

UN MÉTODO PARA LA ENSEÑANZA PRÁCTICA DE LOS FILTROS SC EN LAS ASIGNATURAS DE LABORATORIO

González, Laura; Allende, Miguel A.; Bracho, Salvador.
Dpto. Tecnología Electrónica, Ing. de Sistemas y Automática
E.T.S. Ing. Industriales y de Telecomunicación. Universidad de Cantabria
Avda Castros s/n. 39005-Santander
Tel:(942) 20 15 60; Fax:(942) 20 18 73; e-mail: laura@teisa.unican.es

RESUMEN

En esta comunicación se presenta un método para la enseñanza en el laboratorio del diseño de filtros de capacidades conmutadas (SC) llegando a la simulación a nivel eléctrico. Las herramientas utilizadas van a ser Switcap, Hspice y Matlab. Una vez conocidas por los alumnos la dificultad y propiedades de este tipo de circuitos se realizan medidas en el laboratorio sobre un filtro SC fabricado previamente, con un filtro de uso comercial, o sobre el propio filtro diseñado por ellos en su versión discreta.

1. INTRODUCCIÓN

La intensificación en Microelectrónica en el plan de estudios de Ingeniería de Telecomunicación de la E.T.S. de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación de la Universidad de Cantabria, incluye una asignatura teórica y otra de laboratorio de diseño de circuitos integrados analógicos.

Después de los temas sobre tecnología y diseño de amplificadores integrados, se aborda el diseño de filtros, tanto continuos como discretos. Dentro de estos últimos se encuentran los filtros de capacidades conmutadas que adquieren una especial relevancia debido a la importancia que tienen este tipo de circuitos en aplicaciones industriales.

Antes de explicar los métodos que vamos a emplear en el trabajo de laboratorio son necesarios una serie de fundamentos teóricos, partiendo del hecho de que el diseño y simulación de un filtro continuo ya es conocido y es parte previa en el programa de la asignatura que estamos desarrollando. Basándonos en esto se da a conocer la diferencia que existe entre los sistemas discretos y los sistemas continuos, haciendo hincapié en la relación que existe entre el plano-z y el plano-s, que se explica en la parte teórica de la asignatura, y entre las frecuencias físicas en ambos planos, conocida como "prewarping" (ver ecuación [1] y figura 1). Dentro de los sistemas discretos se destaca la importancia de los circuitos de capacidades conmutadas (SC) para la realización de filtros.

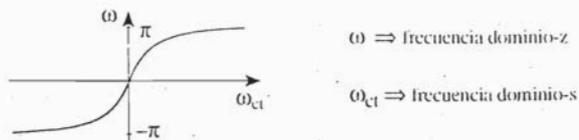


Figura 1: Relación entre frecuencias físicas en el dominio-s y en el dominio-z

$$\omega_{ct} = \frac{2}{T} \tan\left(\frac{\omega T}{2}\right) \quad [1]$$

Por ello se realiza una descripción resumida de los filtros, dando especial importancia al hecho de que mientras que el procedimiento para realizar un diseño SC tiene un nivel de dificultad análogo al procedimiento que se sigue para realizar un diseño continuo, los filtros SC tienen grandes ventajas frente a los continuos, como la precisión con que se pueden controlar las constantes de tiempo, la forma compacta de los filtros SC y una disminución del área a la hora de proceder a su integración, lo que reduce fuertemente el coste del circuito resultante [1].

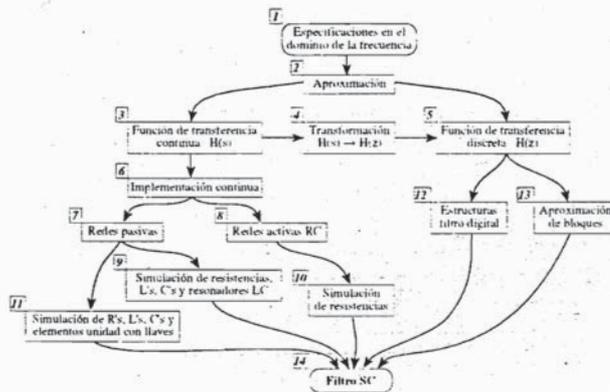


Figura 2: Esquema que muestra el procedimiento teórico para realizar el diseño de un filtro SC

2. MÉTODO DE TRABAJO EN EL LABORATORIO

Junto a la explicación, aparecen los pasos sucesivos del diseño aplicados a un ejemplo concreto, con objeto de ilustrar el desarrollo del mismo.

2.1. Diseño del trabajo práctico

A partir de las especificaciones iniciales, se realiza un diseño SC, dando especial importancia a la elección de la frecuencia de reloj, la cual debe ser lo suficientemente elevada para estar al menos un orden de magnitud por encima de las frecuencias de interés, y lo suficientemente baja para que el funcionamiento del circuito sea el correcto, una vez que se tienen en cuenta efectos de segundo orden (resistencia ON de las llaves, amplificadores operacionales no ideales, etc.).

Como paso inicial se realiza el prewarping, lo que conduce a la variación de las especificaciones de frecuencia iniciales mediante la ecuación [1]. En la figura 3 aparecen las especificaciones iniciales dadas para un caso concreto y el cambio que éstas experimentan tras realizar el prewarping.

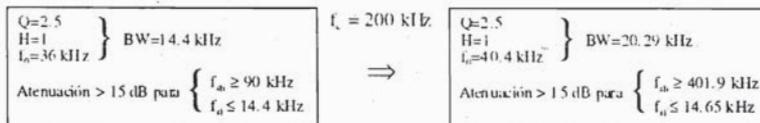


Figura 3: Especificaciones iniciales y especificaciones tras realizar el prewarping y hacer el filtro simétrico

El siguiente paso es calcular la función de transferencia tanto en el dominio continuo-s a partir de las nuevas especificaciones, como en el dominio discreto-z a través de la relación de la ecuación [2].

$$H(s) = \frac{7.53 \cdot 10^4 s}{s^2 + 7.53 \cdot 10^4 s + 4.47 \cdot 10^{10}} \frac{2.25 \cdot 10^5 s}{s^2 + 1.09 \cdot 10^5 s + 9.29 \cdot 10^{10}} \Rightarrow H(z) = \frac{0.13(z^2 - 1)}{z^2 - 0.98z + 0.74} \frac{0.30(z^2 - 1)}{z^2 - 0.45z + 0.71}$$

Figura 4: Función de transferencia en los dominios s y z

$$S_{ct} = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1} \quad [2]$$

La función resultante se expresa como el producto de dos términos de segundo orden implementables cada uno de ellos mediante un biquad. En el diseño de cada filtro de segundo orden se opta por alguna de las topologías que ya han sido estudiadas [2], ya que posiblemente el efecto de las capacidades parásitas sea mínimo.

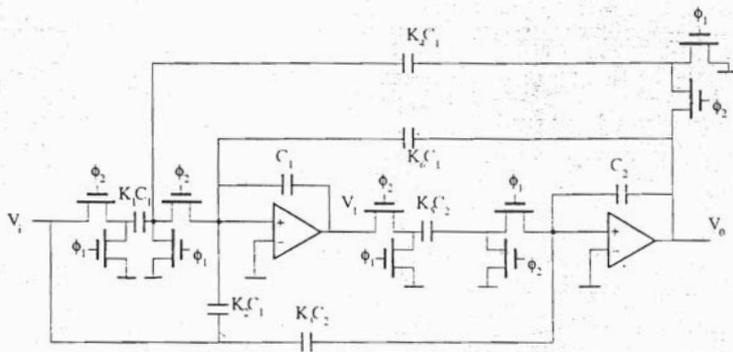


Figura 5: Posible arquitectura para implementar un biquad SC

El último paso consiste en calcular los valores de las relaciones entre las capacidades que aparecen en el circuito elegido, de tal forma que éste quede completamente caracterizado, y se pueda proceder a una primera simulación. Para ello hay que analizar el circuito [3] con el objeto de poder comparar la función de transferencia que pretendemos obtener, con la del biquad elegido. Una ventaja de realizar este análisis es saber cual es el comportamiento exacto del filtro, como pueda ser en qué fase de reloj se debe tomar la salida (en la fase en la que permanezca constante o bien al final de la fase en que la salida varíe), y en qué fase se debe aplicar la entrada, añadiendo un muestreador en el caso de que fuera necesario. De esta manera el filtro queda definido.

BIQUAD 1	BIQUAD 2
$k_1=0$	$k_1=0$
$k_2=0.29$	$k_2=0.54$
$k_3=0.13$	$k_4=0.30$
$k_5=k_6=0.87$	$k_5=k_6=1.12$
$k_7=0.29$	$k_7=0.26$

Figura 6: Valores de las relaciones entre capacidades

2.2. Realización práctica (simulación)

En este paso lo que se pretende es comprobar que el funcionamiento del circuito utilizando modelos ideales es el correcto. Para ello se utiliza el programa Switcap [4], que es el adecuado para la simulación de los circuitos SC, a nivel de llaves, condensadores y amplificadores operacionales (modelados como fuentes de tensión controlados por tensión), ya que permite realizar simulaciones en el dominio de la frecuencia de un modo directo.

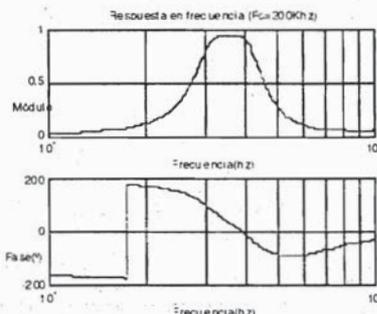


Figura 7: Resultado de la simulación con switcap

Una vez que se ha comprobado el funcionamiento del circuito, se miden una serie de características, como pueden ser la frecuencia central, el ancho de banda, el rizado en la banda de paso, la atenuación en la banda de rechazo, etc., que forman los parámetros que caracterizan el comportamiento de cualquier filtro. Estas medidas y simulaciones únicamente son válidas en los primeros pasos de diseño, pero son las adecuadas para comprobar de un modo sencillo que el circuito funciona.

Es necesario dar importancia a la frecuencia de reloj. Para ello es conveniente realizar una serie de simulaciones cambiando dicha frecuencia de muestreo, y comprobando el efecto que se produce cuando ésta disminuye (distorsión de la función de transferencia, y desplazamiento de ésta hacia frecuencias inferiores) y cuando aumenta (desplazamiento de la función de transferencia hacia frecuencias superiores). Con esto se pretende dejar claro que un filtro SC una vez diseñado puede trabajar a otra frecuencia de reloj, pero las especificaciones de éste variarán.

Posteriormente se simula el filtro SC, teniendo en cuenta efectos de segundo orden. Se destaca que hasta ahora se ha considerado que el filtro diseñado trabajaba idealmente (por ejemplo la relación entre capacidades era exacta y las llaves y los amplificadores operacionales eran ideales), y de ahí que fuera adecuado realizar una simulación con Switcap, sin embargo para incorporar los efectos de segundo orden, tales como la resistencia ON de las llaves, es necesario realizar una simulación más completa con Hspice. Los criterios que hay que tener en cuenta son:

- El ancho de banda del amplificador operacional tiene que ser aproximadamente y por lo menos 5 veces la frecuencia de reloj, para que los errores tanto en la ganancia como en la fase sean despreciables.
- El tiempo de asentamiento a la salida del operacional debe ser menor que la mitad del periodo de muestreo para permitir que la carga transferida alcance su valor correcto.
- Las llaves diseñadas serán llaves CMOS. La frecuencia de reloj debe ser tal que en cada semiperiodo el circuito pueda alcanzar el estado estacionario. Esto depende de la resistencia ON de la llave. En la mayoría de los casos las limitaciones de los amplificadores operacionales imponen mayores restricciones en la frecuencia de reloj que la resistencia ON de las llaves. Las

llaves tendrán que cargar a las capacidades del circuito. El valor de la capacidad más pequeña que aparece en el circuito estará en torno a los 0.5 pF.

- Las señales de reloj no deben ser solapadas, de tal forma que incluso habrá instantes en los que no haya ninguna llave conduciendo.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones se puede realizar una simulación en el dominio del tiempo con Hspice, y comprobar que bajo la introducción de una señal sinusoidal de frecuencia igual a una de las frecuencias en la banda de paso, el circuito responde con otra señal sinusoidal amplificada una cantidad igual al valor de la ganancia. Se recomienda realizar estas operaciones por separado para cada biquad con el fin de que si existe algún error poder detectarlo sin problema.

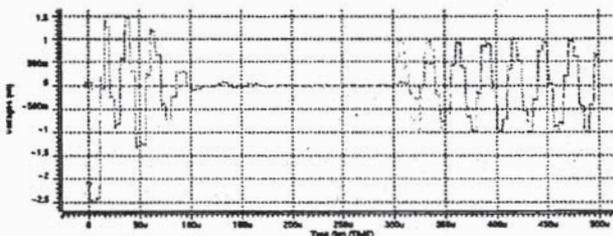


Figura 8: Señal de salida del filtro para señal de entrada sinusoidal

Para hacer un análisis en el dominio de la frecuencia es necesario introducir un impulso, que realmente será un pulso aplicado en la fase de reloj en la cual se aplica la entrada y de duración tal que en el siguiente periodo haya vuelto a tomar el valor de 0 lógico. En la salida se toma un número igual a una potencia de dos de muestras a las cuales se les aplica la FFT utilizando el programa Matlab. De esta forma se obtiene la función de transferencia y se pueden medir algunos de los parámetros que caracterizan el filtro.

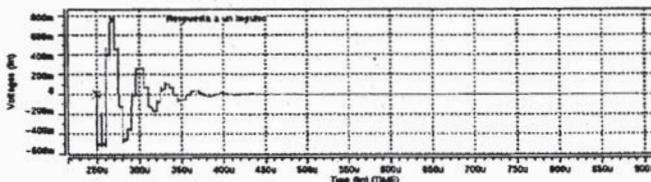


Figura 9: Respuesta del filtro a una señal impulso

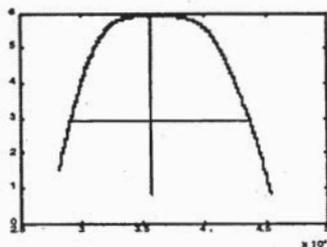


Figura 10: Función de transferencia resultante tras aplicar la FFT

Por último, y para hacer notar el efecto que produce el solapamiento de las señales de reloj, se vuelve a realizar un análisis en frecuencia, cuando existe un solapamiento del 50%, y cuando existe un solapamiento del 100%. Con todo esto termina la etapa de diseño a nivel de circuito del filtro elegido.

2.3. Realización de las medidas y resultados

Con el objeto de poder realizar una serie de medidas de circuitos de capacidades conmutadas proponemos la utilización de alguno de los filtros ya integrados en el Departamento de Tecnología Electrónica, Ingeniería de Sistemas y Automática y desarrollados en el marco de Proyectos Fin de Carrera/Tesinas de Licenciatura. En este trabajo práctico se trata de hacer un barrido en frecuencia de la señal sinusoidal de entrada, de modo que se pueda medir los valores que toman los parámetros característicos de cada filtro.

Asimismo, se varía la frecuencia de reloj, y se vuelve a realizar otro barrido en frecuencia. Con esto se pretende comprobar que las características generales que hemos deducido tras realizar el diseño de un filtro SC se manifiestan en otros filtros de este tipo.

3. CONCLUSIONES

Se propone un procedimiento para la enseñanza práctica del diseño de filtros de capacidades conmutadas así como el método para la realización de las medidas de laboratorio de los circuitos resultantes, dentro de la asignatura de laboratorio de diseño de circuitos integrados analógicos, en la intensificación de microelectrónica de la Ingeniería de Telecomunicación.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. E. Allen, E. Sánchez-Sinencio. "Switched Capacitor Circuits". Van Nostrand Reinhold Company Inc. 1984.
- [2] R. Schaumann, M. S. Ghauri, K. R. Laker. "Design of Analog Filters: passive, active RC and switched capacitor". Prentice Hall series in Electrical Engineering. 1990.
- [3] E. J. Peralías. "Un método de análisis a mano para circuitos con arquitectura SC". *TAAE-96, II Congreso de Tecnologías Aplicadas a la Enseñanza de la Electrónica..* Pags 469-475. Septiembre, 1996.
- [4] S.C. Fang. "Switcap user's guide". Department of Electrical Engineering. Columbia University. New York, 1982.