

Canalizador polifase para aplicaciones en radio definido por software

Miguel Sánchez-Meraz
Federico Felipe-Durán

Departamento de Telecomunicaciones,
Sección de Estudios de Posgrado Investigación (SEPI),
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME),
Instituto Politécnico Nacional (IPN).
Edif. Z4, 3^{er} piso. Unidad Profesional
Adolfo López Mateos,
México, DF.
MÉXICO.

Tel. (55) 5729 6000 ext. 54755

Correo electrónico: mmeraz@ipn.mx

Recibido el 25 de marzo de 2008; aceptado el 9 de enero de 2009.

1. Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un canalizador para su aplicación en la tecnología de *radio definido por software* (RDS) utilizando filtros polifase. Se muestra también una comparativa general entre las ventajas de la implementación de los canalizadores basados en software respecto de los usados en las arquitecturas tradicionales de receptor. Se presentan los resultados de este diseño.

Palabras clave: radio definido por software, filtros digitales, filtros polifase, canalizadores.

2. Abstract

This work presents the design of a channelizer for Software Defined Radio (SDR) applications, using polyphase filters. It is also shown the general advantages of using software channelizers with respect to those used in traditional receiver architectures. Some results are presented.

Key words: software defined radio, digital filters, polyphase filters, channelizers.

3. Introducción (El radio definido por software, RDS)

El término RDS se refiere a la clase de radios reprogramables o reconfigurables. En otras palabras, la misma pieza de hardware puede realizar diferentes funciones y adaptarse a aplicaciones específicas [1]. Es un radio sustancialmente definido en software cuyo comportamiento de la capa física puede ser significativamente alterado a través de cambios a su software. El término radio definido por software generalmente se refiere a un radio que obtiene su flexibilidad a través de software mientras hace uso de una plataforma de hardware estático.

La funcionalidad de las arquitecturas de radios convencionales es principalmente determinada por hardware y una mínima configurabilidad a través de software. El hardware consiste de amplificadores, filtros, mezcladores (probablemente varias etapas), y osciladores. El software está limitado para controlar la interface con la red, procesa los encabezados y los códigos de corrección de error de los paquetes de datos, y determina hacia dónde deben ser enviados los paquetes de datos basados en la información del encabezado. Debido a que el hardware domina el diseño, actualizar un radio convencional esencialmente significa realizar un diseño completamente nuevo. Al actualizar el diseño de un RDS, la mayor parte del nuevo contenido es software y el resto son mejoras en el diseño de los componentes de hardware. En pocas palabras, los RDS representan un cambio de paradigma de radios basados en hardware fijo a radios multibanda, multimodo, basados en software [2].

La figura 1 representa la arquitectura tradicional de un radio, la cual está conformada en su mayoría por hardware. En este tipo de arquitecturas es necesario disponer de un receptor completo por cada canal. Cada canal adicional en el receptor requiere que se reproduzca una rama adicional con todo el hardware correspondiente.

La figura 2 representa la arquitectura de un RDS, se observa que en este caso se tiene una sola estructura de receptor y transmisor que sirve para manejar varios canales, además de que podría manejar varios estándares de comunicación dependiendo de la programación que se realice en la parte de software. Como puede verse la canalización es un elemento básico en la parte de software y es el módulo del que se ocupa este trabajo.

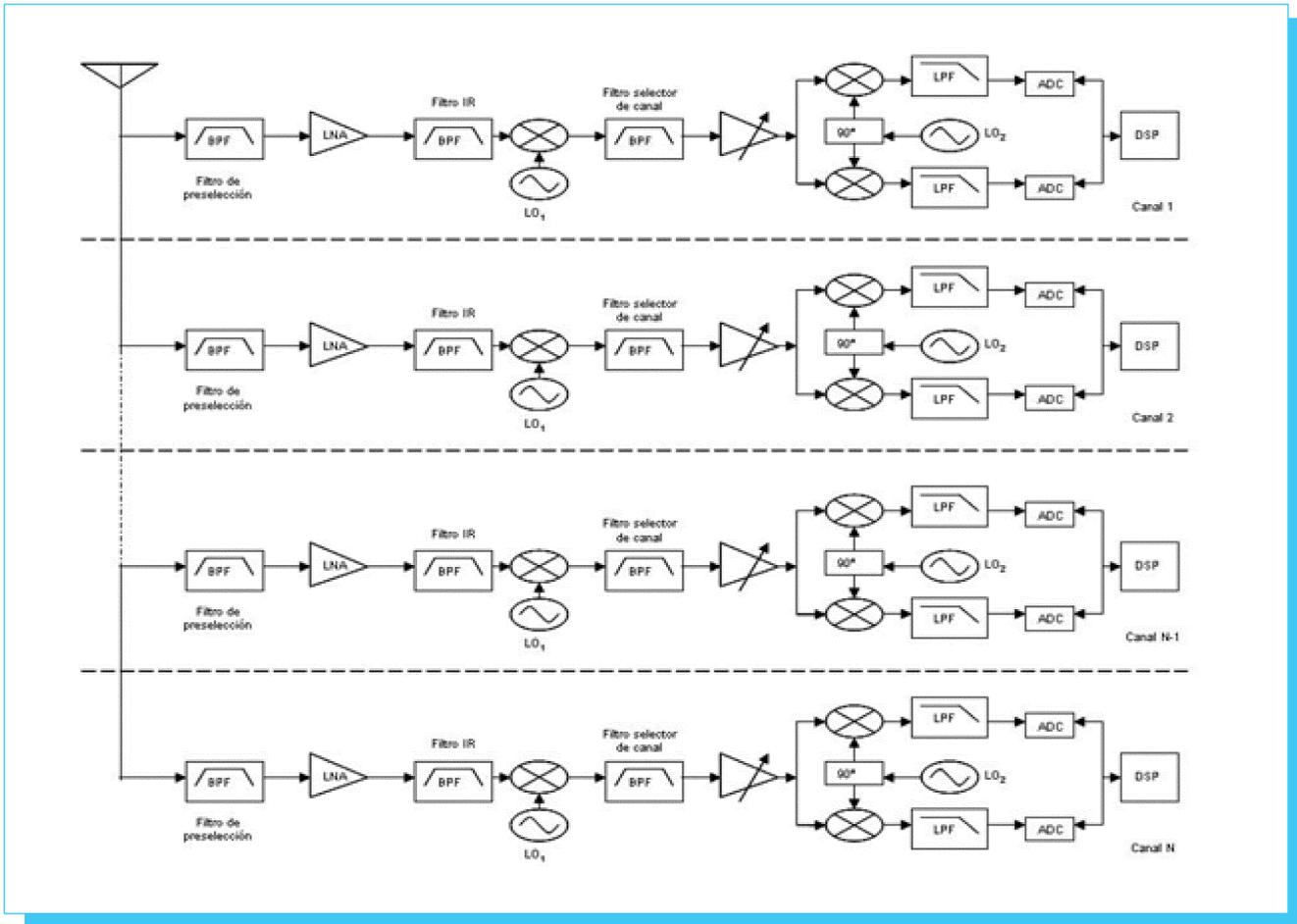


Fig. 1. Arquitectura tradicional de un radio receptor de varios canales.

4. Desarrollo

4.1. El procesamiento multitasa en RDS

Las aplicaciones de baja complejidad de procesamiento de señales digitales se pueden realizar usando una sola tasa de muestreo. Para aplicaciones de elevada complejidad, algunas veces es de beneficio alterar la tasa de muestreo usada en diferentes etapas del sistema para reducir la complejidad computacional requerida. La aplicación de procesamiento usando tasas de muestreo variables es llamada procesamiento multitasa de la señal digital [3]. Las técnicas de procesamiento multitasa pueden mejorar la flexibilidad de un radio definido por software [5].

En el caso de un sistema multimodo como una estación base, ésta es diseñada para manejar múltiples servicios, posiblemente en diferentes bandas de RF. La estación base puede digitalizar

la banda completa del enlace de subida y extraer digitalmente los canales individuales. La ventaja de este enfoque es la necesidad de una sola etapa de RF y un ADC para servir a un espectro completo de estándares. Sobre el enlace de bajada,

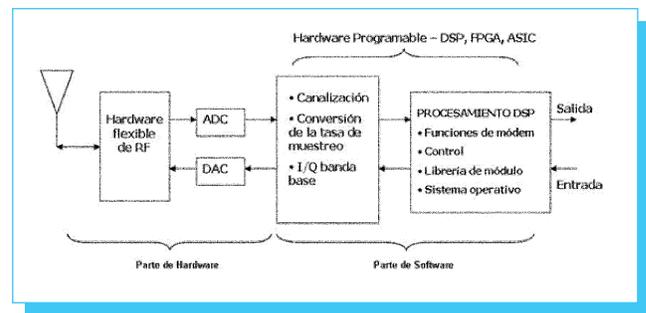


Fig. 2. Arquitectura de un RDS.

las señales pueden ser combinadas en el dominio digital, así que una sola etapa de RF y un ADC común pueden ser usados para atender a un sector de la radiobase. Esta opción de implementación puede reducir drásticamente el costo de los componentes de RF [6]. Además el costo de circuitos de alta velocidad para procesamiento de señales digitales se incrementa con la velocidad, por lo que el uso de la canalización (para tasa de muestreo más bajas) y el procesamiento en paralelo permiten el uso de circuitos de velocidad más baja, reduciendo el costo de implementación.

Filtros polifase

Una realización interesante de un filtro FIR está basada en la descomposición polifase de su función de transferencia y resulta en una estructura en paralelo. En el caso general, la descomposición polifase en L -ramas de la función de transferencia

$$H(z) = \sum_{k=0}^N h[k]z^{-k} \quad (1)$$

donde N , es de la forma

$$H(z) = \sum_{m=0}^{L-1} z^{-m} E_m(z^L) \quad (2)$$

donde

$$E_m(z^L) = \sum_{n=0}^{\lfloor (N+1)/L \rfloor} h[Ln + m]z^{-n}, \quad 0 \leq m \leq L-1 \quad (3)$$

con $h[n] = 0$ para $n > N$.

Los subfiltros $E_m(z^L)$ en la realización polifase de una función de transferencia FIR también son filtros FIR pero con la tasa de muestreo reducida en un factor L . Entonces la implementación de $H(z)$ basada en la descomposición de (2) tiene la realización que se ilustra en la figura 3, la cual está basada en filtros FIR [4].

Las estructuras polifase con frecuencia son usadas en aplicaciones de procesamiento multitasa para llevar a cabo realizaciones computacionalmente más eficientes.

Hay aplicaciones como en el caso de un analizador de espectros, donde es deseable separar una señal en un conjunto de señales sub-banda ocupando, usualmente sin traslaparse, porciones de la banda de frecuencia original. En otras aplicaciones, puede ser necesario combinar muchas de tales señales sub-bandas para formar una sola señal compuesta ocupando el rango completo de Nyquist. Para este fin, los bancos de filtros digitales juegan un papel importante [4].

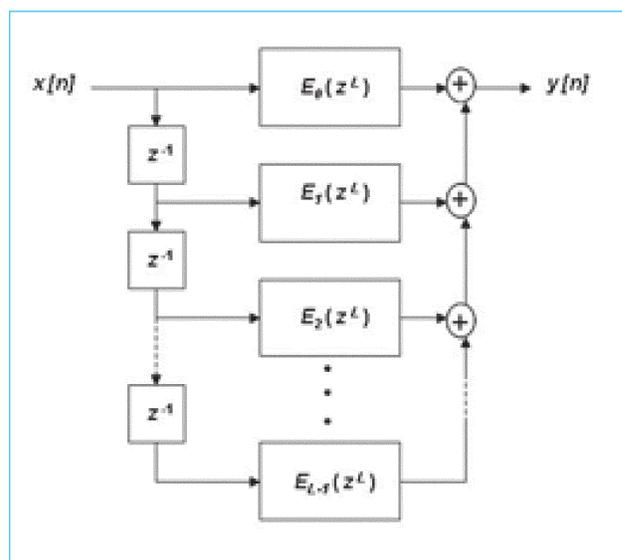


Fig. 3. Implementación polifase de $H(z)$.

5. El canalizador

El canalizador es un dispositivo que toma una señal de entrada y la separa en sus componentes espectrales.

La siguiente figura muestra un ejemplo de canalización donde la interface de radio de una estación base colecta las señales transmitidas por todas las unidades móviles y separa cada canal para su procesamiento individual. Cada nueva trama de datos que proviene de la trama de datos original tiene una tasa de datos más baja que aquella de la original; si la cadena original es de k bps, cada trama canalizada será de k/n bps,

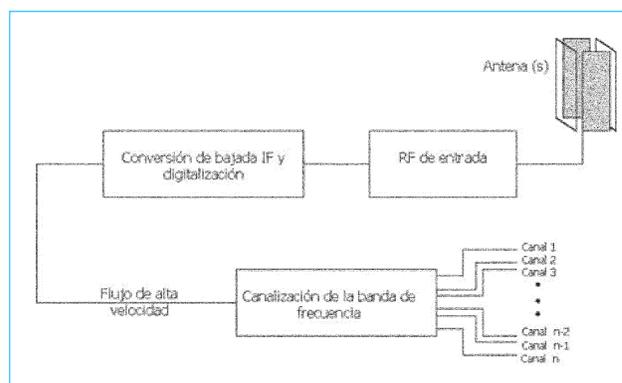


Fig. 4. Diagrama a bloques de un receptor simplificado de una estación base [6].

donde n es el número de canales. La tasa de datos más baja a la cual cada canal transmite permite la implementación paralela de algoritmos menos exigentes, permitiendo el uso de hardware menos complejo.

La tarea principal del canalizador es recibir una señal de banda ancha y enseguida separarla en canales de banda angosta.

Algunas veces, es importante para un sistema operar en diferentes modos. Esta necesidad se observa en los teléfonos celulares diseñados para operar usando diferentes estándares. Por ejemplo, la especificación de diseño puede requerir una estación base que sea capaz de manejar IS-136, (canales de 30 kHz), GSM (canales de 200 kHz), IS-95 (canales de 1.25 MHz) y WCDMA (canales de 5 MHz). Mientras que cada uno de estos estándares tiene diferentes requerimientos, es posible para un solo sistema ser capaz de manejar todos ellos.

Diseño del canalizador

Ahora esbozaremos la técnica empleada para el diseño de una clase de bancos de filtros con anchos de banda de paso iguales, que será la base para el canalizador diseñado.

Sea $H_0(z)$ un filtro digital pasabajas causal con una respuesta al impulso $h_0[n]$:

$$H_0(z) = \sum_{n=0}^{\infty} h_0[n]z^{-n}, \quad (4)$$

ahora asumamos que $H_0(z)$ tiene su borde de banda de paso ω_p y su borde de banda de paro ω_s alrededor de la frecuencia de corte $\omega_c = \pi/L$, donde L es algún entero arbitrario, como se indica en la figura 5.

Ahora consideremos la función de transferencia $H_k(z)$ cuya respuesta al impulso $h_k[n]$ se define como

$$h_k[n] = h_0[n]W_L^{-kn}, \quad 0 \leq k \leq L-1 \quad (5)$$

donde $W_L = e^{-2\pi/L}$. Por tanto

$$H_k[z] = \sum_{n=0}^{\infty} h_0[n](zW_L^k)^{-n}, \quad 0 \leq k \leq L-1 \quad (6)$$

es decir,

$$H_k[z] = H_0(zW_L^k), \quad 0 \leq k \leq L-1 \quad (7)$$

Con una correspondiente respuesta en frecuencia

$$H_k[e^{j\omega}] = H_0(e^{j(\omega-2\pi k/L)}), \quad 0 \leq k \leq L-1 \quad (8)$$

En otras palabras, la respuesta en frecuencia de $H_k(z)$ se obtiene desplazando la respuesta de $H_0(z)$ a la derecha, por una cantidad $2\pi k/L$. Las respuestas de $H_1(z), H_2(z), \dots, H_{L-1}(z)$ se muestran en la figura 5(b). Por tanto esta figura representa las respuestas de los $L-1$ filtros $H_1(z), H_2(z), \dots, H_{L-1}(z)$ las cuales son versiones uniformemente desplazadas de la respuesta del filtro prototipo básico $H_0(z)$ de la figura 5(a).

Los L filtros $H_k(z)$ definidos por la ecuación (7) pueden ser usados como filtros de análisis, donde cada uno de ellos filtrará sólo una porción del ancho de banda de la señal de entrada [3].

Entonces para el canalizador se diseña un filtro prototipo con una frecuencia de corte $\omega_c = \pi/L$, que será reproducido L veces para dar forma a un banco de filtros de análisis, sobre todo el ancho de banda de la señal de entrada. Estos filtros de análisis son los filtros polifase vistos anteriormente.

La reducción de la tasa de muestreo de la señal entrada a los filtros polifase provoca que las regiones espectrales que se

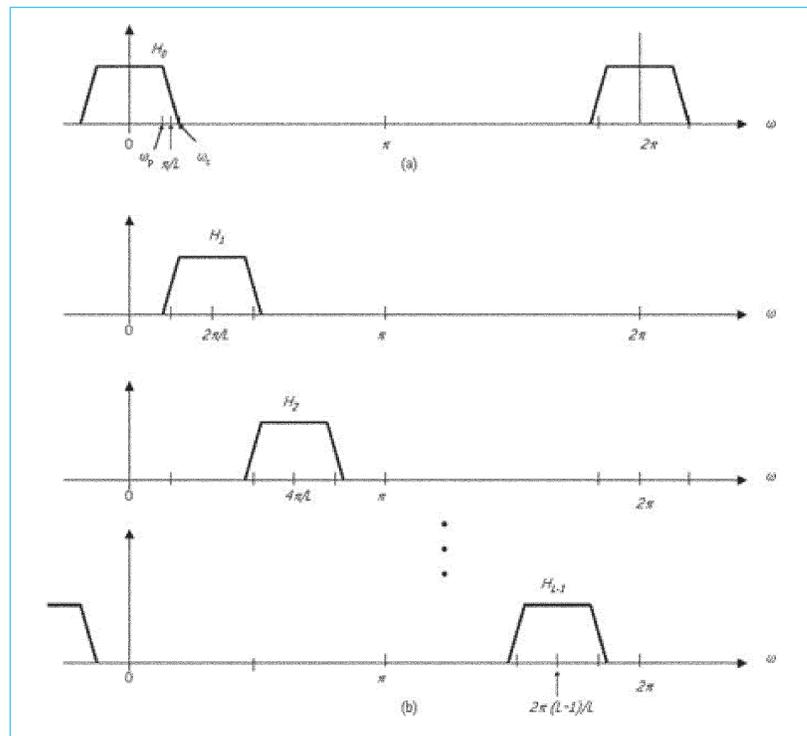


Fig. 5. El banco de M filtros $H_k(z)$ con respuestas en frecuencia desplazadas uniformemente.

encuentran a múltiplos de la tasa de muestreo de salida sean desplazadas a una banda base, con lo cual se obtiene la descomposición espectral deseada de la señal de entrada. Este efecto permite remplazar los convertidores de bajada de un canalizador estándar, implementado con mezcladores, osciladores y filtros para reducir el ancho de banda, con un único filtro particionado y la tasa de muestreo reducida.

6. Pruebas y resultados

Diseño del filtro prototipo

- Ancho de banda de la señal a descomponer de 500 kHz.
- $F_{\text{muestreo}} = 1000$ kHz.
- Banco de filtros polifase de $M = 10$ ramas.

Utilizando la función *remez()* de Matlab, que implementa el algoritmo de diseño de Parks-McClellan, se diseña un filtro FIR de fase lineal con coeficientes reales y simétricos y retardo de grupo constante. Las frecuencias de diseño para este filtro prototipo son:

$$\begin{aligned}\omega_p &= 40 \text{ kHz} \\ \omega_c &= 50 \text{ kHz} \\ \omega_s &= 60 \text{ kHz}\end{aligned}$$

La figura 6 muestra la respuesta al impulso y la respuesta en frecuencia de este filtro prototipo. El filtro tiene su frecuencia

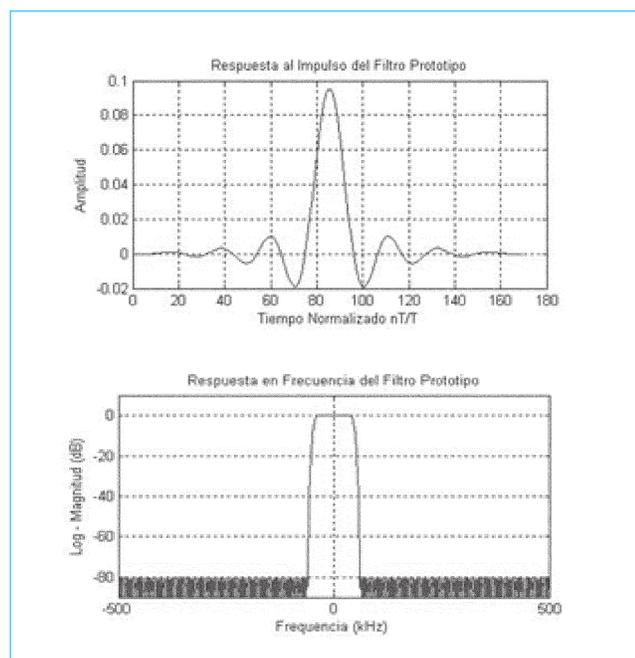


Fig. 6. Respuesta al impulso y respuesta en frecuencia del filtro prototipo.

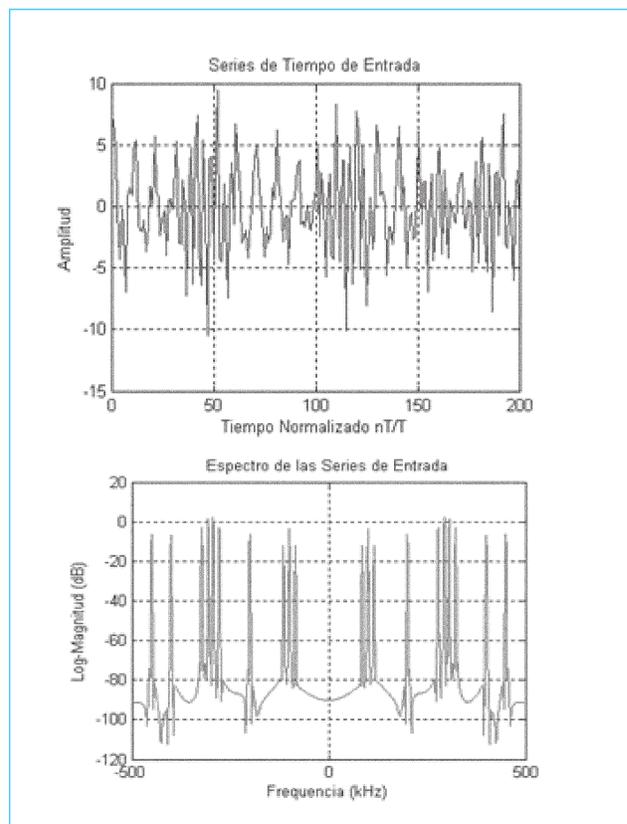


Fig. 7. Estructura en el tiempo y espectro de la señal de entrada al canalizador.

de corte en 50 kHz y al reproducirse en cada una de las 10 ramas y desplazarse, se cubre el ancho de banda de 500 kHz.

Señal de entrada

La señal de entrada puede ser cualquier mezcla de señales con componentes espectrales dentro del ancho de banda considerado de 500 kHz. En la figura 7 se muestra una señal de entrada conformada por varias componentes espectrales en el ancho de banda de interés. Se muestra su estructura en el dominio del tiempo, así como su espectro. Previo a su procesamiento por el canalizador, la secuencia de entrada es pasada por un filtro de ventana de Kaiser con factor de ventana $\beta = 8$, para atenuar los lóbulos laterales de las componentes fundamentales. La atenuación de dichos lóbulos como puede verse en la figura 7, es de alrededor 60 dB.

Canalizador

En la figura 8 se muestra el espectro de la señal de entrada, así como la respuesta en frecuencia de los subfiltros $H_0, H_1, H_2,$

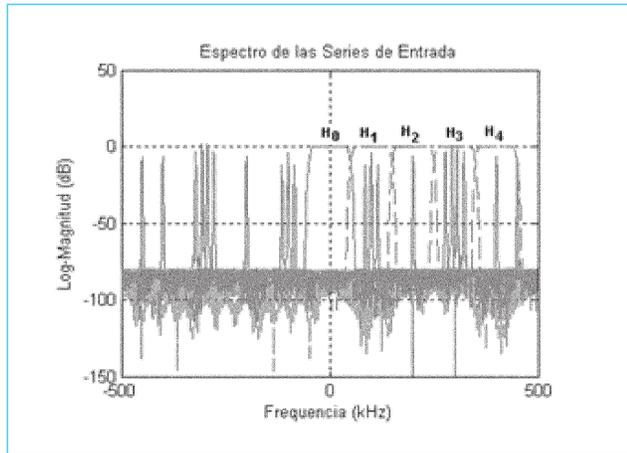


Fig. 8. Espectro de la señal de entrada y respuesta en frecuencia de los filtros $H_0(z)$ a $H_4(z)$.

H_3 y H_4 . De esta figura se observa que no existe ninguna componente espectral de la señal de entrada en la banda de paso de H_0 y que los demás filtros si tienen componentes espectrales en sus bandas de paso respectivas.

El canalizador realiza la descomposición polifase de la señal de entrada con el banco de filtros. Cada uno de los 10 subfiltros recibe una parte de la señal de entrada de acuerdo a la expresión (3). El espectro de las señales a la salida de cada uno de los subfiltros reproduce exactamente a aquellos que aparecen en la figura 8 que corresponden a la señal de entrada antes de que sea procesada por el canalizador. De esta manera se ha logrado la descomposición espectral de la señal de entrada de acuerdo al diseño planteado. El uso de un número mayor de ramas del canalizador o subfiltros permite tener un filtrado más selectivo o una descomposición espectral en canales más angostos. De esta manera, con la sola modificación del parámetro L del canalizador (número de ramas) es posible ajustar su operación al número de canales deseado. En una arquitectura tradicional de receptor esto no se puede realizar y para el manejo de un nuevo número de canales sería necesario nuevo hardware.

7. Conclusiones

La tecnología de radio definido por software será un elemento esencial en el despliegue de las nuevas redes de comunicaciones móviles e inalámbricas. La posibilidad de reconfigurar por software la operación de un radio receptor de acuerdo a necesidades o condiciones específicas, representa un potencial muy grande desde el punto de vista operativo y comercial, ya que como se señaló, una misma plataforma de hardware puede usarse para diferentes aplicaciones de sistemas de comunicación. En este trabajo se mostró la flexibilidad que se tiene en el diseño de un canalizador dentro de una arquitectura RDS. Este canalizador fue diseñado utilizando técnicas de procesamiento multitasa y se obtuvieron muy buenos resultados. Este canalizador basado en software permite sustituir un gran número de componentes de hardware en un receptor con una arquitectura tradicional.

Agradecimientos

Este trabajo se derivó del proyecto de investigación CGPI 20050857 "Técnicas de Procesamiento Multitasa en Radio Definido por Software" financiado por el Instituto Politécnico Nacional.

8. Referencias

- [1] H. Reed Jeffrey, *Software Radio*, Prentice Hall PTR, U.S.A. 2002.
- [2] H.W. Tuttlebee Walter, *Software Defined Radio*, Wiley & Sons, Ltd. England.
- [3] Fliege N. J, *Multirate Digital Signal Processing*. John Wiley & Sons, Ltd. England, 1994.
- [4] Harris Fredric J, *Multirate Signal Processing for Communication Systems*. Prentice Hall PTR. USA 2004.
- [5] Finlay Gord, "Understanding SDR Requirements", *Wireless Systems Design*, July 2001.
- [6] Hentschel Tim, *Channelization for Software Defined Base-Station*. *Annales des Telecommunications* Vol 57 No 5-6, June 2002.

XI CNIES 2009

México, noviembre, 2009.