

Síntesis automatizada de filtros analógicos para aplicaciones de radio frecuencia mediante herramienta EDA de análisis simbólico en MATLAB

ARTURO CORONA NIEVA¹, SONIA MARIBEL GONZÁLEZ LOZOYA², FIDELA ALEJANDRA SOLÍS GUTIÉRREZ², IVÁN CASTILLO BRAVO¹, LUIS ABRAHAM SÁNCHEZ GASPARIANO³, ESTEBAN TLELO CUAUTLE⁴, AND CARLOS MUÑOZ MONTERO³

¹Maestría en Ingeniería en Automatización de Procesos Industriales, ²Maestría en Ingeniería en Sistemas y Cómputo Inteligente, ³Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad Politécnica de Puebla, 3er Carril del Ejido Serrano S/N, San Mateo Cuauhtlan, Puebla, CP 72640.

⁴Departamento de Electrónica, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Luis Enrique Erro No. 1, Santa María Tonantzintla, Puebla, C.P. 72840.

Compiled 25 de septiembre de 2017

Resumen. Se presenta una interfaz gráfica en MATLAB a través de la cual el usuario introduce requerimientos de diseño de filtros analógicos para aplicaciones de Radio Frecuencia y obtiene la red eléctrica con la cuál es posible realizar la función pasa bajas requerida. A partir de esta red, el usuario puede realizar la transformación que sea de interés, pasa banda o de muesca, y así obtener el circuito final, el cual es validado con una herramienta de análisis simbólico de circuitos eléctricos y electrónicos en MATLAB (SCAM por sus siglas en inglés).

Palabras clave: Análisis simbólico, filtros analógicos, Radio Frecuencia (RF), SCAM, herramienta EDA, interfaz gráfica de usuario (GUI).

© 2017 Universidad Politécnica de Puebla

OCIS codes:

<http://dx.doi.org/10.1364/ao.XX.XXXXXX>

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día las herramientas EDA (Electronic Design Automation, por sus siglas en inglés) son la base del avance tecnológico en tecnologías de circuitos integrados. Por lo tanto, la mejora y desarrollo de este tipo de software es primordial para el diseño y optimización de circuitos integrados analógicos, digitales y de señal mezclada [1]. Estudiantes de ingeniería y posgrado así como investigadores en áreas de diseño electrónico hacen uso de las herramientas EDA para facilitar el análisis de circuitos electrónicos, ya que evaluar el comportamiento de un circuito en particular que contiene miles o incluso millones de transistores es una tarea compleja. Existen algunas alternativas comerciales mediante las cuales es posible realizar dicha tarea de forma numérica, como es el caso de CADENCE [2], Mentor Graphics [3] y Synopsis [4], por citar algunas de las más populares. Sin

embargo, algunos grupos de investigación han desarrollado sus propias herramientas de análisis que atienden de manera específica alguna característica de interés en el análisis de circuitos, tal es el caso del análisis simbólico, que es una técnica para generar expresiones analíticas acerca del desempeño de un circuito en términos de los parámetros de los componentes del mismo [5] y que es un buen complemento del análisis numérico en el diseño y simulación de circuitos integrados.

SCAM (Symbolic Circuit Analysis in MATLAB), es una herramienta propuesta por Erik Cheever [6], profesor de la universidad de Swarthmore, que se ejecuta desde MATLAB y que realiza el análisis simbólico para la solución de circuitos electrónicos que contienen resistores, capacitores, inductores, op-amps y fuentes de voltaje y corriente [6]. SCAM utiliza el Análisis Nodal Modificado (MNA por sus siglas en inglés) [7] para la generación de las ecuaciones del circuito. Posteriormente, resuelve el sistema de ecuaciones generado para obtener los voltajes nodales y las corrientes de las fuentes de excitación en forma simbólica. Una aplicación que puede realizarse con SCAM es la síntesis de filtros analógicos aprovechando las herramientas con las que MATLAB cuenta para graficar funciones tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia de un sistema dinámico, por ejemplo, las trazas de bode.

En este trabajo se presenta una herramienta EDA que consiste en una interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas en inglés) en MATLAB a través de la cual el usuario introduce requerimientos de diseño de un filtro analógico para aplicaciones de Radio Frecuencia (RF) y obtiene la red eléctrica con la cuál es posible realizar la función pasa bajas requerida. A partir de esta red, el usuario puede realizar la transformación que sea de interés, pasa banda o de muesca para el caso de aplicaciones de RF, y así obtener el circuito final, el cual es validado con SCAM. El artículo está organizado de la siguiente forma: la sección 2 describe las generalidades del filtrado analógico; posteriormente, en la sección 3, se formula la síntesis de filtros analógicos a través de las aproximaciones de Butterworth, Chebyshev y Cauer; la GUI propuesta para la síntesis de filtros de RF se presenta en la sección 4 junto con un ejemplo de diseño de un pasa banda para aplicaciones médicas inalámbricas; finalmente, las conclusiones

se encuentran en la sección 5.

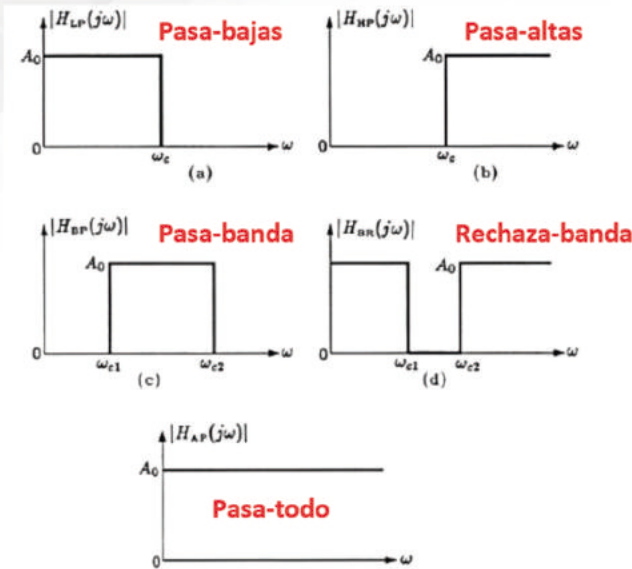


Fig. 1. Gráficas de cada tipo de respuesta de los filtros.

2. FILTROS ANALÓGICOS

Los filtros eléctricos pueden clasificarse de acuerdo al tipo de señales que estos manejan en filtros digitales, que trabajan con señales discretas, y filtros analógicos, que trabajan con señales continuas [8]. Los filtros analógicos son circuitos que, típicamente, se emplean en sistemas de interfaz, i.e. sistemas donde se transduce una señal de la naturaleza (temperatura, humedad, intensidad del viento, etc.) a una señal eléctrica así como en actuadores que convierten una señal eléctrica a una señal que puede interactuar directamente con la naturaleza [9]. Un filtro analógico lineal, que es el caso de interés en el presente trabajo, manipula de forma prescrita la magnitud y/o fase de la señal de entrada. Si la magnitud es la que se modifica, entonces se tienen respuestas bien definidas en el dominio de la frecuencia que describen al filtro, tal es el caso de las respuestas de tipo pasa-bajas, pasa-altas, pasa-banda y rechaza-banda, las cuales se ilustran en la Figura 1. El uso de filtros analógicos con un tipo de respuesta en frecuencia en particular depende de la aplicación, por ejemplo, en sintonizadores de radio se utiliza filtros pasa-banda con el objetivo de sólo permitir el paso de la señal de radio en un ancho de banda determinado [10].

Para generar un tipo de respuesta en particular se hace uso de ciertas especificaciones que determinan la banda de frecuencia de trabajo, la atenuación en las bandas que no son de interés y el nivel de rizo en la banda de paso del filtro [9]. Existe una teoría matemática bien desarrollada a este respecto, la cual ha alcanzado tal grado de sofisticación, que incluso se puede realizar síntesis de filtros analógicos pasivos y activos a partir de las características antes mencionadas [10]. Las aproximaciones comúnmente utilizadas son la de Butterworth, Chebyshev y Cauer. La primera exhibe una respuesta plana mientras que las otras tienen risos en sus bandas de paso y/o rechazo.

3. SINTESIS DE FILTROS ANALÓGICOS

En la síntesis de un filtro analógico las especificaciones comúnmente requeridas para el filtro son el factor de rizo (α_p)

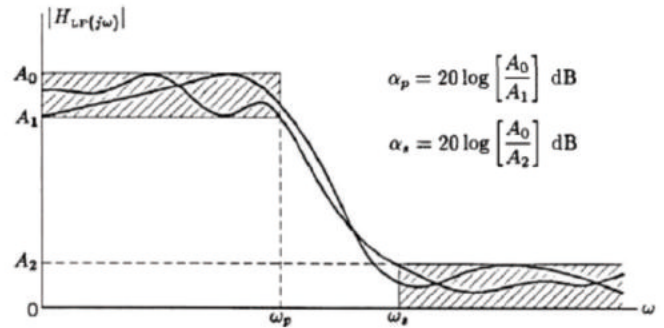


Fig. 2. Respuesta característica del filtro pasa-bajas y sus parámetros de diseño

y de atenuación (α_s), así como la relación de transición entre las frecuencia de paso y de rechazo (ω_s/ω_p). En la Figura 2 se presentan las características mencionadas anteriormente para el caso específico de un filtro pasa-bajas estándar, donde, A_0 se conoce como la ganancia máxima permitida, A_1 es la ganancia mínima permitida y A_2 se refiere a la máxima atenuación, ω_s y ω_p son las frecuencias de borde de las bandas de paso y de rechazo, respectivamente. Típicamente, para un filtro de este tipo se desea un factor de rizo de valor pequeño, un factor de atenuación grande y la relación de transición aproximadamente de valor unitario.

La respuesta mostrada en la Figura 2 puede abordarse por medio de funciones de transferencia basadas en aproximaciones polinomiales. La aproximación Butterworth es una de las más utilizadas por su baja complejidad matemática. La función de magnitud para un filtro Butterworth se describe mediante [9]:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \omega^{2n}} \quad (1)$$

donde n es el orden del polinomio y a su vez el orden del filtro. En base a las especificaciones del filtro es posible determinar el orden de la aproximación Butterworth a través de la siguiente ecuación [9]:

$$n = \log\left(\frac{10^{0.1A_{min}-1}}{10^{0.1A_{max}-1}}\right) / 2\log\left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right) \quad (2)$$

Dado que el orden del filtro debe ser entero, debemos aproximar el resultado de la Ec. 2 al entero más cercano. La aproximación Butterworth no presenta rizo en las bandas de paso y atenuación, por tal motivo también se le conoce como aproximación máximamente plana, pero tiene la desventaja de que el orden del filtro es muy grande y por tanto la realización física del filtro presenta un factor de forma voluminoso. Con la aproximación Chebyshev, es posible satisfacer los requerimientos de diseño con un orden reducido aunque con rizo en alguna de las bandas.

La función de magnitud para el filtro Chebyshev está dada por [9]:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + E^2 C_n^2(\omega)} \quad (3)$$

donde C_n es el polinomio Chebyshev de orden n . El orden del filtro se puede determinar mediante [9]:

$$n \geq \cos^{-1}\left(\sqrt{C_n^2\left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right)}\right) / \cos^{-1}\left(\frac{\omega_s}{\omega_p}\right) \quad (4)$$

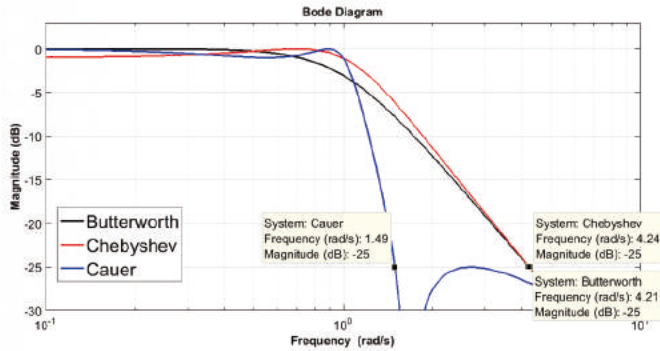


Fig. 3. Respuesta en frecuencia para aproximación Butterworth, Chebyshev y Cauer

Finalmente, es posible generar una respuesta con rizo en ambas bandas, la de paso y la de rechazo, que satisface las demandas de desempeño del filtro con un factor de forma aún menor que las dos aproximaciones anteriores pero con una complejidad matemática mayor. Se trata de la aproximación de Cauer o elíptica, la cual se expresa como [9]:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + E^2 R_n^2(\omega)} \quad (5)$$

donde R_n^2 es el polinomio de Cauer. En esta aproximación es común el uso de tablas para la determinación del orden del filtro dadas las especificaciones de diseño requeridas. Estas tablas pueden ser consultadas en el apéndice A de [11].

Existe una alternativa para generar las funciones de transferencia de tipo Butterworth, Chebyshev y de Cauer en MATLAB. Para esto, se hace uso de las funciones `buttap`, `cheb1ap` y `ellipap`. Los parámetros que hay que introducir son las frecuencias en radianes de la banda de paso y rechazo así como los valores de rizo en dichas bandas. Por ejemplo, si deseamos un filtro de segundo orden con un rizo de 1dB y una atenuación de 25dB, se tiene la respuesta en frecuencia mostrada en la Figura 3, donde se presenta una comparación de las tres aproximaciones mencionadas anteriormente. No obstante, estas respuestas se generan a partir de las funciones de transferencia y lo que se persigue en la síntesis de filtros es obtener la red eléctrica que genere dichas respuestas.

4. GUI PROPUESTA PARA LA SÍNTESIS DE FILTROS ANALÓGICOS DE RF EN MATLAB

Hoy en día son escasas las publicaciones reportadas de herramientas EDA para la síntesis de filtros analógicos para radio frecuencia [11],[12], aquí se presenta una herramienta para tal propósito. En la Figura 4 se muestra el diagrama de flujo de la GUI propuesta. Como puede verse, el usuario introduce en específico 3 parámetros de interés: los factores de rizo (α_p) y de atenuación (α_s) así como la relación de

transición (ω_s/ω_p). Con estos datos el programa determina el orden del filtro pasa bajas para alguna aproximación determinada (Butterworth o Chebyshev), posteriormente genera la topología circuital correspondiente e introduce dicho circuito a SCAM para que éste realice la respuesta en frecuencia del filtro. Finalmente, con las trazas de Bode obtenidas, el usuario corrobora en que medida se satisfacen las especificaciones de diseño requeridas. En caso de no tener la respuesta deseada, el usuario puede volver a introducir nuevos valores de (α_p), (α_s)

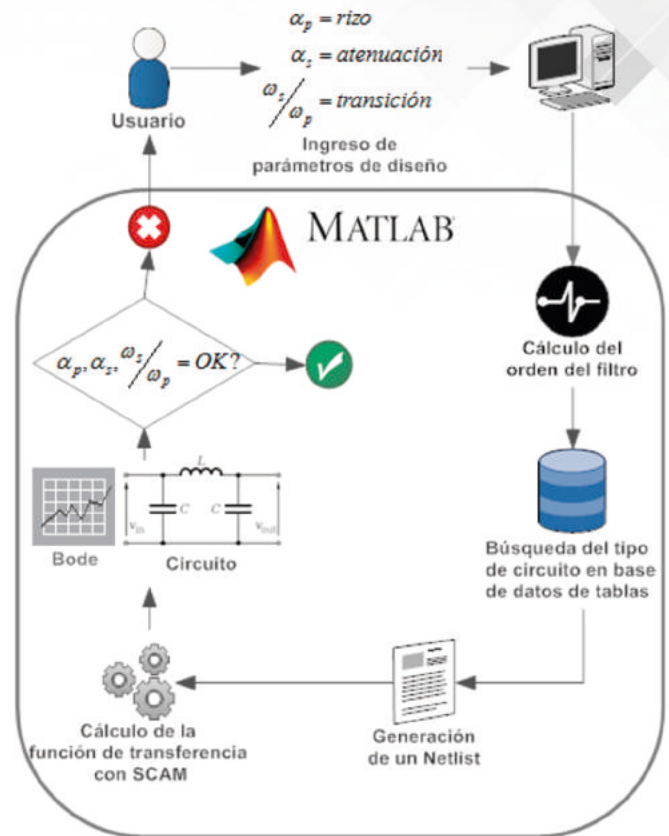


Fig. 4. Diagrama de flujo de la GUI propuesta para la síntesis de filtros analógicos para RF

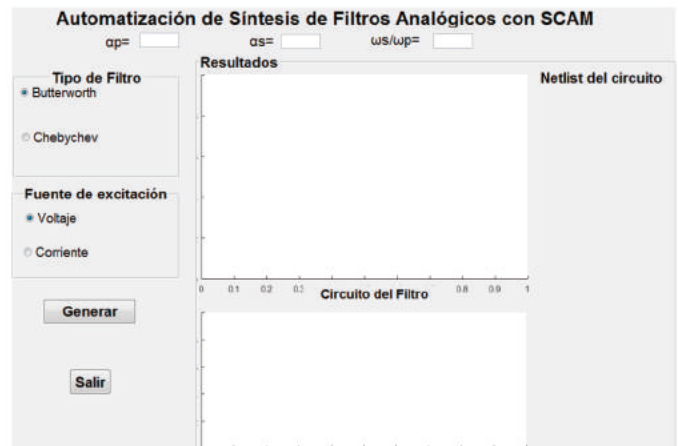


Fig. 5. Diseño de la interfaz gráfica de usuario.

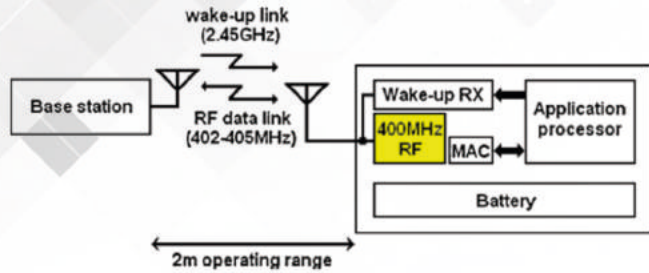


Fig. 6. Ejemplo de un circuito de RF para aplicaciones médicas inalámbricas.

o (ω_s/ω_p) para modificar la respuesta en frecuencia a una similar a la requerida. Por otra parte, si la respuesta obtenida es la deseada, el usuario puede realizar la transformación del circuito generado por la GUI a una aproximación pasa banda o rechaza banda a la frecuencia y ancho de banda de interés. La Figura 5 muestra la interfaz gráfica de usuario realizada. Cabe mencionar que esta pantalla es la que ve el usuario antes de introducir los parámetros del filtro deseado. Una vez que se generan la síntesis y respuesta en frecuencia del filtro realizado por el programa, la interfaz muestra la red eléctrica, la lista de descripción (netlist) de la red y la respuesta en frecuencia de la misma. En el siguiente ejemplo de diseño se ilustrará esto.

Se propone el diseño del filtro pasa banda para aplicaciones médicas inalámbricas mostrado en la Figura 6 (en amarillo). La banda de frecuencia utilizada va de los 402MHz a los 405MHz, un factor de rizo de 1dB, una

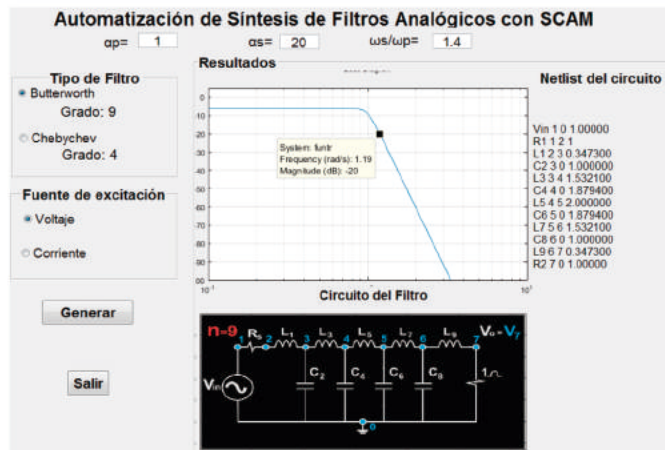


Fig. 7. Resultado de la síntesis del filtro Butterworth pasa bajas del ejemplo de la Figura 6.

atenuación de -20dB y una relación de transición de 1.4. Se realiza la síntesis del filtro mediante la GUI propuesta. Al ingresar los requerimientos de diseño al programa se selecciona el tipo de aproximación Butterworth y nos muestra el orden mínimo del filtro, en este caso 9, y seleccionamos excitación por fuente de voltaje. El resultado mostrado en la Figura 9 cumple con las especificaciones requeridas y el programa proporciona el circuito del filtro para llevar a cabo su implementación física, cabe mencionar que el resultado es un circuito con terminación doble resistiva. Debido a que la respuesta que se obtuvo es a una frecuencia normalizada de 1 rad/seg, se realiza un escalamiento en frecuencia para obtener una respuesta pasa banda a

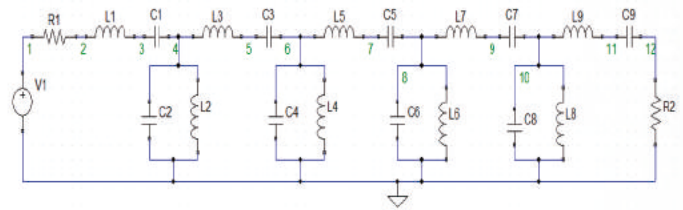


Fig. 8. Circuito Butterworth pasa banda sintetizado del ejemplo de la Figura 6.

una frecuencia central de 403.5MHz y ancho de banda de 3MHz. También, se realiza un escalamiento en impedancia para modificar a valores comerciales los elementos del circuito. Al graficar mediante SCAM las trazas de Bode del circuito mostrado en la Figura 11, se obtiene la respuesta deseada para el filtro. Se puede observar que la frecuencia central es en efecto de 403.5MHz mientras que las caídas de -3dB por los flancos izquierdo y derecho, respectivamente, ocurren a 402MHz y 405MHz. De éste resultado, puede concluirse que mediante el uso de la GUI propuesta es posible sintetizar redes eléctricas cuyas funciones de transferencia presenten un comportamiento en frecuencia que se adecua a los requerimientos de diseño de filtros analógicos para aplicaciones de RF.

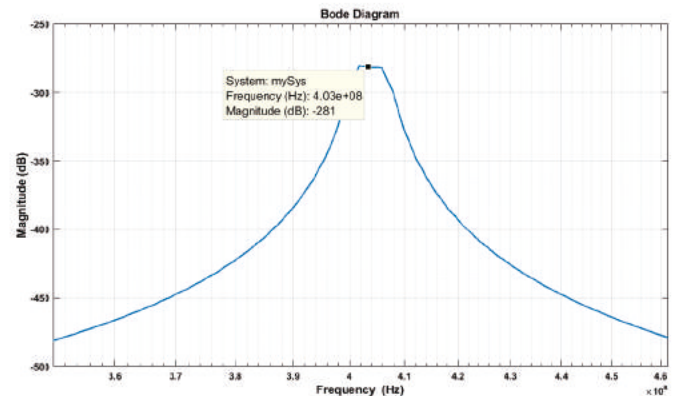


Fig. 9. Respuesta en frecuencia de la magnitud de la función de transferencia del filtro pasa banda sintetizado.

REFERENCIAS

1. L. Lavagno, L. Scheffer, and G. Martin, *EDA for IC implementation, circuit design, and process technology* (CRC press, 2006).
2. M. Kubař and J. Jakovenko, "Novel analog synthesis tool implemented to the cadence design environment," in "Symbolic and Numerical Methods, Modeling and Applications to Circuit Design (SM2ACD), 2010 Xlth International Workshop on," (IEEE, 2010), pp. 1–5.
3. M. K. Bhatti, A. A. Minhas, M. Najam-ul Islam, M. A. Bhatti, Z. U. Haque, and S. A. Khan, "Curriculum design using mentor graphics higher education program (hep) for asic designing from synthesizable hdl to gdsii," in "Teaching, Assessment and Learning for Engineering (TALE), 2012 IEEE International Conference on," (IEEE, 2012), pp. W1D–1.
4. R. Goldman, K. Bartleson, T. Wood, A. Watson, V. Melikyan, E. Babayan, and T. Hakhverdyan, "Ic design course based on the synopsys designware arc 600 processor core and 32/28nm educational design kit," in "Interdisciplinary Engineering Design Education Conference (IEDEC), 2014 4th," (IEEE, 2014), pp. 66–69.

5. G. Shi, S. X.-D. Tan, and E. T. Cuautle, *Advanced Symbolic Analysis for VLSI Systems* (Springer, 2014).
6. E. Cheever, Swarthmore College, <http://www.swarthmore.edu> (2005).
7. E. Cheever, *Computers in Education Journal* (2005).
8. V. K. Ingle and J. G. Proakis, *Digital Signal Processing Using MATLAB: A Problem Solving Companion* (Cengage Learning, 2016).
9. K. Su, "Analog filters. 2nd," (2002).
10. R. Schaumann, H. Xiao, and V. V. Mac, *Design of Analog Filters 2nd Edition* (Oxford University Press, Inc., 2009).
11. L. P. Huelsman and P. E. Allen, *Introduction to the theory and design of active filters* (McGraw-Hill College, 1980).
12. C.-S. Chen and T.-C. Lo, "The rf/microwave research and development activities of taiwan companies using agilent eesof eda solutions," in "Microwave Conference Proceedings (APMC), 2012 Asia-Pacific," (IEEE, 2012), pp. 878–880.