

Spectrum Sensing for Vehicular Dynamic Spectrum Access

Adriana Arteaga
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile
aarteaga@ing.uchile.cl

Sandra Céspedes
Departamento de Ingeniería Eléctrica
NIC Chile Research Labs
Universidad de Chile
scspedes@ing.uchile.cl

César Azurdia
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile
cazurdia@ing.uchile.cl

Abstract

In this paper, we discuss spectrum sensing for vehicular dynamic spectrum access (VDSA). In particular, three spectrum detection techniques that can be used in vehicular communications are presented, and the energy detection technique is analyzed according to detection probability, false alarm probability, and missing detection probability in an AWGN channel. Evaluation results show that for a low false alarm probability value, which prevents detection errors when a primary user is transmitting, the threshold for energy detection should be high, affecting detection probability. When the channel deteriorates with a low Signal-to-Noise Ratio (SNR), the threshold should be lowered to increase detection probability and protect primary users, even if it means denying access to secondary users. If channel conditions improve, the threshold may ascend, allowing access to secondary users again.

1. Introducción

El surgimiento de las comunicaciones vehiculares y los Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS por su sigla en inglés) muestra que la conectividad de dispositivos llega a escenarios distintos a las redes de comunicaciones convencionales. Las aplicaciones vehiculares

pueden clasificarse según tres propósitos: seguridad activa en ruta; eficiencia cooperativa de tráfico; información y entretenimiento (*Infotainment*) [Ham14]. Cada tipo de aplicación tiene requerimientos de latencia, cobertura y tasa de transmisión diferentes, pero todas deben estar funcionando en vehículos que se desplazan a baja, mediana o alta velocidad, lo cual impacta su desempeño. Es por esto que los organismos de regulación y estandarización de comunicaciones como la *International Telecommunication Union* (ITU) e IEEE están trabajando en la asignación de espectro radioeléctrico (ERE) y en la definición de las tecnologías para comunicaciones vehiculares, principalmente en frecuencias por encima de 3 GHz, en donde las altas tasas de transferencia y el corto alcance son favorables para unas aplicaciones y perjudiciales para otras. Por otro lado, las bandas por debajo de 3 GHz permiten coberturas más amplias a tasas de datos menores, por lo que resulta interesante conocer la disponibilidad de frecuencias en estas bandas, que en su mayoría están asignadas a algún operador, y usarlas también para satisfacer los requerimientos de las aplicaciones de ITS.

Informes de utilización de ERE en algunos países reportan alta ocupación en las bandas atribuidas al servicio celular y a comunicaciones sin licencia [Pat11], mientras que se observa baja ocupación en las frecuencias atribuidas al servicio de televisión (470 MHz-698 MHz) [Han10]. Las características de este servicio y el despliegue de su red causan que en algunas zonas no haya cobertura de manera temporal o permanente, lo que permitiría a otros servicios usar los canales disponibles condicionados a no ocasionar interferencias perjudiciales a los titulares del servicio. La búsqueda y utilización de ERE disponible de forma oportunista se conoce como *Dynamic Spectrum Access (DSA)*, y reúne técnicas de detección de ERE disponible y asig-

nación de canales teniendo en cuenta la protección de los servicios primarios [Song12]. El acceso oportunista conforma un mecanismo adicional para proveer resiliencia a los servicios ofrecidos en la red vehicular. Algunas aplicaciones pueden utilizar este mecanismo para el envío de información duplicada sobre otras bandas, como una manera de proveer redundancia en la red, o pueden seleccionar el acceso primario para el envío de información prioritaria y el acceso secundario para el envío de otro tipo de información menos prioritaria.

DSA en comunicaciones vehiculares se conoce como *Vehicular Dynamic Spectrum Access (VDSA)* [Chen12], de manera que la búsqueda y asignación de canales disponibles tenga en cuenta los requerimientos de las aplicaciones en condiciones de alta movilidad, dejando de lado el supuesto del ancho de banda garantizado en todo momento. La estimación del ERE disponible involucra el uso de técnicas para detectar un canal y decidir si está ocupado o disponible, mientras que el acceso al canal se define mediante mecanismos para decidir la asignación del canal cuando dos o más usuarios secundarios requieren el medio; ambos procesos se pueden ejecutar de manera independiente, usando dispositivos cognitivos que estén en el vehículo o en la infraestructura [Fcc05].

Este trabajo está centrado en la revisión de tres técnicas de detección de ERE que pueden ser utilizadas en VDSA: detección de energía, análisis cicloestacionario y detección basada en la forma de onda, y el análisis de desempeño de la detección de energía cuando hay variaciones de la relación señal a ruido (SNR) en un canal con ruido aditivo blanco gaussiano (AWGN). Las métricas usadas para la evaluación son probabilidad de detección P_d , probabilidad de falsa alarma P_f , y probabilidad de *missing detection* P_{md} , las cuales reflejan el comportamiento de la técnica para evitar decisiones equivocadas sobre la disponibilidad de un canal, impidiendo una interferencia perjudicial a los usuarios primarios.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. En la Sección 2 se describen los aspectos de las comunicaciones vehiculares a tener en cuenta en la búsqueda dinámica de ERE y las técnicas que pueden ser utilizadas. La Sección 3 contiene la descripción de las métricas para analizar el desempeño de la técnica de detección de energía, así como la metodología usada para el análisis. En la Sección 4 se analizan los resultados obtenidos del análisis de desempeño. En la Sección 5 se presentan las conclusiones y algunos temas abiertos de investigación.

2. Estado del arte

2.1. Comunicaciones vehiculares y uso de ERE

Las comunicaciones vehiculares están siendo abordadas desde distintas perspectivas. Desde el punto de

vista de las aplicaciones existen propuestas para aumentar la seguridad de conductores y reducir accidentes; gestionar de manera eficiente el tráfico; y brindar información y entretenimiento a los pasajeros. Los requerimientos en latencia, retardo, cobertura y tasa de transmisión son diferentes para cada tipo de aplicación, como se muestra en la Tabla 1 [Ham14].

Tabla 1: Requerimientos de aplicaciones vehiculares

Aplicación	Requerimientos técnicos
Seguridad activa	Latencia baja < 100 ms Cobertura < 300 m Tasa de transmisión < 10 kbps
Eficiencia de tráfico cooperativo	Latencia media < 200 ms Cobertura < 300 m Tasa de transmisión < 100 kbps
Información y entretenimiento (<i>Infotainment</i>)	Latencia alta < 500 ms Cobertura variable y tasa de transmisión dependiente del contenido

Uno de los supuestos usados para diseñar las aplicaciones es la disponibilidad y estabilidad del medio de transmisión, es decir, que el sistema de comunicación cuenta con un canal libre de interferencia y con un ancho de banda garantizado a lo largo del camino. Respecto a las frecuencias permitidas para comunicaciones vehiculares, en la banda de IMS 5.9 GHz se sitúan las *Dedicated Short-Range Communications (DSRC)*, un tipo de comunicación inalámbrica de corto alcance orientada a vehículos. Adicionalmente, la banda de frecuencias en 60 GHz (*Millimeter Wave*) también puede ser usada para el funcionamiento de radares para evitar colisiones y para aplicaciones de ITS. La ventaja de esta banda es que el ancho de banda por canal puede ser de 2.5 GHz en la banda 59-66 GHz. Estas frecuencias son apropiadas para transmisiones de corto alcance, por lo que serán muy usadas en comunicaciones vehículo-a-vehículo (V2V) con la ventaja de altas tasas de transferencia. Sin embargo, al ser bandas sin licencia deberán ser compartidas con usuarios demandantes en ancho de banda como los de WLAN en la banda 5.9 GHz, por lo que el acceso a estas frecuencias será altamente competido. Por otro lado, para que puedan ser usadas en comunicaciones vehículo-a-infraestructura (V2I) se requerirá que el vehículo esté cerca de las estaciones base en carretera (RSU por su sigla en inglés) durante un período de tiempo considerable para tener una comunicación adecuada. Para tener una cobertura más amplia se podrían utilizar las frecuencias disponibles o subutilizadas en el servicio de televisión, de acuerdo a lo definido en el estándar IEEE 802.22 y otros documentos técnicos [Ecc15]. Los dispositivos secundarios interesados en utilizar estos canales se deben asegurar de que el canal está disponible antes de transmitir y liberar el recurso cuando un usuario primario lo requiera, mediante la ejecución de una técnica de detección de ERE.

2.2. Técnicas de detección

La técnica a utilizar depende del conocimiento de las posibles señales presentes en el canal y sus parámetros (modulación, formato del paquete, forma del pulso, etc.). Entre más información haya sobre las señales primarias, mayor será la confiabilidad de la detección. De las técnicas mencionadas para DSA [Yuc09] se escogieron tres al ser las que con más frecuencia se usan en detección oportunista de ERE: detección de energía (baja complejidad y baja precisión), análisis cicloestacionario (alta complejidad y mediana precisión) y detección basada en forma de onda (mediana complejidad y alta precisión). La complejidad de la técnica se expresa en términos del conocimiento previo de las señales primarias, el procesamiento de la señal recibida y la cantidad de receptores requeridos. Las técnicas de detección propuestas son válidas para ser usadas en entornos vehiculares porque toman decisiones basadas en lo detectado en el canal, sin embargo requieren algunas modificaciones para afrontar el *multipath* y el efecto Doppler presente en las comunicaciones vehiculares.

2.2.1. Detección de Energía

Es la técnica más utilizada para estimar disponibilidad de ERE porque el receptor no requiere conocimiento previo de las posibles señales en el canal y por su baja complejidad de implementación [Adu12], [Li10], [Lac09]. La presencia de una señal se detecta comparando la energía en el canal con un umbral λ_E dB, que en su definición más sencilla depende del piso de ruido. Si la energía en el canal sobrepasa λ_E significa que un usuario lo está usando; de lo contrario el canal está disponible y puede ser utilizado por un usuario secundario.

Si $y(n)$ es la señal recibida, su energía es equivalente a:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N |y(n)|^2 \quad (1)$$

donde N es la cantidad de muestras de la señal. La definición del umbral es un aspecto importante para que la detección sea efectiva en condiciones de SNR baja. Algunas versiones mejoradas de esta técnica incluyen detección cooperativa y definición de dos o tres umbrales, para combinar los resultados e incrementar la precisión [Hu14]. Otras aproximaciones proponen el uso de un umbral dinámico en lugar de estático, definido a partir del comportamiento de señales primarias conocidas [Leh05].

2.2.2. Análisis Cicloestacionario

Este método está basado las características cicloestacionarias de la señal recibida, las cuales se representan por el comportamiento periódico con periodo T_0 de su media $M_x(t)$ y su función de autocorrelación $R_x(t, \tau)$ [Yuc09], [Oner04].

$$M_x(t) = M_x(t + T_0) \quad (2)$$

$$R_x(t, \tau) = R_x(t + T_0, \tau + T_0) \quad (3)$$

Esta técnica puede diferenciar entre el ruido y una señal primaria porque el ruido es un proceso aleatorio y su autocorrelación no es periódica. El detector calcula la autocorrelación de la señal recibida y la compara con un valor λ_C conocido, el cual puede ser la frecuencia cíclica de la señal [Kim07]. En este caso se requiere conocimiento previo de las señales primarias, por lo que su complejidad de implementación es media. Por otro lado, si el ruido en el canal es estacionario, el desempeño de esta técnica se ve afectado. Su desempeño no se ve afectado en condiciones de baja SNR porque su indicador no depende del nivel de la señal sino de su periodicidad.

2.2.3. Detección basada en forma de onda

Esta técnica se puede utilizar cuando algunos patrones presentes en la señal son conocidos (e.g., preámbulo, secuencia de espectro ensanchado, señal piloto, etc.) Para identificar la presencia de un usuario primario, el receptor calcula la correlación entre uno de los patrones conocidos de la señal recibida y un banco de patrones conocidos correspondientes a las posibles señales primarias. Si $y(t)$ es la señal recibida y $s(t)$ es una señal conocida, la correlación entre ambas se expresa como [Yuc09]:

$$M = R_e \left[\sum_{n=0}^N y(n) s^*(n) \right] \quad (4)$$

donde * indica el conjugado. La correlación cuando el usuario primario está presente o ausente se puede expresar como (5) y (6) respectivamente. Este valor M obtenido debe compararse con un coeficiente λ_W para determinar si la correlación es alta y el usuario primario está presente, o baja en señal de que en el canal solo hay ruido.

$$M = \sum_{n=0}^N |s(n)|^2 + R_e \left[\sum_{n=0}^N w(n) s^*(n) \right] \quad (5)$$

$$M = R_e \left[\sum_{n=0}^N w(n) s^*(n) \right] \quad (6)$$

Esta técnica tiene una complejidad alta porque requiere, en algunos casos, demodular la señal hasta llegar al preámbulo, por lo que se requiere un dispositivo cognitivo que soporte el procesamiento de todas las posibles señales primarias que deben ser conocidas previamente. Respecto a su desempeño en condiciones de baja SNR, la técnica puede confiarse de los mecanismos usados por los sistemas de comunicaciones primarios para corregir posibles errores antes de llegar a los patrones evaluados en la detección.

3. Análisis de desempeño de las técnicas de detección de ERE

La detección de ERE se puede expresar de una forma simple. Si $s(t)$ es la señal del usuario primario y $w(t)$ es ruido AWGN, el dispositivo secundario debe verificar cuál de las siguientes condiciones se cumple en la señal recibida $y(t)$:

$$y(t) = \begin{cases} w(t) & H_0 \\ s(t) + w(t) & H_1 \end{cases} \quad (7)$$

H_0 y H_1 representan las hipótesis de presencia o ausencia de un usuario primario en el canal, respectivamente. Cuando el receptor ejecuta la técnica de detección y toma la decisión del estado del canal, lo ideal es que detecte a un usuario primario cuando está presente. Sin embargo, existen dos tipos de errores que pueden ocurrir [Sha15]:

- *Missing Detection*: cuando el umbral usado para determinar la presencia de un usuario primario es muy alto, la técnica podría no detectar una transmisión primaria activa en el canal.
- Falsa alarma: cuando el umbral es muy bajo es probable que la detección decida equivocadamente la presencia de un usuario primario, de manera que el usuario secundario pierde la oportunidad de usar el canal.

Un detector efectivo es aquel en el que la probabilidad de detectar un usuario primario cuando está presente (P_d) es alta, mientras que la probabilidad de *missing detection* (P_{md}) y la probabilidad de falsa alarma (P_f) son bajas. Estas probabilidades se definen en términos de las hipótesis definidas en (7) de la siguiente manera:

$$P_d = P(H_1|H_1) \quad (8)$$

$$P_f = P(H_1|H_0) \quad (9)$$

$$P_{md} = P(H_0|H_1) = 1 - P_d \quad (10)$$

Cada probabilidad tiene su expresión dependiendo de la técnica utilizada debido a que están asociadas al indicador (o umbral) de ocupación del canal ($\lambda_E, \lambda_C, \lambda_W$), y también al tipo de canal usado (i.e., AWGN, Rayleigh o Rician). Una vez determinadas se puede definir un umbral de acuerdo a valores objetivo de P_d o P_f . Dado que el interés primordial del uso secundario de ERE es permitir su uso oportunista evitando la interferencia perjudicial a usuarios primarios, en este trabajo en progreso se presenta el análisis de desempeño de la técnica más sencilla que es la detección de energía respecto a P_f en un canal AWGN. λ_E y P_d se definen como [Lia08]:

$$\lambda_E = \frac{Q^{-1}(P_f)}{\sqrt{N}} + 1 \quad (11)$$

$$P_d = Q \left(\lambda_E - (SNR + 1) \sqrt{\frac{N}{2 * SNR + 1}} \right) \quad (12)$$

donde $Q(x)$ es la función para calcular la probabilidad de que una variable aleatoria que sigue una distribución normal, como el ruido AWGN y la señal $y(t)$, tengan un valor más alto que x .

Para analizar el comportamiento de la detección de energía bajo variaciones de SNR, se calcula el valor teórico estimado de λ_E de acuerdo a (11) para valores objetivo de P_f entre 0.01 y 1, y el efecto del λ_E escogido sobre P_d de acuerdo a (12) para diferentes valores de SNR (-10 dB, -15 dB y 20 dB). El cálculo simulado de P_d se hizo ejecutando 10.000 simulaciones del sistema en Matlab, en las que se define de manera aleatoria la señal $y(t) = s(t) + w(t)$; a continuación se calcula su energía E para $N = 100$ muestras de la señal de acuerdo a (1) y se ejecuta la decisión de ocupación del canal cuando $E > \lambda_E$.

4. Resultados y discusión

La Fig. 1 muestra el valor del λ_E teórico para los valores objetivo de P_f . Recordando que P_f hace referencia al error de detección cuando λ_E es tan bajo que el canal se considera ocupado, aunque un usuario primario no esté presente, se observa que para tener valores bajos de P_f se debe tener un λ_E alto. El estándar IEEE 802.22 recomienda que $P_f < 0,1$ para que no se interfiera a los usuarios de televisión, por lo que λ_E estaría cercano a 1.15 dB.

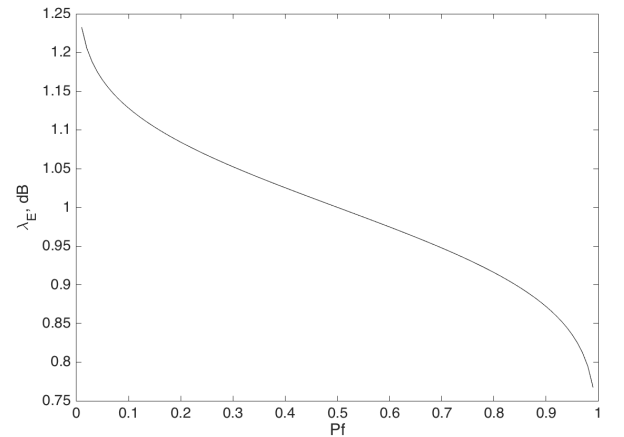


Figura 1: Umbral vs. P_f con la técnica de detección de energía

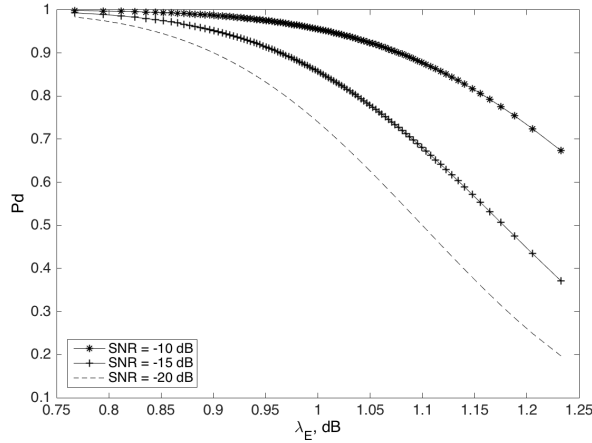


Figura 2: P_d vs. Umbral con la técnica de detección de energía (SNR=-10, -15, -20 dB)

El valor de P_d , que indica la probabilidad de detectar un usuario primario cuando está usando el canal, sí se ve afectado por el SNR. En la Fig. 2 se observa que P_d es mayor cuando λ_E tiene valores bajos porque el detector podría identificar transmisiones en curso con potencias bajas. Sin embargo, un valor bajo de λ_E aumenta P_f , por lo que existe un *trade-off* entre ambas probabilidades a la hora de escoger λ_E . Si las condiciones del canal empeoran (SNR más bajo), es necesario disminuir λ_E para mantener una P_d objetivo y proteger a los usuarios primarios. Por otro lado, si el canal está en mejores condiciones, λ_E puede subir para que P_f sea más baja y haya mayor utilización de los canales disponibles por parte de los usuarios secundarios.

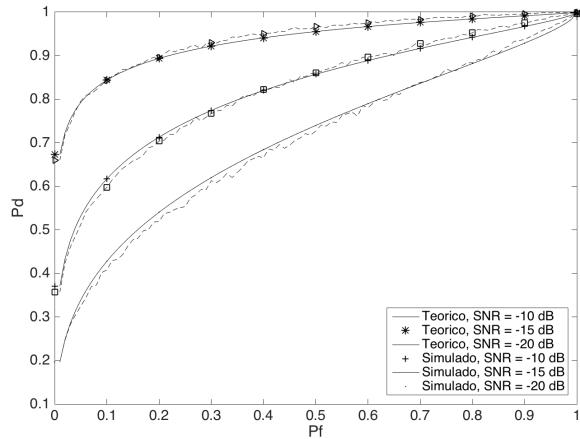


Figura 3: P_d vs. P_f Teórico y Simulado con la técnica de detección de energía (SNR=-10, -15, -20 dB)

La Fig. 3 muestra el *trade-off* entre P_f y P_d teóricos y el efecto del SNR, donde unas mejores condiciones de canal permiten aumentar P_d para una misma P_f , pero

en donde al disminuir P_f también disminuye P_d debido a la necesidad de subir λ_E . También se observa que los valores de P_d calculados por simulación para valores objetivo de P_f son iguales a los calculados mediante la expresión teórica.

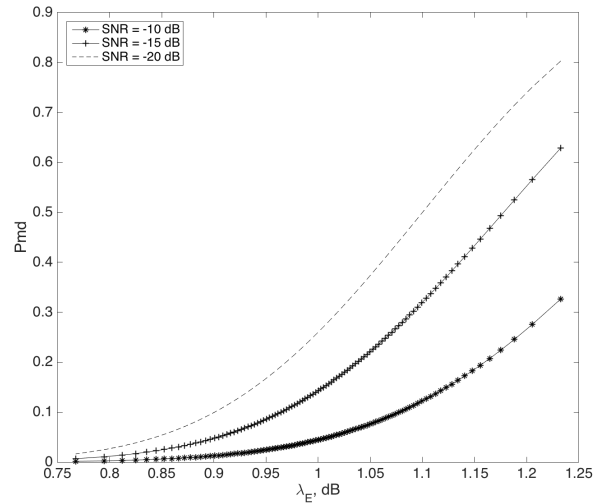


Figura 4: P_{md} vs. Umbral con la técnica de detección de energía (SNR=-10, -15, -20 dB)

Finalmente, para analizar la P_{md} que está asociada con el error de no identificar una transmisión de usuario primario debido a un λ_E alto, en la Fig. 4 se observa que P_{md} aumenta a medida que λ_E se hace más grande porque P_{md} está directamente relacionada con P_d . Si las condiciones del canal empeoran y λ_E debe disminuir para conservar una P_d , P_{md} será menor.

Los resultados muestran que la efectividad de la detección de energía, la cual se basa únicamente en la señal presente en el canal, depende de la estimación de λ_E y su ajuste de acuerdo a las condiciones del canal. El requerimiento primordial para VDSA, y en general para DSA al hacer uso oportunista de ERE en bandas licenciadas, es que los usuarios secundarios no ocasionen interferencia perjudicial a los usuarios primarios. Es por esto que se busca mantener una P_f baja, lo cual se alcanza con un λ_E alto. Sin embargo, cuando las condiciones del canal empeoran, es necesario bajar λ_E para aumentar P_d y asegurar que un usuario primario tengan acceso libre de interferencia perjudicial, así esto implique que el canal se considere ocupado la mayor parte del tiempo para los usuarios secundarios. Una vez las condiciones mejoran, λ_E puede tomar un valor más bajo y así aumenta la disponibilidad del canal para uso secundario.

5. Conclusiones

En este artículo se describieron tres técnicas de detección de ERE que pueden ser utilizadas en VDSA, teniendo en cuenta su complejidad de implementación

y la confiabilidad en la detección. Se evaluó el desempeño de una de las técnicas: la detección de energía en un canal con ruido AWGN de acuerdo a la P_d y P_{md} , según el λ_E requerido para garantizar una P_f objetivo. Los resultados mostraron que existe un *trade-off* entre P_d y P_f al definir el umbral de detección: un umbral bajo aumenta la probabilidad de detectar transmisiones primarios de baja potencia en el canal, pero aumenta la probabilidad de negar la utilización de un canal disponible a los usuarios secundarios.

Las condiciones del canal se deben tener en cuenta para variar el umbral y continuar garantizando el desempeño de la técnica. Ante un canal de mala calidad se debe bajar el umbral de detección, de manera que la transmisión de un usuario primario se mantenga libre de interferencia perjudicial, así esto implique la negación de acceso para un usuario secundario. Cuando las condiciones del canal mejoren el umbral puede subir nuevamente, y así aumenta la utilización oportunista de canales.

Como trabajo futuro se puede abordar la definición de las métricas de desempeño de estas técnicas para canal Rayleigh, con el fin de tener en cuenta el *multi-path* y el efecto Doppler en su análisis. Con esto será posible determinar los ajustes requeridos para usarlas en ambientes con movilidad, principalmente en la definición del umbral.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Proyecto FONDECYT Iniciación No. 11140045, el Proyecto U-INICIA-2014-005 y por el Programa Becas CONICYT para estudios de posgrado CONICYT-PCHA/Doctorado Nacional/2016-21161383.

Referencias

- [Adu12] M. A. Adulsattar and Z. A. Hussein. *Energy Detection Technique for Spectrum Sensing in Cognitive Radio: A survey*, International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), vol. 4, no. 5, pp. 224-242, September 2012.
- [Cab06] D. Cabric, A. Tkachenko and R. W. Brodersen. *Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection*, in MILCOM 2006 - 2006 IEEE Military Communications conference, Washington, DC, 2006.
- [Chen12] S. Chen. *Vehicular Dynamic Spectrum Access: Using Cognitive Radio for Automobile Networks*, Ph.D. dissertation, Faculty of the Worcester Polytechnic Institute, 2012.
- [Ecc15] Electronic Communication Committee - ECC. *ECC Recommendation (08)01: Use of the band 5855-5875 MHz for Intelligent Transport Systems (ITS)*, 2015.
- [Fcc05] Federal Communications Commission - FCC. *Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient, And Reliable Spectrum Use Employing Cognitive Radio Technologies*, FCC, 2005.
- [Ham14] Z. Hameed and F. Filali. *LTE and IEEE 802.11p for vehicular networking: a performance evaluation*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, p. 115, 2014.
- [Han10] Y. Han, Y. Wen, W. Tang and S. Li. *Spectrum Occupancy Measurement: Focus on the TV Frequency*, The 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), Dalian, China, July 2010, pp. V2-490-494.
- [Hu14] Q. Hu and X. Liu. *Tri-threshold cooperative spectrum detection for cognitive radio based on weighing*, in Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2014), 10th International Conference on, Beijing, 2014.
- [Kim07] K. Kim, I. A. Akbar, K. K. Bae, J. S. Um, C. M. Spooner and J. H. Reed. *Cyclostationary Approaches to Signal Detection and Classification in Cognitive Radio*, 2007 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Dublin, 2007, pp. 212-215.
- [Lac09] C. Lacatus, R. Vuyyuru, O. Altintas, D. Borota and I. Seskar. *Evaluation Of Energy-Based Spectrum Sensing Algorithm for Vehicular Networks*, Proc. SDR Forum Technical Conference 2009, Dec. 2009, Washington DC, USA.
- [Leh05] J.J Lehtomaki, M. Juntti, H. Saarnisaari, S. Koivu. *Threshold setting strategies for a quantized total power radiometer*, IEEE Signal Process. Lett., 2005, 12, (11), pp. 796799.
- [Li10] Y. Li, H. Huang and F. Ye. *Spectrum detection model for cognitive radio networks*, Bio-Inspired Computing: Theories and Applications (BIC-TA), 2010 IEEE Fifth International Conference on, Changsha, 2010, pp. 551-554.
- [Lia08] Y. C. Liang, Y. Zeng, E. C. Y. Peh and A. T. Hoang. *Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks*, in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, April 2008.
- [Oner04] M. Oner and F. Jondral. *Cyclostationarity based air interface recognition for software radio systems*, in Proc. IEEE Radio and Wireless Conf., Atlanta, Georgia, USA, Sept. 2004, pp. 263266.
- [Pat11] K. Patil, K. Skouby, A. Chandra and R. Prasad. *Spectrum Occupancy Statistics in the Context of Cognitive Radio*, Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), The 14th International Symposium on, France, Brest, Oct. 2011.
- [Sha15] Shabnam and R. Mahajan. *Performance analysis of cyclostationary and energy detection spectrum sensing techniques*, in Signal Processing, Computing and Control (ISPC), 2015 International Conference on, Wagnaghat, 2015.
- [Song12] M. Song, C. Xin, Y. Zhao and X. Cheng. *Dynamic spectrum access: from cognitive radio to network radio*, 2012.
- [Yuc09] T. Yucek and H. Arslan. *A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications*, in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, First Quarter 2009.