

Identificação de Compensadores para Moduladores IQ e Amplificadores de Potência em Banda Dupla Concorrente

Bruna Temporal Marcondes, Eduardo Gonçalves de Lima
Grupo de Circuitos e Sistemas Integrados (GICS)
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
bruna.temporal@gmail.com, elima@eletrica.ufpr.br

Resumo— *As não idealidades de moduladores em fase e em quadratura (IQ) podem deteriorar significativamente a linearidade em transmissores sem fio, principalmente em operação em banda dupla concorrente. Neste contexto, os procedimentos de linearização não devem apenas compensar as distorções do amplificador de potência (PA), mas também neutralizar as não linearidades do modulador e da modulação cruzada. A contribuição deste trabalho é a análise de um caso de identificação separada dos compensadores para um cenário de transmissor de banda dupla com moduladores independentes. Para a validação do método, que se mostrou eficaz, simulações de uma rede foram realizadas em ambiente Matlab, alcançando NMSEs de -43 dB e -33 dB para as bandas LTE OFDMA e 3GPP WCDMA, respectivamente.*

I. INTRODUÇÃO

Devido às proximidades dos canais e ao aumento no número de dados a serem transmitidos ao mesmo tempo em uma rede de transmissão sem fio, a eliminação de não linearidades, causadoras de interferências, tornou-se um passo indispensável na montagem de um transmissor. Alguns dos principais elementos na cadeia de transmissão que ocasionam esses comportamentos indesejados são aqueles localizados nos estágios finais de amplificação. Portanto, a atuação de cada dispositivo deve ser analisada para que ocorra a devida compensação dessas distorções [1]-[2].

O amplificador de potência (PA) é o elemento final em uma cadeia. Esse fornece à portadora o ganho necessário para que seja irradiada adequadamente pela antena e, conseqüentemente, é o dispositivo do sistema que mais consome energia, precisando de um nível significativo de eficiência [3]. Entretanto, um comportamento de alta eficiência não pode ser obtido ao mesmo tempo que se preserva a linearidade, posto que uma característica sempre é favorecida em detrimento da outra. Esse compromisso resulta em novos componentes em frequência, principalmente se o sistema estiver atuando em banda dupla [4]. Enquanto as componentes harmônicas podem ser facilmente removidas, os produtos de intermodulação

propõem uma abordagem mais complexa, uma vez que componentes podem ser geradas muito próximas da frequência da portadora do sinal, podendo ser incorporadas na banda passante do filtro e causando interferência em canais adjacentes. Há ainda o fenômeno de *cross-modulation*, ou modulação cruzada. Este é decorrente da intermodulação entre as duas bandas e acrescenta ainda mais componentes indesejadas nas frequências adjacentes às portadoras [5].

Um modo de preservar a linearidade do PA para o total da função de transferência é um pré-distorsor. Isto é, colocar em cascata com o amplificador um compensador, propositalmente não linear, que se oponha ao comportamento do PA. Sendo assim, a entrada do PA está distorcida de um modo em que a não linearidade é compensada.

Os moduladores e demoduladores em fase e em quadratura (IQ) são outros componentes passíveis de não linearidades. O comportamento do modulador consiste em alterar a frequência do sinal, através de um misturador e oscilador, mantendo as características, como amplitude e fase, as mais próximas possíveis das originais. Porém, em um modulador real, a implementação do oscilador é afetada por *offsets* no ganho ou na fase, causando diferenças entre as componentes em fase (I) e em quadratura (Q) do sinal [6]. De mesmo modo, um compensador IQ pode ser posto em cascata, em banda base, para reverter os efeitos não desejados no sistema [7]-[8].

A efetividade desses compensadores e pré-distorsores está diretamente ligada aos modelos matemáticos utilizados. Portanto, em uma situação de operação em banda dupla, um bom modelo para o PA deve representar as não linearidades de cada banda, assim como a influência que uma exerce sobre a outra.

O objetivo deste trabalho consiste em estudar e implementar em *software* uma abordagem para a identificação e compensação separada do conjunto PA e modulador IQ, fazendo o uso do modelo do PA descrito em [9].

A próxima seção, Seção II, indica as expressões matemáticas para identificações dos modelos do PA e a soma modulador e demodulador IQ. A Seção III apresenta a estrutura da abordagem estudada. Um estudo de caso para a validação é relatado na Seção IV e a conclusão é exposta na Seção V.

II. MODELOS COMPORTAMENTAIS DO CONJUNTO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA E MODULADOR IQ

A. Amplificadores de potência em banda dupla

Ao atuar em banda dupla, o amplificador de potência desencadeia a interferência mútua entre as bandas. Assim, o modelo a ser utilizado neste deve levar em conta essa interação. O modelo 2D-SMP (*Bi-dimensional Simplified Memory Polynomial*), descrito em [9], considera os efeitos de modulação cruzada, assim como não linearidades e efeitos de memória e tem suas saídas descritas por:

$$out_1(n) = \sum_{p=0}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m}^{(1)} z_1(n-m) |z_1(n-m)|^p + \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m}^{(2)} z_1(n-m) |z_2(n-m)|^p \quad (1)$$

e

$$out_2(n) = \sum_{p=0}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m}^{(3)} z_2(n-m) |z_2(n-m)|^p + \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M h_{p,m}^{(4)} z_2(n-m) |z_1(n-m)|^p, \quad (2)$$

onde P é a ordem dos polinômios, M a profundidade de memória, $out_1(n)$, $out_2(n)$, $z_1(n)$ e $z_2(n)$ as saídas e entradas da primeira e segunda banda, respectivamente, e $h^{(1)}_{p,m}$, $h^{(2)}_{p,m}$, $h^{(3)}_{p,m}$ e $h^{(4)}_{p,m}$ os vetores de coeficientes complexos a serem determinados, através do método dos mínimos quadrados (LS).

B. Moduladores e demoduladores IQ

Um sinal complexo $x(n)$ (em MHz) pode caracterizar uma envoltória admitida por um modulador IQ. O resultado dessa interação fornece uma portadora modulada e real (GHz), representada como $y(n)$, sendo

$$y(n) = \Re \{ x(n) [\cos(2\pi f_c t) - j(1+\alpha)\sin(2\pi f_c t + \phi)] \}. \quad (3)$$

Os desequilíbrios de fase (ϕ) e amplitude (α), que resultam da não linearidade da operação, são mostrados na portadora em (3), assim como a sua frequência f_c e o sinal $x(n)$, que é então processado pelo PA.

No demodulador, para analisar o sinal original em banda base, $y(n)$ é aplicada em duas multiplicações independentes, a primeira por $\cos(2\pi f_c t)$ e outra por $-\sin(2\pi f_c t)$ para demodular as partes reais ($x_i(n)$) e imaginárias ($x_q(n)$), respectivamente. Para eliminar as harmônicas decorrentes das multiplicações, as operações são seguidas por um filtro passa-baixas (LPF).

Conseqüentemente, a envoltória complexa de entrada $x(n)$ é relacionada com a saída $z(n)$ por

$$z(n) = x_i(n) + (\alpha + 1) [\cos(\phi)j - \sin(\phi)] x_q(n). \quad (4)$$

A equação descrita em (4), pode ser resumida como uma soma de $x(n)$ e seu conjugado $x^*(n)$, onde cada parte é influenciada por diferentes coeficientes complexos, assim como em

$$z(n) = a_1 x(n) + a_2 x^*(n). \quad (5)$$

Essa mesma expressão pode indicar um compensador para o conjunto IQ ao se inverter as envoltórias de entrada e saída. Um modelo para o compensador, tendo em vista um pré-inversor, é

$$x(n) = b_1 w(n) + b_2 w^*(n), \quad (6)$$

onde $w(n)$ é a envoltória de entrada do inversor e seus coeficientes complexos b_1 e b_2 são definidos por

$$b_1 = \frac{1}{a_1 + a_2} + \frac{a_2(a_1^* + a_2^*)}{(a_1 + a_2)(|a_1|^2 - |a_2|^2)} \quad (7)$$

e

$$b_2 = \frac{-a_2}{(|a_1|^2 - |a_2|^2)}. \quad (8)$$

III. IDENTIFICAÇÃO DO COMPENSADOR SEPARADO EM BANDA DUPLA

Considerando a aplicação de banda dupla concorrente no transmissor, a Fig. 1 ilustra a cascata final a ser encontrada para o sistema.

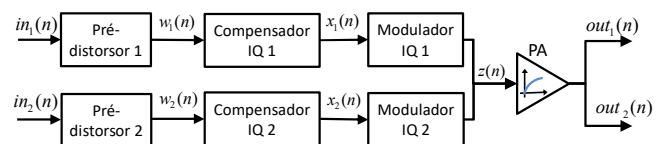


Fig. 1 Diagrama de blocos do sistema final

Com a identificação separada dos compensadores, duas medições de envoltórias são necessárias para encontrar a totalidade da Fig. 1. A primeira medição é realizada somente com o modulador (Fig. 2). Assim, as entradas das diferentes bandas passam pelos seus respectivos moduladores IQ, que possuem não idealidades, e são somadas. Após serem demoduladas idealmente, possuem

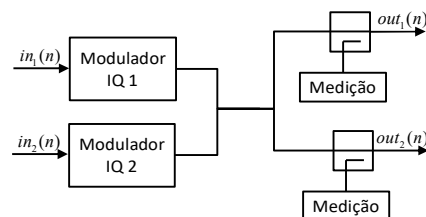


Fig. 2 Disposição para encontrar os compensadores

suas saídas coletadas separadamente. Com estes dados, utilizando as expressões de (6), (7) e (8), cada compensador é extraído através do método LS.

Com os dois compensadores em cascata, apresentado na Fig. 3, o sistema passa a não apresentar as distorções causadas pelos moduladores, fazendo possível a obtenção dos coeficientes de (1) e (2) dos pré-distorsores.

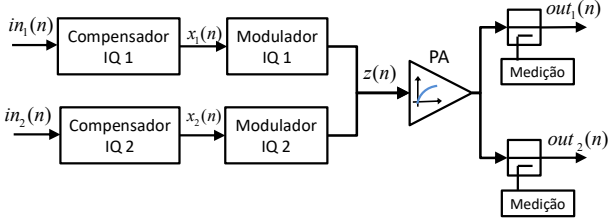


Fig. 3 Disposição para encontrar os pré-distorsores.

IV. VALIDAÇÃO E RESULTADOS

Para a técnica exibida anteriormente, a validação foi realizada através de um estudo de caso em *software Matlab*. Primeiramente, com o objetivo de executar as medições, foi necessário simular os sistemas de transmissão e recepção em rádio frequência (RF), assim como definir o PA. Dois conjuntos diferentes de dados, porém com as mesmas características, foram utilizados para a obtenção dos coeficientes. No sistema de banda dupla, um sinal do padrão LTE OFDMA, descrito no tempo, com 10 MHz de largura de banda, foi utilizado como a primeira entrada para a extração dos compensadores. A segunda foi definida como um pacote de dados 3GPP WCDMA, com largura de banda de 8,84 MHz. Ambos os pacotes de entrada são amostrados na frequência de 61,44 MHz e possuem 409600 amostras.

A. Transmissor e receptor para banda dupla

A primeira operação é a reamostragem dos sinais. Para o segundo pacote de dados, foi escolhida a mesma taxa de amostragem do sinal LTE OFDMA, de 200 vezes a taxa inicial do sinal, 12,288 GHz.

Ao passar pelos respectivos moduladores, os sinais referentes aos padrões LTE e 3GPP foram transladados para as frequências de 983,04 MHz e 2,64204 GHz. Estas representam 16 e 41 vezes, respectivamente, a taxa inicial de amostragem. Isto ocorre para que as harmônicas de cada modulador não caiam na faixa de frequência do outro. O

modelo de amplificador utilizado, após a soma das saídas dos moduladores, foi

$$y_{RF}(n) = \sum_{p=1}^5 r_p [x_{RF}(n)]^p, \quad (9)$$

com $r_1 = 10,339$, $r_2 = 1,101$, $r_3 = -21,688$, $r_4 = 29,017$ e $r_5 = -13,507$.

O receptor realiza, em seguida, a demodulação de cada sinal, e a reamostragem para a taxa de amostragem inicial.

B. Geração dos dados

A modelagem dos comportamentos do modulador IQ e do amplificador de potência considera estes componentes como uma caixa preta, dependendo da entrada e saída. Portanto, o esquemático da Fig. 4 foi adaptado para a Fig. 2, apenas com os moduladores, mantendo os blocos de reamostragem e demodulação. Após a identificação dos compensadores IQ, a Fig. 3 é simulada para a obtenção dos coeficientes dos pré-distorsores. Para os polinômios que caracterizam o pré-distorsor, (1) e (2), foi considerada uma situação sem memória, com M nulo e um truncamento de P na nona ordem.

Após a identificação dos termos de todos os compensadores, novos pacotes de entradas LTE OFDMA e 3GPP WCDMA, com as mesmas características dos anteriores, são utilizados para a validação. A troca de entradas diminui eventuais problemas de sobre-ajuste (*overfitting*) que podem vir a surgir durante a extração. Assim, o sistema demonstrado na Fig. 4, é simulado integralmente para a extração dos dados de validação de entrada e saída.

Com esses sinais de validação, sinais de erros foram extraídos pela diferença entre as entradas originais aplicadas $in(n)$ e as saídas $out(n)$. A precisão de cada abordagem foi medida através do *Normalized Mean Square Error* (NMSE) [10]. A TABELA 1 expõe os NMSEs encontrados para cada banda simulada.

TABELA 1. NMSEs PARA A IDENTIFICAÇÃO EM BANDA DUPLA CONCORRENTE

Banda	NMSE (dB)
LTE OFDMA	-43 dB
3GPP WCDMA	-33 dB

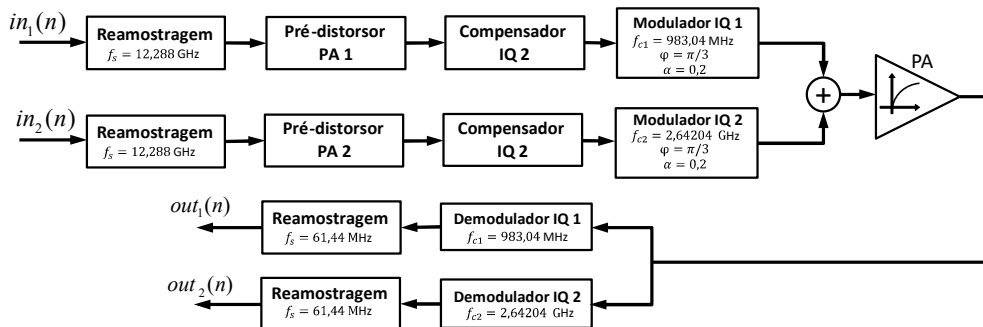


Fig. 4 Diagrama de blocos do sistema final simulado

Ao analisar os valores, pode-se inferir que a segunda banda é a que recebe mais influência da sua banda concorrente. Entretanto, o nível de linearização do método foi satisfatório para ambas as bandas, já que as distorções decorridas das não linearidades do PA e das não idealidades do modulador IQ são quase integralmente eliminadas ao se observar a característica de transferência final do transmissor compensado, como ilustrado pelas características de transferência na Fig. 5, e pelas Densidades Espectrais de Potência (PSD), Fig. 6 e Fig. 7, validando a expansão deste método para banda dupla concorrente.

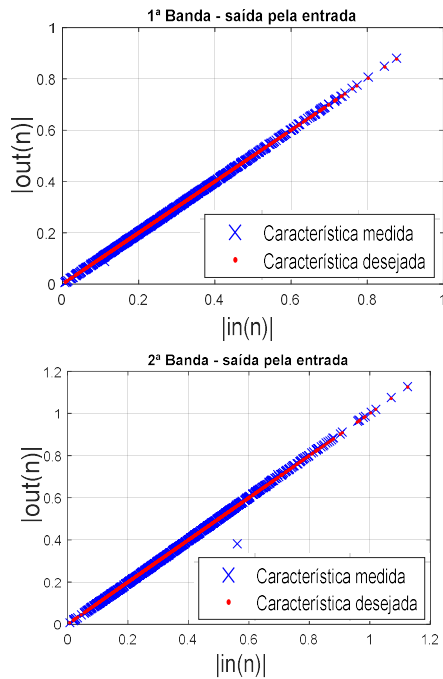


Fig. 5 Características de transferência para cada banda

V. CONCLUSÃO

Este trabalho abordou um diferente método para a identificação e implementação dos compensadores de amplificadores de potência e do modulador IQ de uma rede em banda dupla concorrente. Neste caso sem memória, utilizou-se um pacote de dados LTE OFDMA para a primeira banda e um 3GPP WCDMA para a segunda. Os NMSEs encontrados para cada banda foram de -43 dB e -33 dB, respectivamente. Portanto, o método validou-se ao linearizar o sistema nesta configuração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro por parte da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

[1] D. Raychaudhuri and N.B. Mandayam, "Frontiers of Wireless and Mobile Communications," Proc. IEEE, vol. 100, no. 4, pp. 824–840, Apr. 2012.

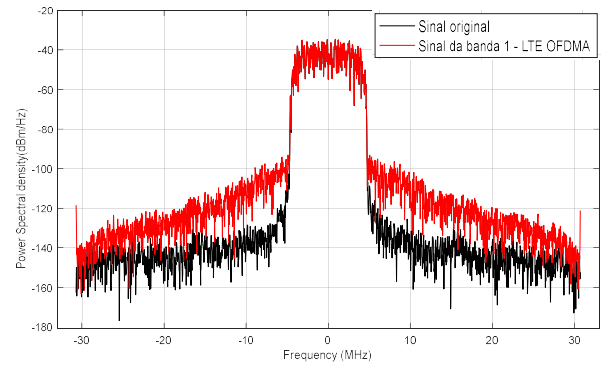


Fig. 6 PSD para a banda de LTE OFDMA

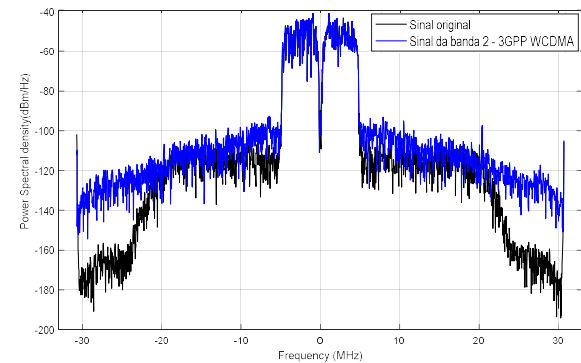


Fig. 7 PSD da banda 3GPP WCDMA

- [2] M. Younes and F. M. Ghannouchi, "On the Modeling and Linearization of a Concurrent Dual-Band Transmitter Exhibiting Nonlinear Distortion and Hardware Impairments," IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, vol. 60, no. 11, pp. 3055–3068, Nov. 2013.
- [3] S. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, 2nd edition. Norwood, MA: Artech House, 2006.
- [4] P. B. Kenington, High Linearity RF Amplifier Design. Norwood, MA: Artech House, 2000.
- [5] S. A. Bassam, M. Helaoui and F. M. Ghannouchi, "2-D Digital Predistortion (2-D-DPD) Architecture for Concurrent Dual-Band Transmitters," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, no. 10, pp. 2547–2553, Oct. 2011.
- [6] J. K. Cavers, "The effect of quadrature modulator and demodulator errors on adaptive digital predistorters for amplifier linearization," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 46, no. 2, pp. 456–466, May 1997.
- [7] Zhan, P.; Qin, K.; Cai, S.; "Joint compensation model for memory power amplifier and frequency-dependent nonlinear IQ impairments," Electronics Letters, vol. 47, no. 25, pp. 1382–1384, Dec. 2011.
- [8] L. Anttila, P. Händel and M. Valkama, "Joint Mitigation of Power Amplifier and I/Q Modulator Impairments in Broadband Direct Conversion Transmitters," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 58, no. 4, pp. 730–739, April 2010.
- [9] O. Riba, "Modelagem comportamental de PAs de banda dupla baseada em aproximações bi-dimensionais e produto de tabelas de busca." Orientador: Eduardo Gonçalves de Lima. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- [10] M. S. Muha, C. J. Clark, A. Moulthrop, and C. P. Silva, "Validation of power amplifier nonlinear block models," in IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Anaheim, CA, Jun. 1999, pp. 759–762.