

Simulação Eficiente da BER de Sinais Distorcidos por Circuitos Não-lineares

Leonardo da C. Brito e Paulo H. P. de Carvalho

Resumo—Este artigo apresenta um método para a aceleração da simulação de circuitos não-lineares de comunicação que emprega uma Rede Neural Recorrente como meta-modelo dirigido dinamicamente. Simulações para estimação da BER de sinais distorcidos por um circuito amplificador foram realizadas e estas demonstram a eficiência do método proposto.

Palavras-Chave—meta-modelagem, circuitos elétricos não-lineares, envoltórias complexas, rede neural recorrente.

Abstract—This paper presents a new method applied to the acceleration of the simulation of nonlinear communication circuits. It employs a Recurrent Neural Network as a dynamic metamodel. BER simulations of a signal distorted by an amplification circuit were performed and they demonstrate the efficiency of the proposed approach.

Index Terms—metamodeling, nonlinear electric circuits, complex envelopes, recurrent neural networks.

I. INTRODUÇÃO

Hoje em dia, o emprego de ferramentas de simulação no projeto de circuitos de RF (radiofrequências) é indispensável. Estas ferramentas permitem realizar simulações eficientes e precisas das medidas típicas de RF, possibilitando assim uma redução no número de iterações necessárias no projeto, visto que o processo de prototipação é otimizado. O mercado de eletrônica de comunicação pessoal/wireless caminha a largos passos na direção da fabricação de sistemas completos inseridos em um único chip. Apenas uma pequena seção do sistema opera em frequências de rádio (RF). Mesmo assim, esta parte representa um dos maiores desafios no processo de projeto [1]. No projeto de uma seção de RF típica de um sistema, os seguintes blocos básicos são abordados: amplificadores, misturadores, osciladores, osciladores controlados por tensão (VCOs) e malhas amarradas por fase (PLLs). Devido às frequências dos sinais envolvidos na simulação destes blocos, às constantes de tempo do circuito e aos tipos de análise requeridos, simuladores como o SPICE [2], que utiliza o método de integração no domínio do tempo, não são adequados. Quando o SPICE é usado para simular os blocos básicos, longos transitórios são percorridos, sendo os

resultados obtidos a custos significativamente altos em termos de tempo e recursos computacionais demandados. Por isto, métodos especiais têm sido desenvolvidos para suprir as necessidades dos projetistas de RF. Nas últimas duas décadas, ferramentas de simulação de circuitos de RF têm evoluído significativamente. Dentre os métodos de análise de circuitos de RF disponíveis atualmente, destaca-se o método das Envoltórias Complexas [3]-[5]. Este método possibilita realizar simulações que fornecem as medidas de RF típicas, tais como: potência de canal adjacente, eficiência de conversão DC para RF, relação sinal-ruído, ganho de conversão, conversão AM/AM e AM/PM, dentre outras. O método das Envoltórias Complexas possibilita a manipulação de circuitos multi-tons (mistura de sinais modulantes e portadores) de forma eficiente no projeto de componentes de sistemas analógicos de comunicação.

Apesar das vantagens inerentes ao método das Envoltórias Complexas, quando do trato de circuitos excitados por sinais modulados analógicos ou digitais, grandes quantidades de recursos computacionais e de tempo são necessárias em dois casos específicos: no tratamento de circuitos que apresentam um grande número de variáveis de estado (incógnitas) e na análise de circuitos com grandes quantidades de pontos amostrais de simulação. O primeiro problema tem sido atacado e técnicas que o amenizam estão disponíveis na literatura [6]. Já o segundo problema demanda técnicas especiais, dentre as quais estão aquelas baseadas no uso de meta-modelos (modelos de modelos). Para contribuir com este campo, tem-se por finalidade apresentar neste artigo um método para a aceleração do processo de estimação de performance de dispositivos de sistemas de comunicações, baseado no uso do método das Envoltórias Complexas e associado a uma Rede Neural Recorrente (RNR) [7] como ferramenta de meta-modelagem.

Recentemente, a modelagem de circuitos elétricos lineares e não-lineares através de Redes Neurais tem sido explorada com sucesso [8]-[9]. Mais especificamente, RNRs têm sido aplicadas na modelagem das respostas dinâmicas de circuitos não-lineares [10], possibilitando-se, assim, a obtenção de representações rápidas e precisas dos comportamentos temporais desses dispositivos. Entretanto, os processos de modelagem apresentados na literatura são aplicados em “tempo de modelagem”, isto é, os dispositivos são modelados para a posterior realização de predição de performance. Este artigo, diferentemente daqueles, tem como objetivo descrever

um método no qual uma RNR de baixa complexidade é utilizada no “tempo de simulação” de um circuito, de forma a acelerar o processo de predição.

II. CARACTERIZAÇÃO DE CIRCUITOS DE RF

O método das Envoltórias Complexas é uma técnica tempo-freqüencial que fornece, de forma eficiente, a resposta transitória e, logicamente, a resposta de regime permanente de um circuito não-linear qualquer. Na aplicação deste, assume-se que qualquer sinal elétrico do circuito $y(t)$ pode ser decomposto em uma soma finita de bandas de freqüência moduladas, centradas em portadoras harmonicamente relacionadas ω_k , como mostram as equações (1) e (2).

$$y(t) = \sum_{k=-N}^N \tilde{Y}_k(t) e^{j\omega_k t} \quad (1)$$

$$\tilde{Y}_k(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-W/2}^{W/2} Y(\Omega + k\omega_c) e^{j\Omega t} d\Omega \quad (2)$$

O espectro de freqüências deste tipo de sinal é mostrado na Fig. 1(b). A Fig. 1(a) mostra a forma típica do espectro de um sinal modulado analógica ou digitalmente. Quando tal sinal alimenta um circuito não-linear, originam-se grandezas elétricas descritas pela equação (1). Ou seja, as grandezas elétricas apresentam distorções harmônicas e produtos de intermodulação dentro das bandas passantes. O circuito a ser simulado é representado somente pelas contribuições de baixa freqüência, dadas pela expressão (2), para todas as bandas passantes. Estes sinais são as “envoltórias complexas” dos sinais elétricos presentes no circuito, com as quais pode-se representar precisamente o sinal (1), como se pode facilmente notar, já que as componentes $e^{j\omega_k t}$ são conhecidas a priori.

Portanto, o método das Envoltórias Complexas é uma técnica intrinsecamente “banda-base”, pois $W \ll \omega_k$, o que geralmente se verifica em circuitos de comunicações. Devido a essa característica, necessitam-se de taxas de amostragem drasticamente menores para a caracterização do sinal $y(t)$, e isto evidencia a vantagem do método das Envoltórias Complexas em relação aos métodos temporais tradicionais de simulação de circuitos [2].

Exemplos de dispositivos não-lineares que se deseja modelar são: amplificadores de potência, multiplicadores, misturadores e osciladores controlados por tensão. A suposição básica para a modelagem de tais dispositivos é que os sinais presentes em qualquer de suas portas podem ser expressos por uma única portadora analógica ou digitalmente modulada, visto que normalmente utilizam-se seções de banda-passante naqueles dispositivos, filtrando-se os produtos de intermodulação localizados fora da banda de freqüência de interesse. Assim sendo, considera-se o bloco componente disposto na Fig. 2. Este bloco, ou modelo do

dispositivo, apresenta uma entrada $\tilde{X}(t)$ e uma saída $\tilde{Y}(t)$. Para modelar o dispositivo, necessita-se simplesmente se conhecer a relação entre as duas envoltórias complexas $\tilde{X}(t)$ e $\tilde{Y}(t)$, as quais notadamente são constituídas pelas componentes de fase e de quadratura dos respectivos sinais.

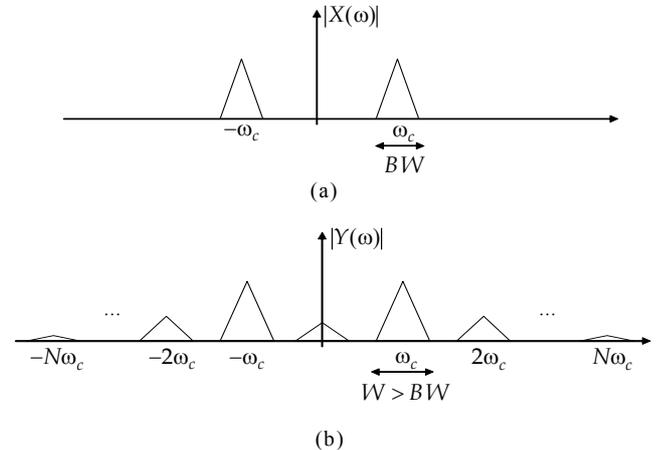


Fig. 1. Formas dos espectros dos sinais de circuitos de RF.

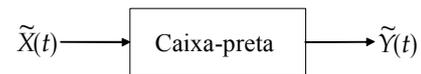


Fig. 2. Modelo do dispositivo.

III. O META-MODELO DINÂMICO

Uma das medidas de performance mais importantes na avaliação de sistemas de comunicação digital é a taxa de erro de bits (BER – Bit Error Rate), que é usualmente uma função que decresce com E_b / N_0 , onde E_b é a energia média por bit recebida e $N_0 / 2$ é a densidade espectral do ruído em um canal representado pelo ruído branco Gaussiano (AWGN). Normalmente, é necessária uma quantidade de amostras da ordem de milhões de bits para que a BER seja corretamente computada.

Na análise do impacto de efeitos não-lineares (causados pelos dispositivos não-lineares do sistema) na BER, por simulação direta, necessita-se de grande quantidade de recursos computacionais e de tempo para se simular aqueles milhões de bits, visto que a simulação de cada amostra é custosa. Torna-se imperativo, então, aplicar técnicas que permitam a otimização deste tipo de análise.

Visto que as envoltórias complexas presentes no circuito são grandezas variantes no tempo, a escolha de redes neurais dirigidas dinamicamente é óbvia. Neste trabalho, a Rede Neural Recorrente (RNR) foi escolhida. A rede tem como entradas as componentes real (fase) e imaginária (quadratura) da envoltória de entrada do dispositivo e como saídas as componentes real (fase) e imaginária (quadratura) da envoltória de saída do dispositivo, como mostra a Fig. 3.

Apenas um atraso unitário é considerado de forma a minimizar a complexidade da rede.

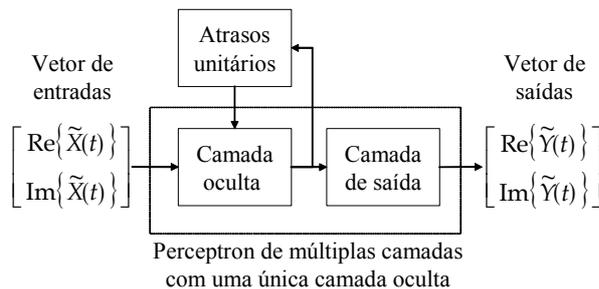


Fig. 3. Arquitetura da Rede Neural Recorrente.

A rede previamente descrita é utilizada dentro do processo de simulação do dispositivo representado pelas suas envoltórias complexas. Primeiramente, uma quantidade específica de amostras temporais é injetada na entrada do circuito, de forma que sua resposta é obtida por simulação pelo método das Envoltórias Complexas. A quantidade de amostras deve ser suficientemente grande para que o dispositivo possa ser precisamente modelado pelo meta-modelo baseado na RNR. Em seguida, as amostras das envoltórias complexas de entrada e de saída (correspondentes à frequência da portadora de sinais) são utilizadas para o treinamento da RNR. O algoritmo de treinamento utilizado foi o Gradiente Conjugado Escalonado [11], devido à sua capacidade de tratar eficientemente de redes com grande número de pesos. Finalmente, aplica-se o meta-modelo para estimar a resposta do dispositivo de forma eficiente, uma vez que a simulação pela RNR é consideravelmente mais rápida que a simulação pelo método das Envoltórias Complexas.

IV. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O método proposto foi aplicado para a estimação da BER de um sinal distorcido por um amplificador a TJB (transistor de junção bipolar) e transmitido por um canal representado pelo ruído branco Gaussiano aditivo. A topologia do circuito amplificador é mostrado na Fig. 4, na qual $x(t)$ é o sinal temporal de excitação e $y(t)$ é o sinal amplificado. Foram utilizados dez neurônios na camada oculta da RNR. O amplificador foi excitado por uma portadora a 900MHz, modulada por um sinal 8PSK (8 Phase Shift Keying – modulação por chaveamento de fase de oito estados), a 30kbps. O sinal 8PSK foi amostrado a uma taxa de 200kHz, ou seja, tomaram-se 20 amostras por símbolo. Foram analisados um total de 200.000 símbolos ou 4.000.000 de amostras gerados aleatoriamente. Utilizou-se um processador Pentium III 450MHz. A rede foi treinada com o resultado obtido através da simulação de 64 símbolos (1280 amostras) pelo método das Envoltórias Complexas. A simulação de cada amostra demandou, em média, 0,5 segundos, ao passo que cada amostra custou 0,0095 segundos à RNR. A rede foi utilizada para se obter a resposta do circuito (envoltória

complexa), considerando-se toda a seqüência de símbolos. A Tab. I mostra os tempos despendidos para a simulação do conjunto de amostras de treinamento, para o treinamento da RNR e para a estimação pela RNR. Nota-se que houve um ganho bastante significativo ao se utilizar o método exposto, tendo em vista que o tempo necessário para a análise sem a utilização da RNR seria de cerca de 2.000.000 de segundos, sendo este inviável.

TABELA I
TEMPOS DISPENDIDOS NA ANÁLISE

Simulação pelo método das Envoltórias Complexas	640 s
Treinamento da RNR	310 s
Simulação pela RNR	3800 s
Tempo total	4750 s
Ganho obtido (aproximado)	~ 420

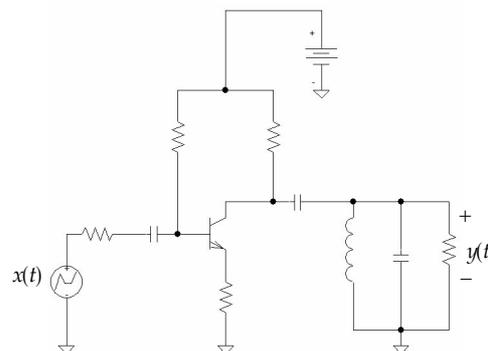


Fig. 4. Topologia do circuito amplificador a TJB.

A Fig. 5 mostra o comportamento da BER com a variação da relação sinal ruído no canal por bit. Esta também mostra o mesmo comportamento caso o amplificador se comportasse idealmente.

A Fig. 6 mostra o comportamento das componentes de fase e quadratura da envoltória de saída do amplificador obtidas através de simulação pelo método das Envoltórias Complexas (representadas pelas linhas sólidas) e através da RNR (representadas pelos círculos) durante um pequeno intervalo de tempo. O gráfico (a) mostra a componente de fase e o gráfico (b) mostra a componente de quadratura. Nota-se a boa precisão de modelagem, mesmo com a utilização de uma RNR de pequena complexidade: um atraso unitário e dez neurônios na camada oculta. O erro médio quadrático obtido foi da ordem de 10^{-4} .

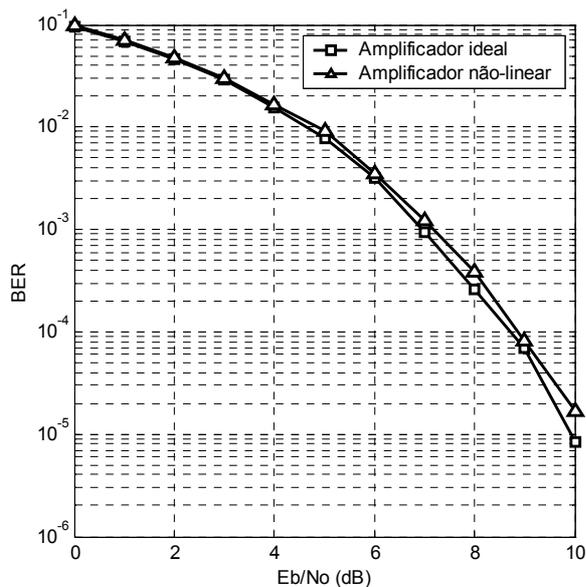


Fig. 5. BER do sistema.

V. CONCLUSÕES

Uma nova abordagem para a simulação de circuitos elétricos de comunicação foi apresentada. O método de simulação é composto pela associação do método das Envoltórias Complexas com uma Rede Neural Recorrente de baixa complexidade. Os resultados obtidos através de um exemplo mostraram o considerável ganho em tempo de processamento obtido. Evidentemente, a substituição do modelo de circuito pela RNR pode aumentar a imprecisão das respostas obtidas na simulação do circuito em relação ao comportamento físico real. Não obstante, pode-se aumentar a complexidade da RNR e/ou o tamanho do conjunto de treinamento visando reduzir o erro adicionado a níveis ínfimos. Entenda-se por erro adicionado, a diferença entre as respostas obtidas pelo método das Envoltórias Complexas e pela Rede Neural Recorrente. Deve-se ressaltar que o melhoramento da RNR obviamente reduz o ganho obtido pela aplicação do método proposto devido ao aumento do tempo de treinamento. Mas, o ganho ainda se mostra satisfatório, visto que o ganho obtido com redes de configurações menos complexas é grande.

O método está sendo estendido com vistas à automatização da procura do tamanho mínimo do conjunto de amostras para treinamento da rede que ofereça um erro médio quadrático tolerável. Finalmente, nota-se que o método proposto, por reduzir drasticamente os custos de simulação, aumenta consideravelmente a viabilidade da aplicação de métodos estocásticos na otimização dos parâmetros dinâmicos de circuitos elétricos, visto que aqueles demandam grandes quantidades de simulações. Estudos sobre a aplicação de Redes Neurais (como meta-modelos adaptativos) na otimização de circuitos elétricos por Algoritmos Genéticos estão sendo realizados.

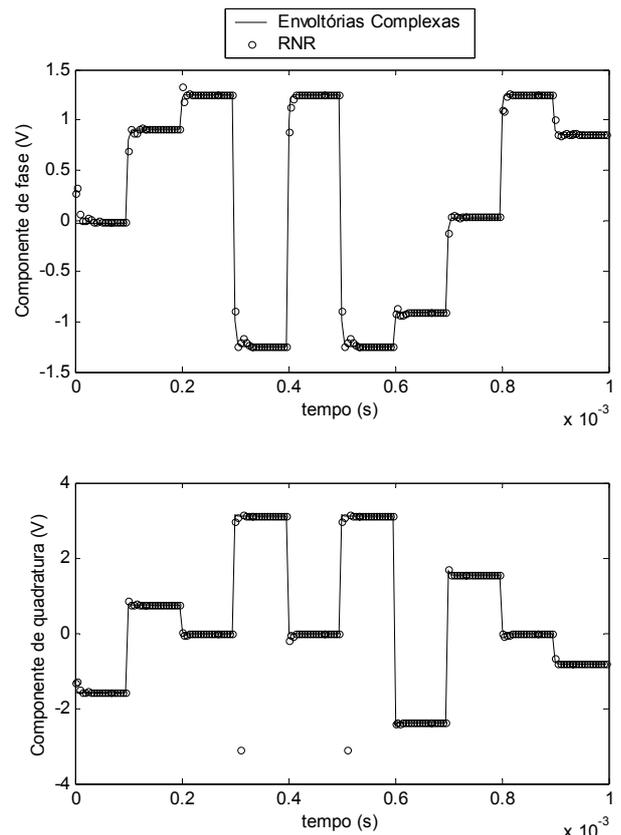


Fig. 6. Componentes de fase (acima) e de quadratura (abaixo). Método das Envoltórias Complexas versus RNR

REFERÊNCIAS

- [1] B. Razavi, "Challenges in portable RF transceiver design," *IEEE Circuits Devices*, pp. 12-55, Set. 1996.
- [2] L. Nagel, *SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits*, Electron. Res. Lab., Univ. of Califórnia at Berkley, UCBERL M520, 1975.
- [3] E. Ngoya, R. Lachevêque, "Envelope transient analysis: a new method for the transient and steady state analysis of microwave communication systems and circuits," *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1365-1368, 1996.
- [4] J. Roychowdhury, "Efficient methods for simulating highly nonlinear multi-rate circuits," *Proc. DAC*, 1997.
- [5] L. Brito, P. Carvalho, "EHBSim: MatLab-Based Nonlinear Circuit Simulation Program (Harmonic Balance and Nonlinear Envelope Methods)," *Journal Microwaves and Optoelectronics*, vol. 2, pp.1-21, Dez. 2001.
- [6] V. Rizzoli, et. al., "A Krylov-subspace technique for the simulation of integrated RF/microwave subsystems driven by digitally modulated carriers," *Int. Journal RF Microwave Computer-aided Eng.*, vol. 9, Nov. 1999.
- [7] S. Haykin, *Redes Neurais: princípios e prática*, Porto Alegre, Bookman, 2001.
- [8] "Applications of artificial neural networks to RF and microwave design", *Int. Journal RF Microwave Computer-aided Eng.*, vol. 9, Maio 1999.
- [9] Q. Zhang, et. al., "A neural network modeling approach to circuit optimization and statistical design," *IEEE MTT-T*, vol. 43, n. 6, 1995.
- [10] Q. Zhang, et. al., "A new macromodeling approach for nonlinear microwave circuits base on recurrent neural networks," *IEEE MTT-T*, vol. 48, n. 12, 2000.
- [11] M. Moller, "A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning," *Neural Networks*, vol. 6, pp. 25-533, 1993.