

PERIODIC STEADY-STATE AND ENVELOPE METHODS FOR THE ANALYSIS OF RADIO FREQUENCY CIRCUITS

Aline de Oliveira e Eduardo Gonçalves de Lima

Universidade Federal do Paraná - UFPR

Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Politécnico – Curitiba - PR

alinedeoliveira2012@gmail.com, elima@eletrica.ufpr.br

Abstract. The high frequencies handled by radio frequency (RF) circuits put a lot of challenges for the designer. The availability of computer aided-design (CAD) tools can be of great help in this process. The traditional transient analysis requires an extremely huge amount of calculations when dealing with RF circuits. This work addresses the most widely adopted CAD tools dedicated to the design of RF circuits. The frequency-domain and time-domain periodic steady-state tools, known as harmonic balance and shooting method, are first investigated. Two envelope methods, named circuit envelope and envelope following, are then studied. The four techniques are applied to a circuit-under-test in MATLAB software.

Palavras-chave: Circuito RF, Não linear, Simulação

1. INTRODUÇÃO

No projeto de circuitos eletrônicos existem etapas que são indispensáveis para um melhor desempenho. Dentre estas etapas está a simulação. A simulação permite estimar o comportamento do circuito antes de sua fabricação. Dessa forma, é possível efetuar, de maneira mais rápida, os devidos ajustes para que o produto final atenda as especificações. Tradicionalmente, para a simulação de circuitos eletrônicos analógicos em regime não linear, utiliza-se a análise de transitório. Contudo, para a simulação de circuitos que operam com altas frequências, chamados circuitos rádio frequência (RF), a análise de transitório exige uma quantidade de cálculos extremamente elevada. Dessa forma, na literatura encontram-se diversos métodos de análise específicos para circuitos RF [1]-[3]. Este trabalho aborda o estudo, a compreensão e a implementação dos principais métodos de análise de circuitos RF.

2. ANÁLISE DE GRANDES SINAIS

Também chamada de estado periódico estacionário, esta análise não linear aplica-se a circuitos RF sujeitos a estímulos periódicos no tempo [1]. A resposta em regime permanente é obtida diretamente, sem a necessidade de simular o comportamento transitório do circuito. Há duas técnicas distintas para a sua execução: o equilíbrio harmônico e o método do tiro.

2.1. Equilíbrio harmônico

O equilíbrio harmônico (EH) consiste em uma análise no domínio da frequência [1]. Usando o método dos nós modificado, para cada tensão nodal e corrente sobre fonte de tensão definem-se $(2N+1)$ incógnitas. Uma incógnita refere-se a componente CC, enquanto que as demais $2N$ incógnitas são amplitudes de senos e cossenos, associadas a frequências fundamental e harmônicas, onde N corresponde ao número de harmônicas consideradas. A partir desses $(2N+1)$ valores, é possível obter tensões ou correntes (X) no tempo, usando:

$$X(t) = X_0 + \sum_{n=1}^N X_{ns} \sin(n\omega_0 t) + X_{nc} \cos(n\omega_0 t) \quad (1)$$

onde ω_0 é a frequência angular da excitação.

O sistema de equações algébricas não lineares é resolvido uma única vez. Contudo, recomenda-se não utilizá-lo em circuitos que apresentam grandes não linearidades, uma vez que acarretará no aumento do número de harmônicas e, dessa forma, no aumento da ordem do sistema a ser resolvido.

2.2. Método do tiro

O método do tiro (MT) consiste em uma análise no domínio do tempo, na qual buscam-se encontrar as condições iniciais que garantam que o circuito esteja em regime permanente [1].

Dado um circuito com Q elementos dinâmicos, o MT tem por objetivo encontrar a solução de um sistema algébrico não linear de ordem Q . As incógnitas deste sistema são as condições iniciais (tensões em capacitores e correntes em indutores). As equações deste sistema impõem as condições de regime permanente, ou seja, que o valor da tensão em cada capacitor (ou da corrente em cada indutor) calculado exatamente após um período fundamental (T) seja idêntico ao valor inicial (t_0), de acordo com:

$$V(t_0) - V(t_0 + T) = 0 \quad (2)$$

Para encontrar os valores das Q variáveis de estado após um período fundamental, utiliza-se a análise de transitório com um passo de tempo igual a $T/(2N)$, onde N corresponde ao número de harmônicas consideradas. Dessa forma, são necessários $2N+1$ passos de tempo para a obtenção dos Q valores no instante $T+t_0$. Usando-se uma técnica de discretização implícita, por exemplo a regra trapezoidal, um sistema algébrico não linear deve ser resolvido a cada passo de tempo. Além disso, observe que esses valores dependem das condições iniciais e, portanto, $V(T+t_0) = f[V(t_0)]$.

O sistema algébrico não linear de ordem Q é resolvido de forma numérica e iterativa. A cada iteração, executa-se a análise de transitório por exatamente um período.

3. MÉTODOS DE ENVOLTÓRIA

É comum o emprego de circuitos RF na presença de estímulos não periódicos, descritos por uma portadora (com frequência da ordem de GHz), modulada por uma

envoltória complexa (com largura de banda da ordem de MHz). Nesse cenário, a maior parte do espectro de frequências é nulo. Realizar uma análise de transitório é pouco eficiente, pois nesse caso as amostras estão todas igualmente espaçadas em frequência. Os métodos de envoltória são técnicas desenvolvidas especialmente para esse cenário. Eles calculam a resposta do circuito apenas para o pequeno subconjunto de frequências não nulas. Há duas técnicas distintas para a sua execução: uma baseada no EH [2] e outra baseada no MT [3].

3.1. Método de envoltória baseado no EH

Também conhecida como *Circuit Envelope* (CE), consiste em uma análise que combina os domínios do tempo e da frequência [2]. O CE faz uma análise transitória usando um passo de tempo muito grande (da ordem de μs), cujo inverso deve ser igual a algumas vezes a largura de banda da envoltória. A cada passo de tempo, um EH modificado é equacionado. As únicas modificações no EH são nas equações de capacitores e indutores. É necessário acrescentar um termo que indique como as informações no passo anterior afetam os resultados no instante atual.

Portanto, para cada tensão ou corrente no circuito, o CE fornece um conjunto de $(2N+1)$ valores que variam lentamente no tempo. A forma de onda é então dada por:

$$X(t) = X_0(t) + \sum_{n=1}^N X_n^s(t) \text{sen}(n\omega_0 t) + X_n^c(t) \text{cos}(n\omega_0 t) \quad (3)$$

As amplitudes de seno e cosseno em uma mesma frequência formam uma envoltória complexa. Através da Transformada Rápida de Fourier, é possível visualizar o espectro de frequência em torno de uma harmônica específica. Como as amplitudes variam de maneira não periódica no tempo, o resultado é uma banda contínua na frequência e, devido à presença de não linearidades, a largura de banda obtida é superior a largura do estímulo.

3.2. Método de envoltória baseado no EH

Também conhecida como *Envelope Following* (EF), consiste em uma análise no domínio do tempo [3]. Assim como no CE, é feita uma análise transitória principal usando um passo de tempo (t_s) muito grande. A cada passo de tempo, um MT modificado é executado. Cada MT modificado necessita, por sua vez, de uma análise de transitório auxiliar. Esta análise auxiliar tem duração de exatamente um ciclo da portadora (T) e um passo de tempo muito pequeno, igual a $T/(2N+1)$. Uma vez que, entre dois instantes de tempo consecutivos da análise principal há um grande número de ciclos da portadora ($t_s \gg T$), é possível obter uma redução significativa da quantidade de cálculos executados. Seja $t_s = cT$, onde c é a quantidade de ciclos entre dois instantes consecutivos da análise principal. No MT modificado, dobra-se a quantidade de incógnitas em relação ao MT. Em $t = mt_s$, as incógnitas são os valores das variáveis de estado nos instantes mt_s e $mt_s - T$. Agora, há 2 condições a serem satisfeitas para cada variável de estado, descritas por:

$$\begin{aligned} V(mt_s) &= f[V(mt_s - T)] \\ V(mt_s) - V[(m-1)t_s] &= c[V(mt_s) - V(mt_s - T)] \end{aligned} \quad (4)$$

onde V é a variável de estado e $f[V(mt_s - T)]$ é o resultado da análise de transitório auxiliar.

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Os métodos estudados foram aplicados ao circuito teste da Figura 1. Este circuito é composto de capacitores, resistores, fontes CC, uma fonte variável no tempo (v_{sig}) e um transistor BJT, representado pelo seu modelo de Ebers-Moll. Este circuito foi equacionado pelo método dos nós modificado, que definiu 10 incógnitas, sendo 8 tensões nodais e 2 correntes sobre fontes de tensão. Todos os sistemas algébricos não lineares foram resolvidos no MATLAB, através do comando *fsolve*. A tensão V_y foi então calculada.

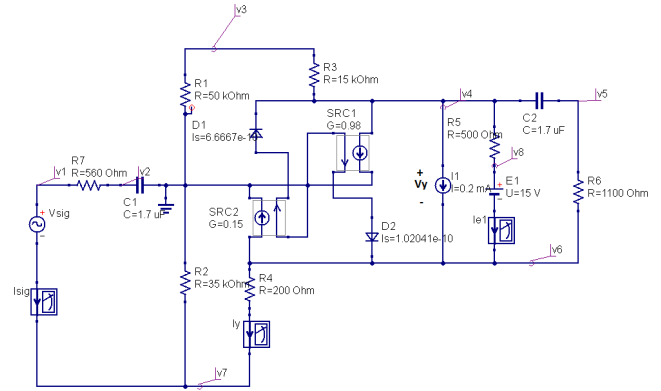


Figura 1. Esquemático do circuito teste.

4.1. Estímulo periódico

Neste primeiro estudo de caso, v_{sig} é descrita por um sinal senoidal de 1 GHz, com amplitude de 0,27 V. A quantidade de harmônicas foi fixada em $N = 5$. A Fig. 2 apresenta a forma de onda da tensão V_y obtida usando os métodos EH e MT.

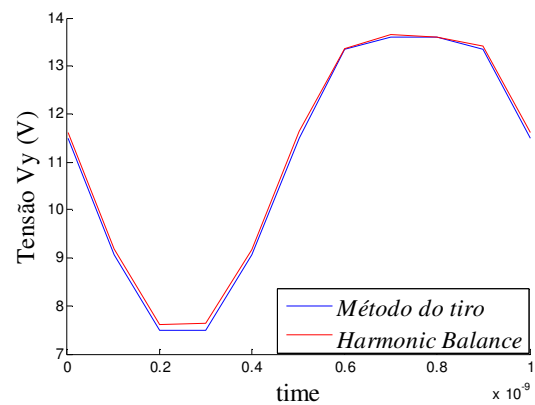


Figura 2. Forma de onda da tensão V_y obtida usando equilíbrio harmônico e método do tiro.

Como pode ser visto na Fig. 2, os dois métodos forneceram resultados muito próximos. Portanto, apesar de efetuarem cálculos muito diferentes entre si, ambos são adequados para a análise em estudo.

No que diz respeito à complexidade dos cálculos, ambos possuem vantagens e desvantagens. O EH encontrou a solução de um único sistema algébrico não linear com 110 equações em 110 incógnitas. Foram necessárias 10 iterações para obter essa solução. Já o MT necessitou de várias

resoluções de sistemas algébricos não lineares. O sistema principal do MT tem 2 equações em 2 incógnitas, pois há 2 capacitores no circuito. A solução deste sistema de segunda ordem necessitou de 10 iterações. Em cada iteração, foram necessárias as soluções de 12 sistemas algébricos não lineares de décima ordem. Um destes sistemas tem por objetivo encontrar o estado do circuito no instante inicial, ou seja, dadas as 2 tensões nos capacitores no instante inicial, encontrar os valores das 8 tensões nodais e 2 correntes sobre fontes de tensão nesse mesmo instante. A solução deste sistema necessitou, em média, de cerca de 200 iterações. Já os demais 11 sistemas referem-se a 11 passos de tempo de uma análise de transitório. Em média, foram necessárias 4 iterações para cada solução.

4.2. Estímulo não periódico

Neste segundo estudo de caso, v_{sig} é descrita por uma portadora na frequência de 1 GHz, modulada por um sinal OFDMA com largura de banda da ordem de 10 MHz. A quantidade de harmônicas foi fixada em $N = 5$. A Fig. 3 apresenta a forma de onda da tensão V_y obtida usando os métodos CE e EF, com uma frequência de amostragem de 100 MHz ($t_s = 10$ ns). Na Fig. 3 são mostradas as 5 primeiras amostras da envoltória complexa.

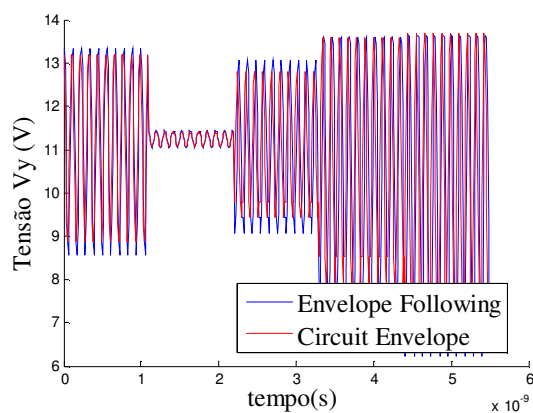


Figura 3. Forma de onda da tensão V_y obtida usando *circuit envelope* e *envelope following*.

Como pode ser visto na Fig. 3, os métodos CE e EF forneceram resultados muito próximos. Em termos de complexidade dos cálculos, a cada passo de tempo do CE um EH modificado é executado e a cada passo de tempo do EF um MT modificado é executado. No EH, não há modificação na ordem do sistema a ser resolvido. Já no EF, o sistema principal é agora de quarta ordem.

5- CONCLUSÃO

Este estudo contribuiu para uma melhor compreensão de métodos de análise de circuitos, uma área de grande importância para a Engenharia Elétrica. A partir deste estudo é possível identificar quais as vantagens e desvantagens de se utilizar cada um destes métodos de simulação de circuitos RF e, desta forma, realizar simulações mais eficientes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os apoios financeiros do Programa de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da UFPR, na modalidade PIBITI/UFPR-TN, e da Pró-reitoria de Assuntos Estudantis (PRAE-UFPR).

REFERÊNCIAS

- [1] O. Nastov, R. Telichevesky, K. Kundert and J. White, "Fundamentals of Fast Simulation Algorithms for RF Circuits," Proc. IEEE, vol. 95, no. 3, Mar. 2007, pp. 600-621.
- [2] D. Sharrit, Method for Simulating a Circuit. US Pat. 5588142, 24 dez. 1996.
- [3] K. Kundert, J. White and A. Sangiovanni-Vincentelli, "An envelope-following method for the efficient transient simulation of switching power and filter circuits, in Digest of Technical Papers ICCAD-88, pp. 446-449, 1988.