

EVALUACIÓN DEL NIVEL DE UTILIZACIÓN DEL ESPECTRO: POSIBILIDADES DE LA TECNOLOGÍA COGNITIVE RADIO EN ESPAÑA

Miguel López Benítez, Fernando Casadevall y Anna Umbert

[miguel.lopez, ferranc, annau]@tsc.upc.edu

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona).

Abstract- Cognitive radio has been identified as a promising solution to the so-called spectrum scarcity problem. The basic idea of this paradigm is to allow unlicensed users to access in an opportunistic and non-interfering manner some licensed bands temporarily unoccupied by licensed users. Cognitive radio is expected to dramatically improve the efficiency of spectrum usage. However, before this paradigm can turn into reality, a full understanding of the spectrum dynamic usage in real wireless communications systems is required. Current spectrum utilization has already been evaluated in some measurement campaigns all over the world. However, to the best of the authors' knowledge, no previous study has assessed the spectrum occupancy and the feasibility of the cognitive radio technology in different allocated spectrum bands under Spanish regulations. In this context, this paper presents a pioneer spectrum occupancy measurement in Spain conducted in the frequency range from 75 MHz to 7075 MHz in an outdoor environment in urban Barcelona. The measurements are analyzed and compared to the official spectrum regulations. The obtained results demonstrate the existence of a significant amount of spectrum available for the deployment of future cognitive radio networks.

I. INTRODUCCIÓN

La tecnología *Cognitive Radio* (CR) ha surgido durante los últimos años como una prometedora solución a los conflictos actualmente existentes entre el incremento de la demanda de espectro y su bajo nivel de utilización real [1]. El principio de operación básico de la tecnología CR consiste en permitir que usuarios sin licencia (usuarios secundarios) puedan acceder temporalmente y de manera oportunista a ciertas bandas asignadas que se encuentren sometidas a un bajo nivel de uso, siempre y cuando se garantice que el nivel de interferencia generado sobre los usuarios legítimos de dichas bandas (usuarios primarios) no supera ciertos niveles considerados como aceptables. Este innovador paradigma promete significativas mejoras en la eficiencia del uso del espectro radioeléctrico. Sin embargo, antes de investigar los aspectos técnicos de este tipo de sistemas de comunicaciones radio, resulta necesario conocer y comprender los patrones de uso de diferentes bandas bajo diversos escenarios. Un estudio apropiado del nivel de ocupación espectral permitirá, así pues, una adecuada caracterización del uso de los recursos radioeléctricos en los dominios frecuencial, temporal y espacial, así como la identificación de aquellas bandas que en principio podrían resultar más interesantes y convenientes para el futuro despliegue de la tecnología CR. La medición de la actividad de redes reales constituye, por lo tanto, un importante paso en el desarrollo práctico de la tecnología CR.

Hasta la fecha se han realizado algunas campañas de medidas con el objetivo de determinar el nivel de utilización real

del espectro y analizar la viabilidad de la tecnología CR en diversas bandas asignadas [2]–[5]. Aunque dichos estudios representan una valiosa fuente de información, es importante tener en cuenta que, a fin de posibilitar un despliegue a gran escala, el desarrollo de la tecnología CR no puede basarse en las conclusiones obtenidas a partir de los estudios llevados a cabo en unas pocas localizaciones geográficas, bajo un número limitado de regulaciones espectrales. El desarrollo de la tecnología CR, en cambio, debe tener en cuenta la posibilidad de operar bajo diferentes regulaciones y en una amplia variedad de escenarios y circunstancias.

En este contexto, el Grupo de Comunicaciones Radio de la Universidad Politécnica de Cataluña actualmente está llevando a cabo una ambiciosa campaña de medidas espectrales, cubriendo el rango de frecuencias desde 75 hasta 7075 MHz en escenarios tanto interiores como exteriores y en diversas localizaciones urbanas, sub-urbanas y rurales de Barcelona y alrededores. Según nuestra información, esta campaña de medidas constituye una iniciativa pionera en el contexto de la tecnología CR dentro del ámbito geográfico abarcado por la regulación establecida en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [6]. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos en un escenario urbano exterior en Barcelona. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la existencia de una significativa cantidad de espectro disponible para el futuro despliegue de redes CR.

El resto del presente trabajo se estructura tal y como se detalla a continuación. En primer lugar, la sección II describe el equipo de medida utilizado en este estudio, su configuración y la metodología de medida empleada. A continuación, la sección III presenta y analiza los resultados obtenidos. Por último, la sección IV resume las principales conclusiones derivadas del estudio llevado a cabo en este trabajo.

II. EQUIPO DE MEDIDA Y METODOLOGÍA

La figura 1 muestra el esquema del equipo de medida empleado. El diseño se compone de dos antenas de banda ancha, un conmutador, diversos filtros, un pre-amplificador de bajo ruido y un analizador espectral de altas prestaciones (Anritsu Spectrum Master MS2721B). Las antenas empleadas son dos antenas de banda ancha tipo disco (polarización vertical con diagrama de recepción omni-direccional en el plano horizontal) modelos AOR DN753 (usada en 75-3000 MHz) y JTXXPZ-100800-P (usada en 3000-7075 MHz), conectadas a un conmutador a través del cual se selecciona el rango de frecuencias deseado. Los filtros paso-bajo y paso-alto se utilizan para eliminar señales fuera de banda. Adicionalmente, se usa

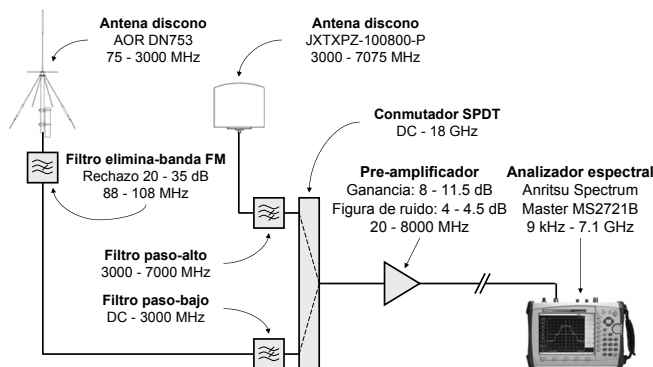


Fig. 1. Equipo de medida empleado.

un filtro elimina-banda a fin de atenuar señales procedentes de estaciones de radio FM y evitar así posibles problemas de saturación. Para compensar las pérdidas introducidas por los diversos componentes y cables e incrementar la sensibilidad de la configuración de medida, se incluye un preamplificador de bajo ruido cerca de las antenas. El amplificador seleccionado (de ganancia intermedia) proporciona una notable mejora de sensibilidad al mismo tiempo que satisface el requerido margen dinámico libre de espúreos (*Spurious-Free Dynamic Range*, SFDR), de 73 dB en nuestro caso.

Para la realización de medidas, el sistema de antena se colocó en el tejado del edificio del departamento (latitud: 41° 23' 20" N; longitud: 2° 6' 43" E; altitud: 175 metros). El emplazamiento seleccionado es una posición estratégica con línea de visión directa a diferentes estaciones transmisoras ubicadas a unos pocos cientos de metros y sin edificios bloqueando la propagación radio. Esta posición estratégica permitió medir con gran precisión la actividad espectral de estaciones de difusión de TV y FM, estaciones base de sistemas de telefonía móvil celular y de un cuartel militar cercano entre otros, así como varias transmisiones aeronáuticas y marítimas, dada la relativa proximidad del puerto y el aeropuerto.

Los principales parámetros de configuración del analizador espectral se muestran en la tabla 1. El rango de medida considerado (75-7075 MHz) fue dividido en 25 bloques, sin fragmentar las bandas contempladas en el CNAF y teniendo en cuenta el ancho de las señales transmitidas en cada banda. Así, mientras la separación espectral entre dos frecuencias de medida consecutivas para señales GSM (canalización de 200 kHz) fue de 81.8 kHz, el valor considerado para dicho parámetro a la hora de medir señales de TV (canalización de 8 MHz) y de UMTS (canalización de 5 MHz) fue de 745.5 kHz y 727.3 kHz respectivamente. Cada uno de estos 25 bloques se midió durante un periodo continuado de 24 horas. Las trazas capturadas fueron guardadas en un dispositivo externo de almacenamiento para su posterior post-procesado. Para más detalles acerca del equipo empleado y la metodología seguida en este trabajo, el lector puede consultar la referencia [7].

III. RESULTADOS

A. Métricas de Ocupación

El nivel de ocupación de diferentes bandas espectrales se ha evaluado en este trabajo mediante tres métricas diferentes, las cuales se ilustran en las figuras descritas en la sección III.B. La primera métrica considerada es la Densidad Espectral de Potencia (DEP), la cual se muestra en la gráfica supe-

Parámetro	Valor
Rango de frecuencia	75 – 7075 MHz
Ancho de bloque / bin	Variable (45-600MHz / 81.8-1090.9kHz)
Ancho de banda resolución/video (RBW/VBW)	10 kHz / 10 kHz
Tiempo de barrido	Automático
Nivel de referencia	-20 dBm
Escala	10 dB/división
Tipo de detección	Detector promedio (RMS)

Tabla 1. Configuración del analizador espectral

rior de cada figura (máximo, mínimo y promedio). La gráfica intermedia muestra la evolución temporal instantánea de la ocupación espectral. Los puntos negros simbolizan muestras de DEP correspondientes a canales ocupados. Análogamente, el color blanco representa muestras de DEP correspondientes a canales libres y, por lo tanto, oportunidades de transmisión para una red CR. Para determinar si un canal está libre u ocupado, existen diferentes métodos de detección (*spectrum sensing*) [8]. Siguiendo los mismos principios que en [7], en este trabajo se considera el método basado en detección de energía, según el cual las muestras de DEP proporcionadas por el analizador espectral se comparan con cierto umbral de decisión. Si el valor de DEP es superior al umbral, se considera que la muestra corresponde a un canal ocupado o, en caso contrario, a un canal libre. El umbral de decisión para cada frecuencia se estableció según el criterio de probabilidad de falsa alarma del 1%, siguiendo el método descrito en [7]. A fin de cuantificar el nivel de ocupación de cada banda de manera más precisa, la tercera métrica de ocupación considerada en este trabajo (mostrada en la gráfica inferior de cada figura) es el ciclo de trabajo (*duty cycle*). Para cada frecuencia medida, el ciclo de trabajo se calcula como el cociente entre el número de muestras de DEP correspondientes a canales ocupados y el número total de muestras de DEP capturadas durante el periodo de medida. Para cada frecuencia, esta métrica representa la fracción de tiempo durante la cual el canal permanece ocupado por la red primaria. Para una determinada banda, el ciclo de trabajo promedio se calcula como la media aritmética de los ciclos de trabajo obtenidos para las diversas frecuencias medidas dentro de dicha banda.

B. Análisis de la Ocupación Espectral

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2, 3 y 4. Tal y como se puede apreciar, el espectro experimenta un nivel de utilización relativamente moderado por debajo de 1 GHz y bajo entre 1 y 2 GHz, mientras que permanece prácticamente infrautilizado entre 2 y 7 GHz (con algunas claras excepciones que se discuten más adelante). De hecho, mientras que el ciclo de trabajo promedio entre 75 y 2000 MHz es del 31.02%, el valor de este parámetro entre 2000 y 7075 MHz es de sólo 2.75%, tal y como se muestra en la tabla 2. El ciclo de trabajo promedio en el rango de frecuencia total considerado en este trabajo es del 17.78%, lo cual revela la existencia de una significativa cantidad de espectro no utilizado que podría ser potencialmente explotado por una red CR. Aunque estos resultados indican claramente un bajo nivel de utilización espectral, no proporcionan una idea clara del uso del espectro en diferentes bandas asignadas a diversos servicios específicos. Así pues, a continuación se discute en mayor detalle el uso del espectro radioeléctrico en varias bandas de interés.

Rango de frecuencia (MHz)	Ciclo de trabajo promedio		
75 – 1000	42.00 %	31.02 %	17.78 %
1000 – 2000	13.30 %		
2000 – 3000	3.73 %		
3000 – 4000	4.01 %		
4000 – 5000	1.63 %		
5000 – 6000	1.98 %		
6000 – 7075	1.78 %	2.75 %	

Tabla 2. Estadísticas de ocupación espectral promedio.

Aunque la mayor ocupación espectral se observa por debajo de 1 GHz, en este rango de frecuencias todavía resulta posible encontrar diversas oportunidades para redes CR, incluso en aquellas bandas con las mayores tasas de ocupación. Por ejemplo, la banda de TV (470-862 MHz) muestra un nivel de ocupación del 82.08%, uno de los mayores valores observados en este estudio. No obstante, este valor indica que aproximadamente la quinta parte de la banda (unos 70 MHz) puede considerarse como desocupada debido a la débil recepción de varios canales provenientes estaciones de TV lejanas. Por lo tanto, a pesar de la alta ocupación observada en esta banda, resulta posible identificar la existencia de interesantes oportunidades para un uso secundario del espectro.

Otro ejemplo interesante por debajo de 1 GHz es el observado en las bandas asignadas al sistema GSM, el cual opera en las bandas 880-915 MHz (enlace ascendente) y 925-960 MHz (enlace descendente). El enlace ascendente aparece como un potencial candidato para aplicaciones CR con una ocupación promedio del 6.26%. No obstante, es importante subrayar que este resultado debe considerarse con cautela ya que, tal y como se muestra en la figura 2, el valor máximo de DEP revela la presencia de señales primarias en el enlace ascendente. El considerable nivel de actividad observado en el enlace descendente (96.33%) y el hecho de que GSM es un sistema simétrico basado en duplexado en frecuencia (FDD) sugieren que el nivel de ocupación real del enlace ascendente podría ser mayor que el capturado por nuestro sistema en la ubicación considerada. Los diferentes patrones de ocupación observados en ambos casos podrían explicarse por la mayor potencia de transmisión y la existencia de visibilidad directa en el caso del enlace descendente, lo cual implica una mayor posibilidad de detección con respecto al enlace ascendente, donde la potencia de transmisión es menor y la visibilidad directa con las antenas de medida resulta más difícil. Así pues, de los resultados mostrados en la figura 2 no es posible concluir un bajo nivel de ocupación del enlace ascendente de GSM. En cualquier caso, es interesante señalar la apreciación de tendencias similares en otros estudios previos (p. ej. [5]).

En las bandas espectrales más bajas operan una gran variedad de sistemas de canalización estrecha tales como sistemas PMR, difusión de audio FM y DAB, radionavegación aeronáutica, sistemas marítimos (GMDSS), de radio búsqueda (ERMES), satélite y radioaficionados. En estas bandas se observan niveles de ocupación bajos/moderados. Por ejemplo, en las bandas 75-235 MHz, 235-400 MHz y 400-470 MHz, los niveles de ocupación promedio son del 48.59%, 24.88% y 29.85% respectivamente. No obstante, los anchos de banda disponibles en estas bandas son considerablemente bajos debido a la canalización de los sistemas que en ellas operan. Además, la banda 235-400 MHz se halla exclusivamente reservada para usos del Ministerio de Defensa, lo cual, en principio, impide un uso secundario de dicha banda.

Por encima de 1 GHz, el mayor nivel de actividad espectral se observa para los sistemas de telefonía móvil celular DCS (1710-1785 y 1805-1880 MHz) y UMTS (1920-1980 y 2110-2170 MHz), y para sistemas de acceso radio de banda ancha (*Broadband Wireless Access*, BWA) operando en la banda 3.4-3.6 GHz (concretamente entre 3.52 y 3.56 GHz).

Resulta interesante apreciar cómo las diferencias entre los patrones de ocupación de los enlaces ascendente y descendente de GSM también se observan para DCS y UMTS. En este caso, los niveles de ocupación observados en los enlaces descendentes (58.82% para DCS y 56.93% para UMTS) indican la existencia de oportunidades para una red CR. En DCS se observa claramente una menor actividad espectral durante las horas nocturnas. En UMTS se observan varios canales completamente libres. Además, las bandas reservadas a UMTS para las componentes TDD (1900-1920 y 2010-2025 MHz), de satélite (1980-2010 y 2170-2200 MHz) y extensión (2500-2690 MHz) se encuentran también libres.

Aunque algunas bandas adicionales muestran cierta actividad, la mayor parte del espectro por encima de 1 GHz se encuentra prácticamente disponible para futuras redes CR.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la existencia de una significativa cantidad de espectro potencialmente disponible para futuras aplicaciones CR. Concretamente, el nivel de ocupación promedio obtenido en un entorno urbano exterior entre 75 y 7075 MHz es del 17.78%. En general, el espectro experimenta un nivel de utilización relativamente moderado por debajo de 1 GHz y bajo entre 1 y 2 GHz, mientras que permanece prácticamente infrutilizado entre 2 y 7 GHz. La mayor parte del espectro ofrece interesantes posibilidades para aplicaciones CR, incluso en varias bandas sujetas a elevados niveles de ocupación espectral.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto COGNOS (Ref. TEC2007-60985) y el programa de Becas FPU (Ref. AP2006-848). Los autores desean expresar su gratitud a Susana Molina Corbacho y Ramsès García Calafi por su valiosa colaboración en la campaña de medidas realizada.

REFERENCIAS

- [1] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, n° 4, Abr. 2008.
- [2] Shared Spectrum Company, "Spectrum occupancy measurements," Shared Spectrum Company reports, Ene. 2004 – Ago. 2005. Disponible en: <http://www.sharedspectrum.com/measurements/>.
- [3] R. I. C. Chiang, G. B. Rowe, K. W. Sowerby, "A quantitative analysis of spectral occupancy measurements for cognitive radio," 65th Vehicular Technology Conference (VTC 2007-Spring), Abr. 2007.
- [4] M. Wellens, J. Wu, P. Mähönen, "Evaluation of spectrum occupancy in indoor and outdoor scenario in the context of cognitive radio," Second International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrowCom 2007), Ago. 2007.
- [5] M. H. Islam y cols., "Spectrum survey in Singapore: Occupancy measurements and analyses," 3rd Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Comms (CrownCom 2008), May. 2008.
- [6] SETSI, "Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias", Nov. 2007.
- [7] M. López-Benítez, F. Casadevall, "Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio", 15th European Wireless Conference (EW 2009), May. 2009.
- [8] A. Sahai, N. Hoven, R. Tandra, "Some fundamental limits on cognitive radio," Forty-second Allerton Conference on Communications, Control, and Computing (Allerton Conference 2004), Sep. 2004.

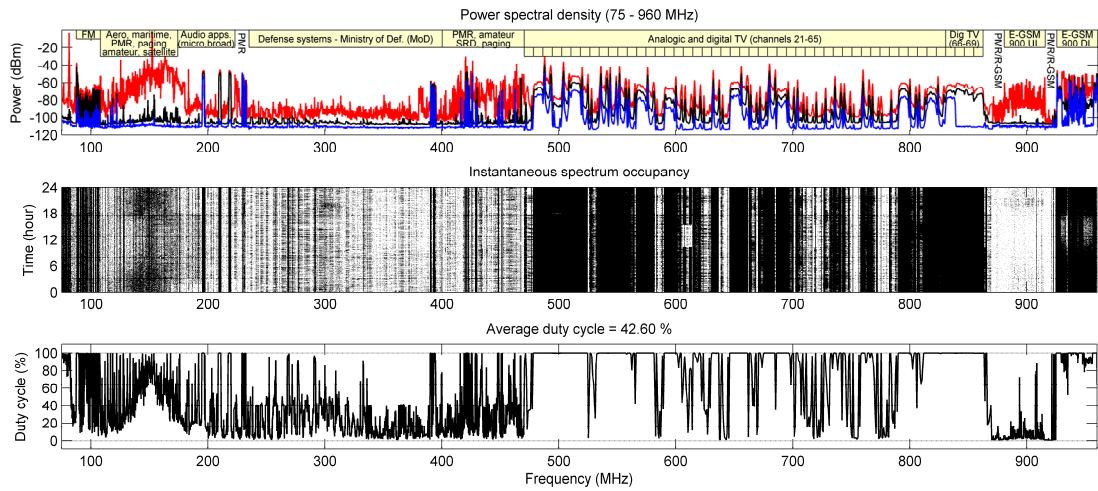


Fig. 2. Ocupación espectral entre 75 y 960 MHz.

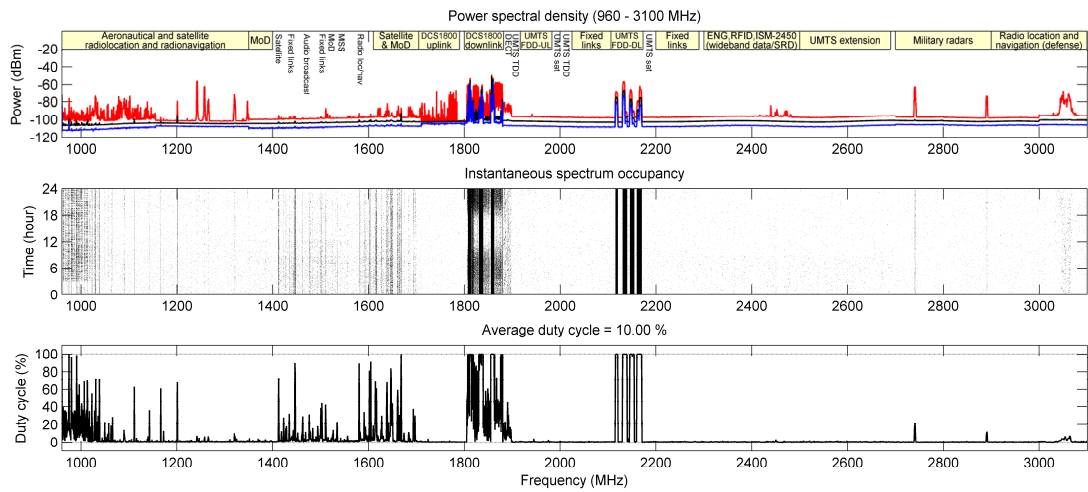


Fig. 3. Ocupación espectral entre 960 y 3100 MHz.

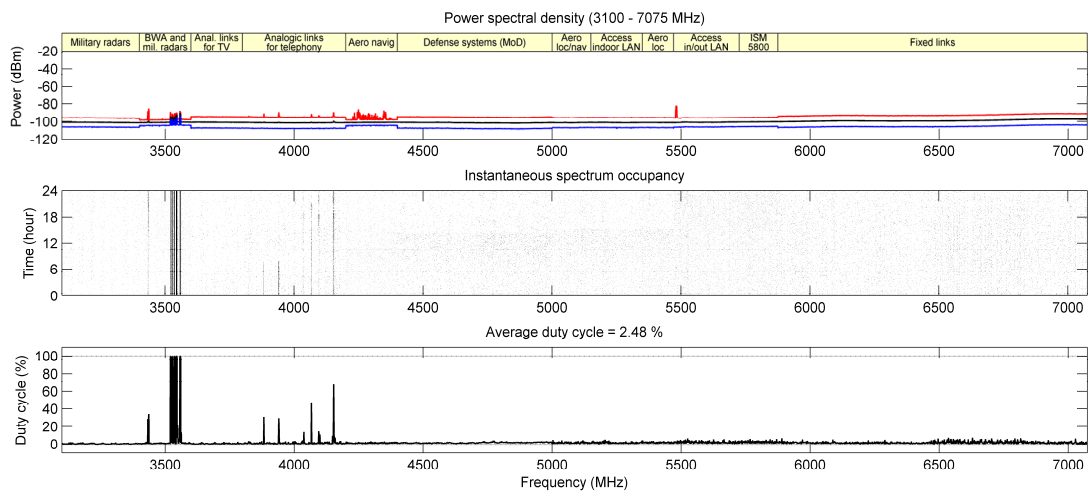


Fig. 4. Ocupación espectral entre 3100 y 7075 MHz.