

FBMC, una opción para un uso óptimo del espectro electromagnético

**Elkin Ospina-Martínez¹,
Leonardo Betancur Agudelo²**

*Coordinación Académica en Maestría TIC y Maestría
en Ingeniería área Telecomunicaciones, Universidad
Pontificia Bolivariana
Medellín, Colombia*

¹*eospinam@eafit.edu.co*

²*leonardo.betancur@upb.edu.co*

Abstract

A review of FBMC is done as an optimal technology that has proved to be suitable for being applied in CR networks for Dynamic Spectrum Access and in uplink wireless communications.

Keywords: CR, Cognitive Radio, SDR, Software Define Radio, FBMC, Filter Bank Multicarrier, OFDM, Dynamic Spectrum Access.

Introducción

La explosión del número de dispositivos móviles conectados a Internet (teléfonos inteligentes, tabletas, sistemas M2M, *machine to machine*) y aplicaciones nuevas, como las de multimedia y de computación en la nube, están incrementando de forma dramática la demanda de comunicaciones inalámbricas de banda ancha [1].

Diferentes estudios, como [2], muestran que habrá un incremento considerable en el tráfico móvil total, lo que está llevando a una escasez en los recursos necesarios para las comunicaciones inalámbricas (especialmente el espectro electromagnético) y a que se busquen alternativas más óptimas para la utilización de los recursos disponibles en la actualidad.

Las dificultades para contar con más espectro electromagnético son puestas de manifiesto por *4G Americas* en el informe que publicaron en agosto de 2013 [3], donde se plantea que, a pesar de que la UIT-R en el reporte M.207 [4] recomendó que para 2015 se debían asignar 1.300 MHz de espectro electromagnético para el desarrollo de IMT-2000 e IMT-Advanced, por lo menos en el caso de Latinoamérica, los países que más han avanzado en la asignación del espectro sólo han logrado asignar alrededor de 30% del valor recomendado por la UIT-R (Brasil ya ha asignado 38,65%). Por consiguiente, es real la dificultad de disponer de más espectro para los servicios nuevos, lo que muestra la necesidad de utilizar estrategias adicionales que permitan un mayor aprovechamiento de los recursos disponibles para atender el incremento en el consumo de datos y para el suministro de servicios nuevos.

Uno de los aspectos de las comunicaciones inalámbricas que es objeto de estudio es cómo lograr el máximo aprovechamiento de las redes inalámbricas existentes, teniendo en cuenta la heterogeneidad de redes (2G, 3G, 4G, WLAN, WiMAX, etc.) a las que se puede tener acceso en un lugar e instante determinado.

Entre las opciones se encuentra el mejor uso del espectro electromagnético, que se puede lograr a través de las técnicas para Acceso Dinámico al Espectro (DSA, *Dynamic Spectrum Access*) implementadas utilizando Radios Cognoscitivas¹ (CR, *Cognitive Radio*) y en las que FBMC (*Filter Bank Multicarrier*) ha mostrado ser una tecnología conveniente para lograr un mejor aprovechamiento del espectro.

Por sus características, FBMC ha sido propuesto como una tecnología para utilizar en los enlaces de subida de las redes multipunto a punto, en las que muchos

1 Se utiliza la expresión Radio Cognoscitiva, siguiendo la traducción utilizada por la UIT-R [8].

usuarios se conectan a una estación base central; un escenario típico en las redes de comunicaciones móviles.

A continuación, se hará una revisión de las consideraciones sobre el uso óptimo del espectro, de las características más relevantes de FBMC y los requerimientos para su implementación.

II. Selección de red

Una característica de las comunicaciones inalámbricas actuales es que hacen parte de un modelo de comunicación compuesto (ambiente heterogéneo), en el que es común que estén disponibles varios sistemas de acceso inalámbrico, como celular, el satelital, las redes de área local (WLAN), etc., que pueden combinarse para suministrar un servicio óptimo, todo el tiempo y en todo lugar [5].

Para obtener el mayor aprovechamiento, la red que se va a utilizar debe seleccionarse entre las que cumplan con ciertos requerimientos, teniendo en consideración parámetros estáticos (como precio, ancho de banda, nivel de seguridad, velocidad de errores de bit, fluctuación, consumo de potencia, etc.) y parámetros dinámicos (como carga de tráfico, intensidad de la señal, propiedades de *handover*, etc.) [6]. Si se selecciona una red que no sea la adecuada, pueden incrementarse los costos o experimentarse un servicio de mala calidad [7].

Como se plantea en [5], en un ambiente heterogéneo es necesario contar con un mecanismo para la selección dinámica de la red, que permita determinar la tecnología de acceso por radio (RAT, *Radio Access Technology*) más apropiada para un servicio específico.

Al respecto, se han propuesto algunas métricas para la comparación de redes, adicionales a la intensidad de la señal y disponibilidad del canal, entre las que se encuentran: El tipo de servicio (distintas aplicaciones tienen diferentes requerimientos de confiabilidad, retardo y velocidad de los datos), las condiciones de la red (carga de tráfico, ancho de banda, retardo, errores y congestión) y las condiciones del nodo móvil (velocidad, ubicación, precio, equilibrio de carga) [5]. De esta forma, se tienen en cuenta las preferencias del usuario y las necesidades del servicio, combinando las configuraciones de prioridad de los atributos de QoS con el desempeño de las redes disponibles para tomar una decisión en la selección de la red [6].

La gestión del cambio de red (*handover*) es un asunto esencial para el cambio transparente de una red a otra. El *handover* vertical (conocido también como *handover* heterogéneo o *hyperhandover*) puede iniciarse, según lo expuesto anteriormente, por razones de conveniencia y no por razones de conectividad [9]. Los mayores desafíos

del *handover* vertical son la transparencia al hacer el cambio de red y que el cambio se haga de forma automática.

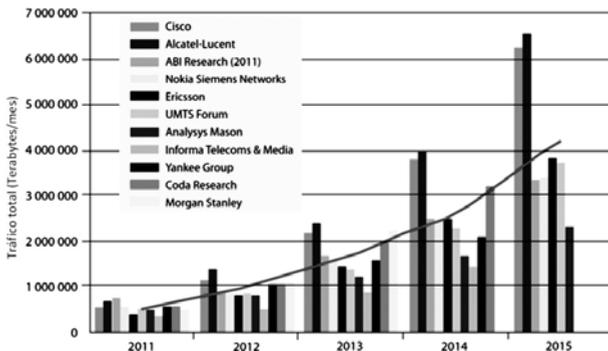
Como igualmente se establece en [9], los requerimientos del *handover* vertical están relacionados con el concepto de “Siempre mejor conectado” (*ABC, Always Best Connected*), que corresponde a una visión integral del acceso inalámbrico fijo y móvil para el que deben definirse importantes aspectos en las tecnologías, las redes y los terminales móviles.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, como se plantea en [5], puede suceder que el criterio de ABC satisfaga el desempeño óptimo de un solo usuario, pero que sea desfavorable en cuanto a la utilización eficiente de los recursos y llegue a afectarse el desempeño general de la red.

Según un reporte publicado por Cisco [10], en 2012 había entre 10.000 y 15.000 millones de dispositivos conectados a Internet, que corresponderían a menos del 1% de todos los objetos que podrían estar conectados; y se estima que el potencial completo del Internet de Todo (*Internet of Everything*) se alcanzará en 10 años, cuando habrá una red de redes con miles de millones o, inclusive, billones de conexiones.

El UMTS Forum [2] estima que el tráfico móvil mundial alcanzará más de 127 Exabytes en 2020 (es decir, 33 veces el tráfico de 2010) y 351 Exabytes en 2025 (un incremento de 174%, comparado con 2020). Al respecto, es interesante observar que la UIT-R, en su más reciente reporte [11] muestra cómo sus estimaciones de 2005 para el tráfico de 2007 a 2010 (publicadas en el reporte UIT-R M.2072) resultaron muy conservadoras y que, en algunos casos, fueron superadas en más de cinco veces por el tráfico real; con la explosión actual de datos móviles, no sería sorprendente que sucediera algo similar con las predicciones futuras. La Fig. 1, tomada de [11], muestra el tráfico global estimado para el periodo 2011-2015, de acuerdo con distintas fuentes.

Estimación del tráfico global de datos móviles entre 2011 y 2015, basado en diferentes fuentes [11].



Según el mencionado reporte de la UIT-R [11], distintas administraciones alrededor del mundo han expresado la necesidad de contar con más espectro para atender las necesidades futuras; por ejemplo, la Unión Europea anunció que requerirán por lo menos 1.200 MHz de espectro, a más tardar en 2015, para aplicaciones de banda ancha inalámbrica.

III. Acceso dinámico al espectro

Una alternativa para atender la demanda cada vez mayor de capacidad en las redes inalámbricas, como está propuesto en [12], consiste en mejorar la utilización del recurso del espectro radioeléctrico, teniendo en cuenta que la forma como se ha manejado tradicionalmente, a través de regulaciones y controles, conocida como administración estática, ha dado lugar a barreras para su acceso, que la hacen poco apropiada para atender la demanda creciente de servicios inalámbricos de la actualidad; adicionalmente, como se expone en [12], la situación descrita ha llevado a un uso ineficiente del espectro existente.

Las técnicas de acceso dinámico al espectro (DSA, *Dynamic Spectrum Access*) buscan mejorar su utilización, pues permiten que los usuarios accedan dinámicamente al espectro en una dimensión espacial temporal [13]. Según se explica en [14], es posible que los llamados usuarios secundarios (SU, *Secondary Users*) tengan un acceso oportunista a las bandas que fueron licenciadas a usuarios existentes o usuarios primarios (PU, *Primary Users*) pero que no están siendo utilizadas, para lo que los SU deben estar en capacidad de adaptarse de forma eficiente a las fluctuaciones rápidas del tráfico.

IV. Radio cognoscitiva como tecnología para acceso dinámico al espectro

Es aceptado que la tecnología clave para el acceso dinámico al espectro es la Radio Cognoscitiva (CR, *Cognitive Radio*) [15], definida formalmente en [16] como “un sistema radioeléctrico que utiliza una tecnología que permite al sistema extraer información de su entorno operativo y geográfico, las políticas establecidas y su situación interna; y adapta de manera dinámica y autónoma sus parámetros y protocolos operacionales en función de la información obtenida a fin de cumplir unos objetivos predeterminados, así como extraer enseñanzas de los resultados obtenidos”.

Hay otras definiciones de CR, como la presentada inicialmente en [17], donde se establece que la Radio Cognoscitiva extiende el concepto de Radio Definida por Software (SDR, *Software Defined Radio*), o “sistema radioeléctrico determinado por

programas informáticos”, como lo denomina la UIT-R en el mismo informe [16]), con un conjunto de bandas de RF, interfaces de aire, protocolos y patrones espaciales y temporales que permiten moderar el uso del espectro radioeléctrico. Así mismo, para [18], CR es un sistema de comunicación inalámbrico inteligente que es consciente del ambiente que lo rodea (o sea, el mundo exterior) y utiliza la metodología de entender construyendo para aprender del ambiente y adaptar sus estados internos a las variaciones estadísticas en el estímulo de RF entrante con el fin de efectuar los cambios respectivos, en tiempo real, de ciertos parámetros de operación, como potencia, frecuencia de portadora y estrategia de modulación, con dos objetivos principales en mente: Comunicaciones altamente confiables, siempre y donde sea necesario, y utilización eficiente del espectro radioeléctrico.

Si bien no hay restricciones para la técnica con la que se implemente una CR, en la práctica, como lo plantea Mitola en [17], se acepta que la CR es una evolución de la SDR.

Aunque, según se manifiesta en [19], no hay una definición universalmente aceptada de la SDR, su principal característica es la flexibilidad que tiene para variar la forma de la onda de radio cambiando la aplicación o modificando sus parámetros, sin necesidad de cambiar la plataforma de la SDR, entendida como el equipo y el ambiente de operación donde la aplicación de la forma de onda está en ejecución. Se asume que la flexibilidad se refiere por lo menos a diferentes bandas (múltiples bandas) y a diferentes modulaciones (múltiples modulaciones).

Un ejemplo práctico de la utilidad de la SDR se encuentra en las comunicaciones comerciales, en las que la evolución tan rápida que presentan los estándares de comunicaciones hace que las actualizaciones de software sean una solución mucho más práctica que el remplazo de las estaciones base, que tiene un costo asociado alto. Una diferencia esencial con la SDR, es que la CR cuenta con la capacidad de detectar su entorno, hacerle seguimiento a los cambios y reaccionar a ellos [20], lo que le da el atributo de inteligente (o consciente, como lo indica su nombre).

La CR permite aprovechar el espectro desperdiciado y subutilizado, conservando el desempeño total del sistema; así mismo, al ser un sistema que puede tener la capacidad de autogestionarse, se reducen los gastos operativos y de mano de obra. La utilización óptima del espectro, la reutilización y la administración son aspectos esenciales, especialmente en la próximas generaciones de sistemas de comunicación inalámbrica, que requerirán mayores anchos de banda y en las que las topologías de red serán cada vez más complejas (macro celdas, micro celdas, femtoceldas, etc.) [21].

Para que sea posible compartir el espectro con los usuarios que tienen la licencia (PU), estos no deben percibir ningún efecto perjudicial, al tiempo que deben satisfacerse las exigencias de calidad de servicio de las distintas aplicaciones. Por esta razón, cada usuario CR en una red de usuarios CR tiene que estar en capacidad de [14]:

- Identificar la porción de espectro que está disponible, lo que se conoce como detección de espectro (*spectrum sensing*).
- Seleccionar el mejor canal disponible, lo que se llama decisión de espectro (*spectrum decision*).
- Desocupar el canal cuando un usuario licenciado es detectado, lo que se denomina movilidad espectral (*spectrum mobility*).
- Coordinar el acceso a este canal con otros usuarios, lo que denomina compartir el espectro (*spectrum sharing*).

A. Métodos de acceso al espectro

El acceso al espectro radioeléctrico por un CR puede hacerse de distintas formas, teniendo presente que el espectro es una entidad de varias dimensiones, tales como espacio, tiempo, frecuencia, polarización, potencia de la señal de transmisión e interferencia.

En DSA, dos modelos de acceso cognoscitivo al espectro han recibido mayor atención [22]: 1) Acceso oportunista al espectro (OSA, *Opportunistic Spectrum Access*) y 2) Acceso concurrente al espectro (CSA, *Concurrent Spectrum Access*).

En el modelo OSA, un usuario de CR realiza detección del espectro para encontrar las porciones de espectro asignadas (licenciadas) a PUs, pero que no las están utilizando en un instante particular y en una ubicación geográfica específica (se conocen como “huecos en el espectro” [23]). El CR reconfigura sus parámetros de transmisión (como la frecuencia portadora, el ancho de banda y el esquema de modulación) para operar en los huecos identificados en el espectro; además, es necesario que el CR supervise continuamente el espectro para que lo desocupe rápidamente cuando los PUs se activen.

En el modelo CSA, un usuario CR coexiste con un PU activo en una banda licenciada en la medida en que el transmisor CR controla su potencia de transmisión para que la interferencia ocasionada al receptor primario esté por debajo de un umbral aceptable. Este modelo también es conocido como compartición de espectro (*spectrum sharing*) o espectro subyacente (*underlay spectrum*).

Los métodos anteriores son esencialmente detectores físicos de espectro, en el sentido de que los nodos físicamente se sintonizan en cada banda de frecuencia para detectar el estado del espectro. También se ha propuesto otro método, conocido como “detección virtual del espectro” [24], en el que los usuarios vecinos, de forma cooperativa, comparten información sobre la utilización del espectro, evitando que cada CR tenga que analizar todo el espectro.

B. Tecnologías para comunicaciones con y desde CRs

Como puede preverse, es posible conformar redes de CR que trabajen de forma cooperativa, aunque, como se expone en [14], implican desafíos por el intervalo amplio de espectro disponible, al igual que los requerimientos de calidad de servicio de las aplicaciones.

En redes de CR basadas en infraestructura, en las que las estaciones base secundarias (SBS, *Secondary Base Stations*) controlan las comunicaciones en su entorno, que puede abarcar varios kilómetros, lo normal es que la información detectada y reportada a la estación base por cada CR individual sea diferente, lo que lleva a que la estación base limite el conjunto común de canales a aquellos que no presenten conflicto en toda su área de cobertura [25].

Como se demuestra en [26], en la transmisión del enlace de subida lo recomendable es utilizar la menor interferencia posible, por lo que será necesario comparar las ganancias de interferencias entre los CR de la red respecto a un umbral determinado y activar solamente los usuarios cuya interferencia esté por debajo de ese umbral. La SBS es la que debe determinar cuál es la mejor opción para que los SU continúen transmitiendo [21].

C. Multiplexación en CR

En una red de CR los SU, además de transmitir independientemente, muy posiblemente lo hacen con un estándar diferente al de los PU, por lo que debe evitarse que se genere algún tipo de interferencia de los SU a los PU.

Algunos investigadores han señalado que OFDM puede ser una tecnología de multiplexación adecuada para CR por, entre otras razones, su flexibilidad, eficiencia computacional y la capacidad de optimizar la velocidad de acuerdo con la SNR del canal (al respecto, ver [27]).

Como se plantea en [28], se reconoce que OFDM presenta las siguientes ventajas:

- Ortogonalidad de las señales subportadoras, lo que permite simplicidad en la generación de la señal a transmitir utilizando IFFT, la equalización empleando una ganancia escalar por subportadora y la adopción de canales MIMO.
- Las subportadoras ortogonales, con una separación mínima, dividen el ancho de banda disponible en un conjunto máximo de subbandas angostas.
- Los esquemas de modulación adaptable pueden aplicarse a las bandas subportadoras para maximizar la eficiencia o la velocidad de transmisión.
- La estructura especial de los símbolos OFDM simplifica las tareas de sincronización de portadora y símbolo.

Sin embargo, como se expone en [29], en la práctica OFDM presenta diversos problemas, como los lóbulos laterales grandes derivados de su respuesta a la frecuencia [30], la susceptibilidad al desplazamiento de la frecuencia de la portadora (CFO, *Carrier Frequency Offset*) y a los canales doblemente dispersivos, la reducción en el ancho de banda por la necesidad de insertar el prefijo cíclico (CP) y una relación pico a potencia promedio (PAPR, *Peak-to-Average-Power Ratio*) alta [5], que obliga a reducir la eficiencia de los circuitos transmisores, una situación particularmente crítica para los terminales móviles, que usualmente cuentan con un suministro de potencia limitado (su batería).

Según se demuestra en [26] y en [31], para el caso del enlace de subida en redes de CR, el mejor desempeño se obtiene buscando la menor interferencia en la transmisión del enlace de subida y con transmisión simultánea en lugar de división temporal. Y, como se explica en [32], en un canal con propagación multitrayectoria, los símbolos de las portadoras múltiples, que en la salida del transmisor son un conjunto de tonos ortogonales perfectamente sincronizados, se superponen en la entrada del receptor, por lo que su demodulación ya no es simple, pues esta asume un receptor alineado perfectamente en el tiempo con el transmisor para evitar la interferencia entre portadoras (ICI, *InterCarrier Interference*).

Por lo anterior, aunque OFDM trabaja bien en el enlace de bajada, en los enlaces de subida se requieren pasos adicionales de procesamiento para reducir la interferencia entre señales, ya que los nodos transmiten de forma separada y la sincronización no es simple, lo que agrega una complejidad significativa al receptor OFDM.

V. FBMC como técnica para comunicaciones

Como se verá, la técnica de FBMC, en conjunto con la modulación por amplitud de cuadratura desplazada (OQAM, *offset quadrature amplitud modulation*), pueden alcanzar una interferencia entre símbolos y una interferencia entre portadoras menor que OFDM, sin necesidad de utilizar el prefijo cíclico (CP) y, en su lugar, emplear una forma de pulso bien diseñada, que satisfaga las condiciones de reconstrucción. Los filtros de síntesis y análisis de las subportadoras en OFDM tienen lóbulos laterales relativamente grandes debido a la forma de pulso rectangular de las subportadoras, ocasionando filtraciones de potencia hacia las bandas de otros usuarios, que causan interferencias indeseables. Por consiguiente, en OFDM es necesario extender la duración del símbolo por un tiempo de guarda que exceda la duración de la respuesta al impulso; si bien de esta forma se soluciona el problema de interferencias entre bandas, se reduce el desempeño del sistema por tener que utilizar más ancho de banda. Esta situación puede mejorarse si los filtros que sintetizan y analizan las señales subportadoras tienen lóbulos laterales pequeños; por lo tanto, una opción muy conveniente en aplicaciones de acceso múltiple, de transmisión de datos de banda

ancha sobre cables desprotegidos y de CR es la técnica de FBMC, que puede ser diseñada con lóbulos laterales arbitrariamente pequeños y, por consiguiente, puede conservarse la temporización y la duración de los símbolos.

Si bien FBMC requiere un mayor procesamiento que OFDM, este tiene un menor costo que las técnicas de compensación de señal que se necesitan aplicar a un sistema OFDM para mitigar algunos de sus inconvenientes [5].

De [32] se tomaron los diagramas de bloques de las figuras Fig. 2 y Fig. 3, que muestran la diferencia de implementación entre OFDM y FBMC.

Figura 2. Diagramas de bloques de OFDM.

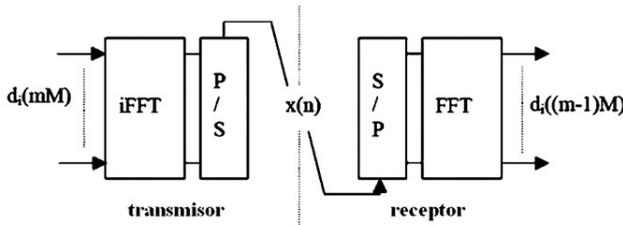
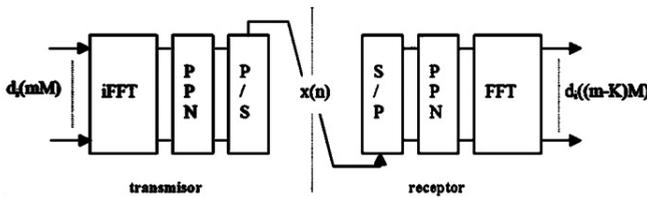


Figura 3. Diagramas de bloques de FBMC.



En principio, la implementación de FBMC es más compleja que OFDM por la adición de los bloques PPN (*PolyPhase Network*), que implican un mayor procesamiento por los filtros digitales que agrega al sistema. No obstante, en [5] se concluye que una implementación basada en FBMC lleva a un desempeño muy superior y con una complejidad computacional menor que OFDM, como consecuencia de utilizar filtros casi perfectos para separar las subportadoras, lo que evita la necesidad de tener que recurrir a alguno de los métodos para la cancelación de interferencia cuando se utiliza OFDM.

Así mismo, también de [32] se tomaron los espectros de las figuras Fig. 4 y Fig. 5, que permiten observar comparativamente las diferencias entre OFDM y FBMC. Como puede verse, FBMC tiene un ancho de banda más confinado, con lóbulos laterales mínimos, a diferencia de OFDM.

Figura 4. Espectro de OFDM.

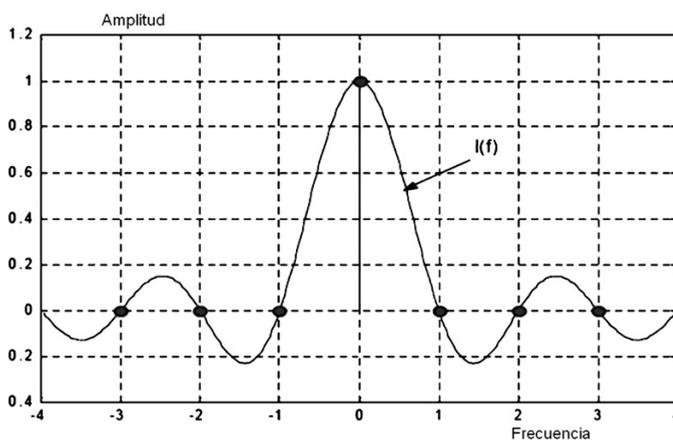
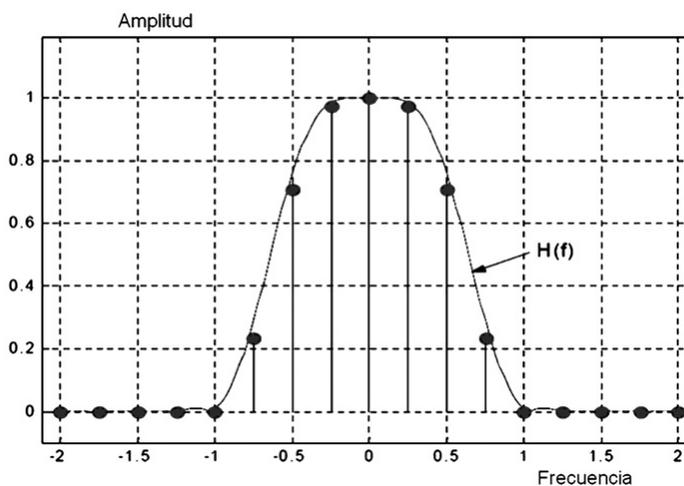


Figura 5. Espectro de FBMC.



Por las características de FBMC mencionadas, al combinarla con modulaciones como OQAM (*Offset Quadrature Amplitud Modulation*) o CMFB (*Cosine Modulated Filter Bank*) se logra una velocidad de bits que maximiza la eficiencia de la transmisión, sin necesidad del tiempo de guarda o del prefijo cíclico de OFDM. Adicionalmente, como se expone en [33], la existencia de subcanales independientes o grupos de subcanales con flujos de datos continuos, permite que los datos recibidos en la SBS desde diferentes móviles puedan ser procesados independientemente y de una forma adaptable.

D. El filtro en FBMC

La mayoría de los beneficios de FBMC parten de que las subportadoras no adyacentes están separadas casi perfectamente por medio de un banco de filtros bien diseñados, por lo que el diseño y la construcción de este banco de filtros es un aspecto crucial del sistema, que ha sido revisado en [29]. En el artículo citado, además, se retoman resultados presentados en los años 60, en los que: 1) Chang estableció que la condición de ortogonalidad para los esquemas de transmisión de portadora múltiple, considerando filtros de banda limitada y OQAM, es que los subcanales pueden estar separados la mitad de la velocidad del símbolo, sin ICI y sin interferencia entre símbolos (ISI, *InterSymbol Interference*), cuando los datos están escalonados en subcanales alternados en fase y en cuadratura; 2) Saltzberg generalizó la idea de transmisión de portadora múltiple, demostrando que la condición de Chang es también verdadera cuando se intercambian los ejes de tiempo y frecuencia.

Como se expone en [34], un sistema FBMC puede construirse a partir de un filtro prototipo cuyas dispersiones de tiempo y frecuencia igualen las del canal; así mismo, debe conservarse la máxima eficiencia espectral. Para evitar la ISI, este filtro prototipo debe diseñarse tal que sea un filtro Nyquist y que, con ciertas restricciones en su simetría, también pueda evitar la ICI.

En general, como se plantea en [29], FBMC es flexible en el diseño de los filtros prototipo, lo que permite que estos se diseñen para distintos propósitos.

Los filtros prototipo están clasificados en tres tipos [29]: Filtros limitados en el tiempo, filtros limitados en la banda y filtros localizados.

Los filtros limitados en el tiempo tienen una duración finita, por lo que pueden implementarse con facilidad; además, tienen un espectro de longitud infinita. Entre ellos, se encuentran los filtros rectangulares, los filtros Hamming, Hanning y Blackman, los filtros de pulsos de duración finita óptima/filtros prolató (que presentan la respuesta de escalón más rápida para un ancho de banda dado [27]), los filtros Kaiser y los filtros PHYDYAS.

Por su parte, los filtros limitados en banda se caracterizan por un ancho de banda finito y una longitud infinita en el dominio del tiempo, lo que los hace problemáticos al considerar la construcción práctica de las ranuras y marcos. Entre estos filtros están el filtro coseno elevado, el filtro coseno raíz elevada y los filtros coseno medio y sinc medio.

Finalmente, los filtros localizados se basan por igual en el dominio del tiempo y de la frecuencia y tienden a comportarse como un pulso gaussiano. Algunos son: Filtro gaussiano, filtro de pulsos Hermite, filtro de algoritmo de transformada ortogonal isotrópica y filtro de función gaussiana extendida.

Conclusiones

Sobre las tecnologías de redes inalámbricas hay presiones que provienen de flancos diferentes: Por un lado, los recursos para comunicaciones inalámbricas, como el espectro radioeléctrico, son escasos; pero, a su vez, los usuarios demanda más recursos y con mayor disponibilidad de cobertura y calidad.

Para dar respuesta a esta situación, es necesario utilizar tecnologías que hagan un mejor uso de los recursos disponibles; en particular, es importante que se haga un mejor uso del espectro radioeléctrico, para lo que, una de las opciones, es aplicar las técnicas de DSA.

Si se logra generalizar el uso de CR, en combinación con una tecnología que hace un mejor uso del espectro como FBMC, será posible atender los requerimientos crecientes de los usuarios, con una utilización más óptima de los recursos de espectro radioeléctrico disponibles.

Comparativamente, con FBMC se puede lograr una interferencia entre símbolos y entre portadoras menor que con OFDM, sin necesidad del CP; igualmente, FBMC permite reducir los lóbulos laterales de cada subportadora, casi eliminando la interferencia por acceso múltiple [35]. Tal vez la principal desventaja de FBMC es el procesamiento adicional; sin embargo, este es menor que el que requiere OFDM para mitigar algunos de los problemas que presenta en un ambiente multiusuario, por ejemplo, en un sistema de comunicaciones inalámbricas multipunto a punto.

Referencias

- [1] S. Kaiser y M. Latva-aho, «Broadband Wireless Beyond 2020». 30-may-2011.
- [2] IDATE, «UMTS Forum Report 44 - Mobile traffic forecasts 2010-2020 report», UMTS Forum, London, UK, 44, 2011.
- [3] Signals Telecom Consulting, «Analysis of ITU Spectrum Recommendations in Latin America Region - Understanding Spectrum Allocations and Utilization», 3G Americas, ago. 2013.
- [4] ITU-R, «Estimated spectrum bandwidth requirements for the future development of IMT-2000 and IMT-Advanced», ITU-R, Geneva, Switzerland, M.2078, oct. 2007.
- [5] Q. Song y A. Jamalipour, «A network selection mechanism for next generation networks», en Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on, 2005, vol. 2, pp. 1418-1422.
- [6] W. Liu, «A novel application-oriented strategy for network selection», Zhōngguó kējì lùn-wén zàixiàn, 2010. [En línea]. Disponible en: <http://www.paper.edu.cn>.
- [7] F. Bari y V. C. Leung, «Automated network selection in a heterogeneous wireless network environment», Network, IEEE, vol. 21, n.º 1, pp. 34-40, 2007.
- [8] UIT-R. (2009). Informe UIT-R SM.2152. Definiciones de sistema radioeléctrico determinado por programas informáticos (RDI) y sistema radioeléctrico cognoscitivo (SRC). Publicación electrónica.

- [9] B. M. Bakmaz, «Network Selection Equilibrium in Heterogeneous Wireless Environment», *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 19, n.º 4, abr. 2013.
- [10] D. Evans, «The Internet of Everything - How More Relevant and Valuable Connections Will Change the World». Cisco IBSG, 2012.
- [11] ITU-R, «Assessment of the global mobile broadband deployments and forecasts for International Mobile Telecommunications», ITU-R, Geneva, Switzerland, M.2243, 2012.
- [12] H. Li, J. Hajipour, A. Attar, y V. C. Leung, «Efficient HetNet implementation using broadband wireless access with fiber-connected massively distributed antennas architecture», *Wireless Communications, IEEE*, vol. 18, n.º 3, pp. 72–78, 2011.
- [13] M. M. Buddhikot, «Understanding dynamic spectrum access: Models, taxonomy and challenges», en *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 649–663.
- [14] Xi Zhang, & Hang Su. (2011). Opportunistic Spectrum Sharing Schemes for CDMA-Based Uplink MAC in Cognitive Radio Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 29(4), 716-730. doi:10.1109/JSAC.2011.110405
- [15] Chen, K.-C., & Prasad, R. (2009). *Cognitive radio networks*. United Kingdom: Wiley.
- [16] Recuperado a partir de http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-S.pdf.
- [17] Mitola, Joseph, & Maguire, Gerard. (1999). Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18.
- [18] S. Haykin, «Cognitive radio: brain-empowered wireless communications», *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, n.º 2, pp. 201-220, feb. 2005.
- [19] Ulversoy, T. (2010). Software Defined Radio: Challenges and Opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(4), 531-550. doi:10.1109/SURV.2010.032910.00019
- [20] Jondral, F. K. (2005). Software-defined radio: basics and evolution to cognitive radio. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2005(3), 275–283.
- [21] Saparudin, F. A., Faisal, N., Rashid, R. A., Ghafar, A. S., & Maharum, S. M. (2011). Cooperative Communication and Cognitive Radio (CR) Technology in LTE-Advanced. En *Informatics Engineering and Information Science* (pp. 701–710). Springer.
- [22] Liang, Y.-C., Chen, K.-C., Li, G. Y., & Mahonen, P. (2011). Cognitive Radio Networking and Communications: An Overview. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(7), 3386-3407. doi:10.1109/TVT.2011.2158673.
- [23] Arslan, Huseyin, «Cognitive Radio, Software Defined Radio and Adaptive Wireless Communication Systems», presentado en *CCNC 2012, Las Vegas, Nevada, United States*, 17-ene-2012.
- [24] Luo, T., & Motani, M. (2009). Cognitive DISH: Virtual spectrum sensing meets cooperation. En *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks*, 2009. SECON'09. 6th Annual IEEE Communications Society Conference on (pp. 1–9).
- [25] Xiao, Y., & Hu, F. (2009). *Cognitive Radio Networks* (1.a ed.). Boca Raton, FL: Auerbach.
- [26] N. Jamal, H. E. Saffar, y P. Mitran, «Asymptotic scheduling gains in point-to-multipoint cognitive networks», *arXiv preprint arXiv:1001.3365*, 2010.
- [27] Temes, Gabor C, «The prolate filter: An ideal lowpass filter with optimum step-response», *Journal of the Franklin Institute*, Volume 293, Issue 2, February 1972, Pages 77–103.
- [28] B. Farhang-Boroujeny, Behrouz, «OFDM Versus Filter Bank Multicarrier», *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 28, n.º 3, pp. 92-112, may 2011.
- [29] Sahin, A., Güven, I., & Arslan, H. (2012). A Survey on Prototype Filter Design for Filter Bank Based Multicarrier Communications. arXiv preprint arXiv:1212.3374.
- [30] M. Shaat y F. Bader, «An uplink resource allocation algorithm for OFDM and FBMC based cognitive radio systems», en *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks & Communications (CROWNCOM), 2010 Proceedings of the Fifth International Conference on*, 2010, pp. 1–6.

- [31] N. Jamal y P. Mitran, «Sum-rate Results in Point-to-multipoint Cognitive Networks: Effect of Path Loss», en *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on, 2011*, pp. 1–6.
- [32] M. Bellanger, «FBMC physical layer: a primer», *PHYDYAS*, January, 2010.
- [33] T. Ihalainen, A. Viholainen, T. H. Stitz, M. Renfors, y M. Bellanger, «Filter bank based multi-mode multiple access scheme for wireless uplink», en *17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Glasgow, Scotland, 2009*.
- [34] P. Amini, C. H. Yuen, R.-R. Chen, y B. Farhang-Boroujeny, «Robust Filter Design for Multicarrier Communication over Doubly Dispersive Channels», en *Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2010 IEEE, 2010*, pp. 89–92.
- [35] Saeedi-Sourck, H., Wu, Y., Bergmans, J. W. M., Sadri, S., & Farhang-Boroujeny, B. (2011). Complexity and Performance Comparison of Filter Bank Multicarrier and OFDM in Uplink of Multicarrier Multiple Access Networks. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 59(4), 1907-1912. doi:10.1109/TSP.2010.2104148

