



Modelagem de Amplificadores de Potência de Banda Dupla Utilizando Combinações de Polinômio com Memória e Polinômio com Memória de Envoltória

Leonardo Gargitter, Luis Schuartz, Eduardo G. Lima
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
leogargitter@gmail.com

Resumo - Esse trabalho propõe dois modelos para a modelagem comportamental e linearização de amplificadores de potência de banda dupla, se baseando em três modelos encontrados na literatura. Combinações de polinômio com memória e polinômio com memória de envoltória foram propostas na literatura para melhorar o desempenho de modelos polinomiais para PAs de banda simples. O objetivo deste trabalho é estender essas combinações para modelos destinados a PAs de banda dupla e investigar se os benefícios identificados para o caso de banda simples também são observados para o caso de banda dupla. Comparando os resultados obtidos é possível concluir que os modelos propostos neste trabalho tiveram um desempenho semelhante aos modelos que foram comparados.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente os sistemas de comunicações móveis são parte essencial no dia a dia das pessoas. O grande crescimento de usuários e serviços prestados nesse segmento demandam altas taxas de transmissão de dados por esses sistemas. Com a crescente demanda ao mesmo passo que o volume de dados a ser transmitido cresceu a largura de banda disponível não acompanhou esse ritmo de crescimento, resultando em sinas com portadoras em altas frequências (GHz), moduladas em amplitude e fase [1]. Isso resulta em sinais muito sensíveis às distorções geradas pelo amplificador de potência (PA - *Power Amplifier*) [1].

O amplificador de potência é um dispositivo de grande importância nos sistemas de comunicação sem fio, sendo esse o dispositivo responsável por amplificar a potência do sinal de entrada para garantir um sinal de saída com a

potência desejada. Além da grande importância do PA, esse também é o dispositivo que mais consome energia e mais gera distorções no sinal [1]. Para que o sistema se mantenha confiável, o PA deve operar de forma linear ao mesmo tempo que desenvolve altas eficiências, porém o amplificador de potência apresenta um comportamento inversamente proporcional quando se trata de linearidade e eficiência, problema agravado com a utilização de protocolos de comunicação com alta razão de potência de pico pela potência média, o que reduz ainda mais a eficiência média do PA quando este precisa operar na região linear [2].

Para contornar o problema da relação entre linearidade e eficiência, fazendo o PA operar em sua região de maior eficiência sem comprometer a linearidade do sistema, foram desenvolvidas técnicas de linearização. Dentre as diversas técnicas de linearização se destaca a de pré-distorção digital (DPD - *Digital Predistortion*) por apresentar um bom custo-benefício. A técnica de DPD consiste em adicionar um linearizador em cascata com o PA, no transmissor. Inicialmente a DPD foi utilizada em PAs de banda única, mas com o crescimento do número de padrões de comunicação o desenvolvimento de PAs e DPDs de banda dupla tem se tornado mais relevante [2].

O objetivo deste trabalho é propor dois modelos matemáticos capazes de realizar a modelagem comportamental de um PA de banda dupla. Os modelos em questão têm como base outros três modelos propostos na literatura, que utilizam expansões polinomiais com memória.

II. REVISÃO DE LITERATURA

Como descrito anteriormente amplificadores de potência são dispositivos indispensáveis em sistemas de comunicação sem fio, porém a relação entre linearidade e eficiência nesses dispositivos é inversamente proporcional. Uma alternativa para que o PA seja capaz de ter comportamento linear e atingir alta eficiência é aplicar uma técnica de linearização, como a DPD [1].

A aplicação da DPD depende diretamente do comportamento do PA, portanto a modelagem desse componente deve ser precisa [1]. A técnica de modelagem utilizada nesse trabalho foi a de modelagem comportamental, que não depende de um conhecimento prévio do circuito físico do PA e se baseia no comportamento de entrada e saída observado nesse dispositivo, assim o PA é modelado a partir de equações matemáticas que simulam esse comportamento [1].

A seguir será feita a descrição dos modelos utilizados como base para este trabalho: *Combined Memory and Envelope Memory Polynomial 1* (CMEMP 1) e 2 (CMEMP 2) [1] e *Bi-dimensional Simplified Memory Polynomial* (2D-SMP) [2].

A. CMEMP 1 - Combined Memory and Envelope Memory Polynomial 1

O modelo CMEMP 1 é descrito pela equação (1):

$$y(n) = \left[\sum_{m=0}^M a_{m+1} x(n-m) \right] \left[\sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M b_{pm} |x(n-m)|^{p-1} \right], \quad (1)$$

onde y é a saída calculada, x são as entradas medidas no PA, essas entradas e saídas são compostas por valores complexos portanto a_{m+1} são os coeficientes da parte complexa do modelo e b_{pm} por multiplicar valores de entrada em módulo (amplitudes) representa os coeficientes da parte real. Este modelo não é linear nos seus coeficientes, mas após calcularmos os coeficientes da parte complexa da equação é possível obter os coeficientes da parte real através de um algoritmo linear [1].

B. CMEMP 2 - Combined Memory and Envelope Memory Polynomial 2

O modelo da CMEMP 2 é descrito pela equação (2):

$$y(n) = \sum_{m_1=0}^M \left[\sum_{m_2=0}^M a_{m_1+1, m_2+1} x(n-m_2) \right] \left[\sum_{p=1}^P b_{m_1 p} |x(n-m_1)|^{p-1} \right], \quad (2)$$

onde y é a saída calculada, x são as entradas medidas no PA, a_{m_1+1, m_2+1} são os coeficientes da parte complexa do

modelo e $b_{m_1 p}$ são os coeficientes da parte real, a classificação em parte real e complexa segue o mesmo raciocínio do modelo anterior. Assim como o CMEMP1 este modelo é não linear nos seus coeficientes, mas se torna linear nos seus coeficientes após calcularmos os coeficientes da parte complexa da equação [1].

C. 2D-SMP - Bi-dimensional Simplified Memory Polynomial

O modelo 2D-SMP tem como objetivo modelar um PA de banda dupla de acordo com as equações (3) e (4):

$$y_1(n) = \left[\sum_{p=0}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m}^1 x_1(n-m) |x_1(n-m)|^p \right] + \left[\sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m}^2 x_1(n-m) |x_2(n-m)|^p \right], \quad (3)$$

$$y_2(n) = \left[\sum_{p=0}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m}^3 x_2(n-m) |x_2(n-m)|^p \right] + \left[\sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m}^4 x_2(n-m) |x_1(n-m)|^p \right], \quad (4)$$

onde y_1 e y_2 são as saídas calculadas do PA, x_1 e x_2 as entradas medidas e h^1 , h^2 , h^3 e h^4 os coeficientes do modelo. Ele modela os efeitos da modulação cruzada, as não linearidades e os efeitos de memória do PA com uma quantidade de coeficientes relativamente baixa [2].

III. MODELOS PROPOSTOS

Dois dos modelos utilizados como base (CMEMP1 e CMEMP2) são baseados nos modelos de Polinômio de Memória (MP – *Memory Polynomial*) e Polinômio com Memória de Envoltória (EMP - *Envelope Memory Polynomial*) e modelam o comportamento de amplificadores de potência de banda simples. Essas combinações tiveram melhora de desempenho no caso de PAs de banda simples, porém essas combinações não foram exploradas para o caso de PAs de banda dupla e portanto apresenta potencial de gerar bons resultados.

Os modelos propostos, que são a combinação dos modelos CMEMP1 e CMEMP2 com o modelo 2D-SMP, têm o propósito de replicar a melhora de desempenho na modelagem comportamental para amplificadores de potência de banda simples realizada pelos dois primeiros modelos base em PAs de banda dupla e estão descritos a seguir.

A. Modelo proposto 1

O modelo proposto 1 é descrito pelas equações (5) e (6):

$$y_1(n) = \left[\sum_{m=0}^M a_{m+1}^{(1)} x_1(n-m) \right] \left[\sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M b_{pm}^{(1)} |x_1(n-m)|^{p-1} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M b_{pm}^{(2)} |x_2(n-m)|^{p-1} \right] \quad (5)$$

e

$$y_2(n) = \left[\sum_{m=0}^M a_{m+1}^{(2)} x_2(n-m) \right] \left[\sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M b_{pm}^{(3)} |x_2(n-m)|^{p-1} + \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M b_{pm}^{(4)} |x_1(n-m)|^{p-1} \right] \quad (6)$$

onde y_1 e y_2 são as saídas calculadas do PA, x_1 e x_2 os dados de entrada, $a^{(1)}$ e $a^{(2)}$ os coeficientes correspondentes a parte complexa do modelo e $b^{(1)}$, $b^{(2)}$, $b^{(3)}$, e $b^{(4)}$ os coeficientes da parte real do modelo.

B. Modelo proposto 2

O modelo proposto 2 é descrito pelas equações (7) e (8):

$$y_1(n) = \sum_{m_1=0}^M \left[\sum_{m_2=0}^M a_{m_1+1, m_2+1}^{(1)} x_1(n-m_2) \right] \left[\sum_{p=0}^P b_{m_1 p}^{(1)} |x_1(n-m_1)|^p + \sum_{p=0}^P b_{m_1 p}^{(2)} |x_2(n-m_1)|^p \right] \quad (7)$$

e

$$y_2(n) = \sum_{m_1=0}^M \left[\sum_{m_2=0}^M a_{m_1+1, m_2+1}^{(2)} x_2(n-m_2) \right] \left[\sum_{p=0}^P b_{m_1 p}^{(3)} |x_2(n-m_1)|^p + \sum_{p=0}^P b_{m_1 p}^{(4)} |x_1(n-m_1)|^p \right] \quad (8)$$

onde y_1 e y_2 são as saídas calculadas do PA, x_1 e x_2 os dados de entrada, $a^{(1)}$ e $a^{(2)}$ os coeficientes correspondentes a parte complexa do modelo e $b^{(1)}$, $b^{(2)}$, $b^{(3)}$ e $b^{(4)}$ os coeficientes da parte real do modelo.

C. Dados utilizados

Para a reprodução dos modelos propostos com o software MATLAB foram utilizados dois conjuntos de dados, obtidos por meio de simulações em modelos de PA de valores reais. O primeiro conjunto (Conjunto 1) foi gerado a partir de duas portadoras com frequência de 0,9 GHz e 2,5 GHz, sendo moduladas por um sinal 3GPP WCDMA com uma largura de banda de 8,84 MHz e um sinal LTE OFDMA com uma largura de banda de 10 MHz respectivamente e a frequência de amostragem para os sinais de entrada e saída foi de 61,44 MHz [3]. O segundo conjunto (Conjunto 2) foi gerado através de sinais com as envoltórias Wi-Fi IEEE 802.11n em 2,4 GHz e LTE em 3,5 GHz, tendo como frequência de amostragem 120 MHz. Cada conjunto de dados continha oito vetores, sendo estes dois vetores de entrada e dois vetores de saída para a extração dos coeficientes e dois vetores de entrada e dois vetores de saída para a etapa de validação. No primeiro conjunto esses vetores eram

compostos por 2500 elementos, no segundo conjunto por 3000 elementos e todos os elementos de ambos os conjuntos são valores complexos.

D. Métrica

A métrica utilizada para comparar os resultados foi o Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE – *Normalized Mean Square Error*), que é representado pela equação (9) [4]:

$$NMSE = \frac{\sum_{n=1}^N |e(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |y_{ref}(n)|^2} \quad (9)$$

onde $y_{ref}(n)$ é a saída desejada no instante n , $e(n)$ é o erro entre a saída estimada e a saída desejada no instante n e N é o número total de amostras. Quanto menor o valor do NMSE, maior a precisão do modelo [2].

IV. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos a partir das rotinas de validação dos modelos através da métrica NMSE, os modelos propostos foram comparados ao modelo utilizado como base 2D-SMP. Os resultados estão divididos entre os dois conjuntos de dados utilizados e para a comparação dos modelos foram organizadas tabelas que mostram o desempenho dos modelos comparados, esses valores foram obtidos variando os parâmetros P (truncamento polinomial) e M (efeito de memória), os valores de P e M foram escolhidos sem um critério específico.

A. Conjunto 1

Os valores exibidos nas Tabelas 1 e 2 foram obtidos utilizando o primeiro conjunto de dados, onde o NMSE 1 corresponde a portadora de 0,9 GHz e o NMSE 2 corresponde a portadora de 2,5 GHz.

Tabela 1: NMSE1(dB) utilizando o primeiro conjunto de dados

P	M	Proposto 1	Proposto 2	2D-SMP
3	2	-52,0160	-53,5125	-53,5391
3	3	-51,9853	-53,4711	-53,5516

Tabela 2: NMSE2(dB) utilizando o primeiro conjunto de dados

P	M	Proposto 1	Proposto 2	2D-SMP
3	2	-51,3415	-53,4698	-53,6525
3	3	-51,3866	-53,5403	-53,6769

Analisando os resultados das Tabelas 1 e 2 evidencia-se que o desempenho do primeiro modelo proposto foi inferior ao dos outros dois modelos comparados e o segundo modelo proposto teve um desempenho semelhante ao do modelo 2D-SMP.

B. Conjunto 2

Os valores de NMSE das Tabelas 3 e 4 estão organizados da mesma maneira que anteriormente, porém foram calculados utilizando o segundo conjunto de dados.

Tabela 3: NMSE1(dB) utilizando o segundo conjunto de dados

P	M	Proposto 1	Proposto 2	2D-SMP
3	2	-43,9740	-44,5714	-44,5646
3	3	-45,2154	-45,5781	-45,5851

Tabela 4: NMSE2(dB) utilizando o segundo conjunto de dados

P	M	Proposto 1	Proposto 2	2D-SMP
3	2	-54,5087	-54,7291	-54,7321
3	3	-56,0261	-56,3725	-56,3819

Considerando os resultados das Tabelas 3 e 4 percebe-se que o resultado obtido utilizando o primeiro conjunto de dados se repete, o primeiro modelo proposto tem um desempenho ligeiramente inferior enquanto o segundo modelo proposto e o modelo comparado tem resultados semelhantes.

V. CONCLUSÃO

Foram apresentados três modelos propostos na literatura, os *Combined Memory and Envelope Memory Polynomial 1 e 2* (CMEMP1 e CMEMP2) e o *Bi-dimensional Simplified Memory Polynomial* (2D-SMP)

que são baseados em expansões polinomiais. Em seguida foram propostos dois modelos baseados nos três modelos apresentados inicialmente, posteriormente foram reproduzidos em ambiente MATLAB os modelos propostos e o 2D-SMP utilizando os dois conjuntos de dados descritos nesse trabalho. Os resultados medidos pelo NMSE foram bastante semelhantes entre os modelos propostos e o 2D-SMP, também é importante ressaltar que os modelos propostos têm maior complexidade que o modelo comparado e portanto apresentam maior custo computacional ao serem implementados. Como trabalhos futuros, visando propor um modelo com melhora de desempenho, pode ser realizada a implementação de tabelas de busca (LUTs – *Look Up Tables*).

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] MACHADO, C. L. R. Modelagem comportamental de amplificadores de potência usando a soma de produtos entre filtros digitais de resposta ao impulso finita e tabelas de busca unidimensionais. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2016.
- [2] RIBA, O. A. P. Modelagem comportamental de amplificadores de potência de banda dupla baseada em aproximações bidimensionais e produto de tabelas de busca. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Paraná, 2017.
- [3] DOMPSIN, T. M.; RIBA, O. A. P.; LIMA, E. G. Behavioral Modeling of Dual-band Radio Frequency Power Amplifiers using Volterra Series, Proceedings of the XV Microelectronics Students Forum, 2015.
- [4] M. S Muha, C. J. Clark, A. Moulthrop, and C. P. Silva, "Validation of power amplifier nonlinear block models", em IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Anaheim, CA, Jun. 1999, pp. 759-762.