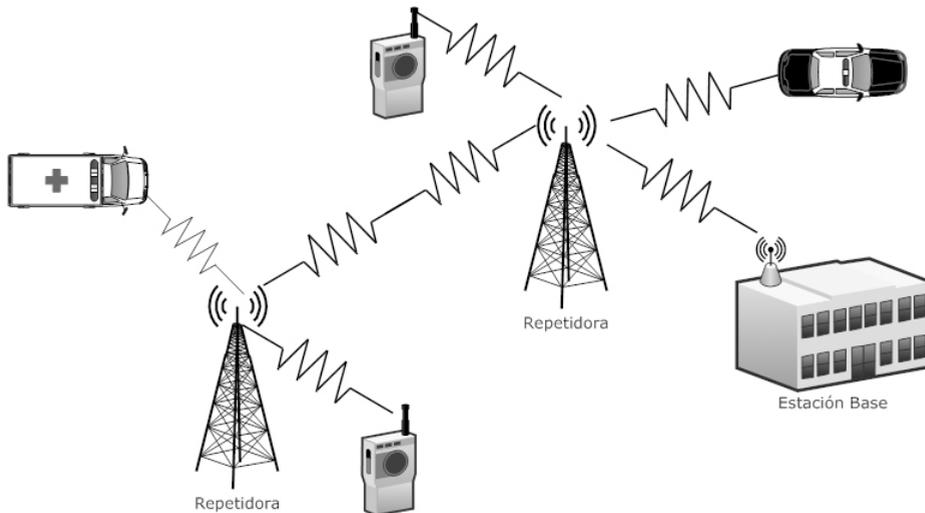


Figura 7. Esquema de un sistema de radiocomunicaciones

- » Fiabilidad
- » Flexibilidad
- » Redundancia
- » Escalabilidad
- » Seguridad
- » Eficiencia

Un sistema de radio para emergencias debe proporcionar comunicaciones seguras, sin fallas, y primordialmente accesibles en cualquier momento y lugar, con la máxima interoperabilidad y adaptación. Los sistemas con radio cognitiva constituyen una opción para alcanzar estas metas [50].

X. Implementacion de radio cognitiva

El primer dispositivo SDR que logró alcanzar un gran nivel de versatilidad fue la USRP (*Universal Software Radio Peripheral*), implementada en los Estados Unidos por la compañía Ettus Research [51]. Cuando se combina con el software de código abierto GNU Radio, se obtiene un sistema de software de radio completamente abierto que permite el procesamiento de señales basado en host en las plataformas de los productos básicos. El USRP es lo suficientemente flexible para dar cabida a otras opciones. Algunos usuarios han creado sus propios entornos de SDR para el USRP, mientras que otros han integrado el USRP en el LabView y Matlab/Simulink [52].

A partir de la USRP y del aplicativo GNU Radio se han derivado numerosas implementaciones, ya sea tomando como base la USRP para la realización de sistemas SDR, o siguiendo el ejemplo de la compañía Ettus Research de usar

FPGAs (*Field Programmable Gate Array*) para el procesamiento de señal requerido [51].

En la Universidad de Kansas, en 2007, se implementó otro prototipo de dispositivo SDR denominado KUAR (*Kansas University Agile Radio*). Este dispositivo, compatible también con el software GNU Radio, supera considerablemente a la USRP, pues puede funcionar en un amplio rango de frecuencias, al igual que la implementación de la compañía *Ettus Research*, sin necesidad de acoplar distintos Front-Ends de RF [53].

Los siguientes aspectos técnicos son necesarios para la operación de esta tecnología:

1. Garantizar que los dispositivos disponen de las suficientes características técnicas para evitar interferir con las señales de los usuarios primarios.
2. Garantizar técnicas de detección rápidas, adaptativas y fiables, de modo que se tenga un conocimiento en tiempo real de la ocupación espectral en un determinado entorno geográfico, para minimizar interferencias en los usuarios primarios.
3. Definir las bandas o sub-bandas de frecuencias en las que operarían las tecnologías de acceso al espectro basado en oportunidad, teniendo en cuenta la aplicación. Es fundamental que CR acceda a aquellas frecuencias desocupadas en determinadas bandas que deben definirse para un acceso dinámico. Este aspecto corresponde al ámbito regulatorio, a la administración del espectro.
4. Definir las características técnicas y modos de operación de los sistemas y equipos cognoscitivos [54].

XI. Retos en la investigación de radio cognitiva

Una de las características desafiantes del espacio en blanco es su variación a través del espacio y del tiempo. En concreto, los canales disponibles no son contiguos y varían de un lugar a otro. Además, el espacio en blanco disponible en un lugar determinado puede variar con el tiempo, si uno o más usuarios de la banda de TV, usuarios principales, deciden iniciar ó detener la operación. Esto requiere de una arquitectura con agilidad de asignación de frecuencia para destinar al espectro de espacio en blanco disponible. Los requisitos son más difíciles que en las redes FDD (división de frecuencia duplex), que necesitan dos canales separados para la operación. En particular, algunos de los problemas de radio frecuencia que es necesario resolver para las redes de FDD incluyen:

- » Ajuste independiente de emisor y receptor.
- » Proporcionar aislamiento de RF (en el orden de 50 dB) entre el transmisor y el receptor para el transmisor de frecuencia variable y el receptor.
- » El desarrollo de receptores altamente lineal en un amplio rango dinámico de manejar en la banda alta emisiones de televisión de potencia [54]. ST

Referencias bibliográficas

1. Unión Internacional de Telecomunicaciones “Reglamento de Radiocomunicaciones”. Vol. 1, Art. 5. 2008 pp. 37-176.
2. FCC, Spectrum Policy Task Force Report, ET Docket No. 02-155. Nov. 2002.
3. D. Cabric, S. M. Mishra, R. W. Brodersen, “Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios”, in : Proc. 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Nov. 2004, pp. 772-776.
4. A. Petrin, P.G. Steffes, “Measurement and Analysis of Urban Spectrum Usage”, in: Proc. Of the 2004 International Symposium on Advanced Radio Technologies NTIA Special Publication SP-04- 409, 2004, pp. 45-48. Presented at the 2004 International Symposium on Advanced Radio Technologies, Boulder, CO, March 3, 2004.
5. FCC, “Notice of Proposed Rulemaking (NPRM 03 322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum agile Radio Technologies” ET Docket No. 03 108, Dec. 2003.
6. FCC, ET Docket No. 03-108. Mar. 2005.
7. DARPA XG Working Group, “The XG Architectural Framework V1.0”, 2003.
8. DARPA XG Working Group, “The XG Vision RFC”, 2003.
9. C. Bergstorm, S. Chuprun, D. Torrieri, “Adaptative Spectrum Exploitation using Software Defined Radios”, IEEE Radio and Wireless Conference, pp. 113-116, 1999.
10. P. K. Lee, “Joint Frequency Hopping and Adaptative Spectrum Exploitation”, IEEE MILCOM, pp. 566-570, Vol. 11, 2001.
11. S. Haykin, “Cognitive Radio: brain-empowered wireless communications”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 23 (2), pp. 201-220, 2005.
12. <http://www.adapt4.com/adapt4-products.php>
13. Y. Yuan, et al. KNOWS: Kognitiv Networking Over White Spaces. En: Proceedings of 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2007), April 17-20 de 2007. p416-427.
14. J Mitola, “The Software Radio”, IEEE National Telesystems Conference, 1992 - Digital Object Identifier 10.1109/NTC.1992.267870.
15. J. Zhao, H. Zheng y G. Yang. Spectrum Sharing through Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Access Networks. En: Wiley Wireless Communications and Mobile Computing Journal, Vol.7, No.9, November 2007. p1061-1075.
16. Twain, K. (2002). WiproSDRadio.pdf. En línea, en BroadcastPapers.com, <http://www.broadcastpapers.com/whitepapers/WiproSDRadio.pdf>
17. <http://www.janes.com/articles/Janes-Military-Communications/AN-USC-61-Digital-Modular-Radio-DMR-United-States.html>
18. <http://www.eda.europa.eu/genericitem.aspx?area=28&id=588>
19. <http://gnuradio.org/redmine/wiki/gnuradio>
20. <http://www.ettus.com/download>
21. Telecommunications Law And Policy. Krattenmaker, Thomas G.
22. Joseph Mitola, III, “Cognitive Radio for Flexible Multimedia Communications”, Mobile Multimedia Communications, 1999. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop on, pp. 3 -10, 1999.
23. S. Haykin, “Cognitive Radio: brain-empowered wireless communications”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications

24. National Telecommunications and Information Administration, on FCC ET Docket No. 03-108: “Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies”, Feb. 2005.
25. IEEE USA, “Improving Spectrum Usage through Cognitive Radio Technology”, IEEE USA Position, Nov. 2003.
26. IEEE 1900.1 Group, Draft Document, “Standard Definitions and Concepts for Spectrum Management and Advanced Radio System Technologies”, Jun. 2006.
27. FCC, “Notice of Proposed Rulemaking (NPRM 03 322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum agile Radio Technologies” ET Docket No. 03 108, Dec. 2003.
28. J. Neel, R. Gilles, “The Role of the Game Theory in the Analysis of Software Radio Networks”, Proc. Software Defined radio Forum Technical Conference and Product Exhibition (SDR’02), vol. 2
29. Bin Le, W. Rondeau Thomas, “General Radio Interface Between Cognitive Algorithms and Reconfigurable Radio Platforms”, http://www.crtwireless.com/files/LeB_2.pdf
30. http://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Documents/cognitive_radio/fcc_cognitive_radio_fette_v8.ppt
31. IEEE 802.22 Working Group, “WRAN Reference Model”, Doc. Num. 22-04-0002-12-0000.
32. C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru, S. Shankar, “IEEE 802.22: the First Worldwide Wireless Standard Based on Cognitive Radios”, in Proc. IEEE DySPAN 2005, pp. 328-337, Nov. 2005.
33. ARSLAN, Hüseyin; “COGNITIVE RADIO, SOFTWARE DEFINED RADIO, AND ADAPTIVE WIRELESS SYSTEMS”. Editorial Springer. Dordrecht, Netherlands. 2007. (2). Wireless Innovation Forum (SDR Forum). <http://www.wirelessinnovation.org/>
34. www.sdrforum.org
35. ITU Z.100 Recs., “Specification and Description Language,” Geneva, Switzerland, 1991
36. J. Mitola, “Cognitive Radio,” Licentiate proposal, KTH, Stockholm, Sweden, Dec. 1998.
37. J. Bicket, D. Aguayo, S. Biswas, R. Morris, 2005, Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network, paper presented at the MobiCom 2005 Conference, Cologne, August
38. R. W. Brodersen et al., “CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum,” White Paper, Berkeley Wireless Research Center, 2004
39. www.adapt4.com/
40. R. W. Brodersen et al., “CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum,” White Paper, Berkeley Wireless Research Center, 2004
41. www.sportviews.org/UserFiles/File/.../E2RII_SPORTVIEWS_Brussels.ppt.pdf
42. <http://www.sharedspectrum.com/resources/darpa-next-generation-communications-program/>
43. <http://xg.csl.sri.com/>
44. KNOWS (Kognitiv Networking Over White Spaces)
45. <http://ieeexplore.iee.org/Xplore/login.jsp?url=/stamp/stamp.jsp?arnumber=01273768>
46. Kuroda Masahiro, Ishizu Kentaro, “A Study of Radio-Information Services for Networks of Cognitive Radios”, http://www.winlab.rutgers.edu/~wenyuan/sdr07/papers/Kuroda_SDR.pdf
47. Kuroda Masahiro, Ishizu Kentaro, “A Study of Radio-Information Services for Networks of Cognitive Radios”, http://www.winlab.rutgers.edu/~wenyuan/sdr07/papers/Kuroda_SDR.pdf

48. Kuroda Masahiro, Ishizu Kentaro, "A Study of Radio-Information Services for Networks of Cognitive Radios", http://www.winlab.rutgers.edu/~wenyuan/sdr07/papers/Kuroda_SDR.pdf
49. Cognitive Radio Networks Interference Cancellation and Management Techniques
50. Ofcom. (2006 Apr.). A study into the application of interference cancellation techniques [Online]. Rep. 72/06/R/037/U. Available: http://www.ofcom.org.uk/research/technology/research/emer_tech/intcx/summary.pdf
51. IEEE Spectrum_ Radios With Micromachined Resonators
52. Minden, G.J.; Evans, J.B.; Searl, L.S.; DePardo, D.; Rajbanshi, R.; Guffey, J.; Qi Chen; Newman, T.R.; Petty, V.R.; Weidling, F.; Peck, M.; Cordill, B.; Datla, D.; Barker, B.; Agah, A.; "An Agile Radio for Wireless Innovation", IEEE Communications Magazine, Vol. 45.
53. http://www.ettus.com/downloads/ettus_ds_usrp_v7.pdf
54. Tools & Toys: Hardware for your Software Radio.
55. Minden, G.J.; Evans, J.B.; Searl, L.S.; DePardo, D.; Rajbanshi, R.; Guffey, J.; Qi Chen; Newman, T.R.; Petty, V.R.; Weidling, F.; Peck, M.; Cordill, B.; Datla, D.; Barker, B.; Agah, A.; "An Agile Radio for Wireless Innovation", IEEE Communications Magazine, Vol. 45.

.....

Currículum vitae

Julio Héctor Aguilar Rentería

Ingeniero Telemático de la Universidad Católica de Manizales (Colombia) en 2005, con especialización en Redes y Comunicaciones de la universidad Icesi (Cali, Colombia) en 2008. Actualmente se desempeña como profesor en la cátedra de Laboratorio de redes y como investigador del Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones i2T de la Universidad Icesi. Su experiencia por fuera de la academia es primordialmente en temas de telecomunicaciones, con énfasis en redes. Sus otras áreas de interés son la investigación científica y la radio cognitiva.

Andrés Navarro Cadavid

Ingeniero Electrónico 1993 y Magister en Gestión de la Tecnología en 1999, ambos grados obtenidos en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín (Colombia).
 Obtuvo el grado de Doctor Ingeniero en Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Valencia (España) en el 2003. Actualmente es profesor titular en la Universidad Icesi (Cali, Colombia) y líder del Grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones (i2T), de la misma universidad. Entre sus áreas de interés están los sistemas inalámbricos, su planificación y optimización, y los modelos de propagación aplicables a la región Andina.