

SeMicro-PR 2018

Limitação com Filtragem e Saturação do Amplificador de Potência para Redução da Razão entre Potência de Pico e Média

Carlos M. Alvarado, Felipe A. Schoulten, Eduardo G. Lima
Grupo de Circuitos e Sistemas Integrados (GICS)
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
carlox.alvarado@gmail.com

Resumo— Este trabalho aborda a redução da razão entre as potências de pico e média (PAPR), de um sinal WCDMA de um sistema de comunicação sem fio, através de uma técnica de limitação seguida por um bloco de filtragem e, finalmente, aplicação de outra limitação que age como um amplificador de potência (PA) saturado. Uma estratégia usada nesta abordagem para o bloco de filtragem é usar um filtro no domínio da frequência. Neste trabalho, os coeficientes dos blocos que compõem a cascata são extraídos de tal forma a otimizar a redução da PAPR. É feita uma comparação entre (Limitador+ filtro) e (Limitador+filtro+limitador) para determinar qual caso é mais efetivo na redução da PAPR. Os resultados de simulação mostram que a utilização da cascata com os dois blocos limitadores resulta em uma maior redução da PAPR, quantificada por uma redução adicional de 1,2 dB na PAPR do sinal teste.

Palavras-Chave-Comunicação sem fio, Filtros lineares digitais, Amplificador de Potência, Limitadores hard-clipping, otimização.

I. INTRODUÇÃO

A popularização e o fácil acesso aos dispositivos de comunicação sem fio exigem maiores taxas de transferência de dados. A banda reservada para esses sistemas é limitada devido ao espectro ser bastante disputado entre diferentes aplicações e, quanto maior a quantidade de informação a ser transmitida, maior é a largura de banda necessária [1]. Um elemento importante dentro do sistema de transmissão é o amplificador de potência (PA), o qual converte um sinal de rádio frequência de baixa potência em um sinal de potência maior. Este elemento é o que mais consome potência no sistema de comunicação sem fio [2]. Os PAs caracterizam-se por sua relação conflitante entre linearidade e eficiência. A potência média de saída está vinculada à eficiência energética [4], visto que para atingir uma elevada eficiência energética será necessária uma alta potência média de saída no PA. Dessa forma, um valor elevado para a razão entre as potências máxima e média

(PAPR) do sinal de transmissão pode comprometer de maneira muito significativa a eficiência do transmissor [4] - [5].

Um das técnicas aplicadas para melhorar a eficiência e reduzir a PAPR nos PAs linearizados são os redutores de fator de crista (CFR). As técnicas CFRs contribuem na diminuição do *back-off* e, portanto, incremento na eficiência [6]. A técnica de CFR produz distorção dentro da banda passante no sinal a ser aplicado no PA, porém ao introduzir-se um bloco de filtragem, reduz-se a distorção gerada pelo *clipping* [7].

A abordagem neste trabalho é projetar um CFR formado por uma cascata de um limitador do tipo *hard-clipping* seguido de um filtro digital no domínio da frequência e um segundo limitador *hard-clipping*. O segundo limitador age como um PA em saturação. A justificativa é a seguinte. Um PA linearizado apresenta um ganho constante até a saturação. Contudo, para calcular a PAPR de um sinal, este ganho constante do PA pode ser normalizado para um, uma vez que ele afeta da mesma forma os valores médio e máximo. O fator de *clipping* deste segundo limitador define a partir de qual amplitude o PA linearizado entre em saturação. Em outras palavras, para obter uma maior potência média de saída e, portanto, melhorar a eficiência energética do PA, busca-se também otimizar o quanto saturar o PA.

Este trabalho está dividido da seguinte forma. Na seção II é descrita a técnica de *hard-clipping* e filtragem. Na seção III descreve-se a operação do filtro no domínio da frequência. A seção IV descreve a identificação dos coeficientes. A seção V mostra os resultados de um caso de estudo utilizando Matlab. A seção VI apresenta as conclusões desse trabalho.

II. CFR ATRAVÉS DE HARD-CLIPPING SEGUIDO DE FILTRAGEM

O redutor de fator de crista (CFR) tem por objetivo reduzir a PAPR do sinal de entrada. Para garantir a

utilização ótima do CFR é necessário que o desempenho do transmissor seja excedido em suas especificações. Este excesso é conhecido como margem. Existem vários tipos de CFR que reduzem o valor de pico ao introduzir um sinal de correção limitado em banda na qual a concentração do espectro de energia está nos canais alocados ao sinal de entrada (dentro da banda). Este tipo de abordagem do CFR negocia os erros que são criados pelo sinal de correção dentro da largura de banda do sinal de entrada, para garantir uma redução da PAPR. Neste contexto uma PAPR reduzida permite uma maior eficiência do PA ao ser operado perto da saturação [8].

De forma geral, para esse trabalho é utilizado um CFR que consiste em três blocos em cascata, como mostra a Fig. 1. O primeiro representa o limitador *hard-clipping*, o segundo, o filtro digital linear no domínio da frequência e o terceiro, outro limitador *hard-clipping* considerado como um PA saturado.

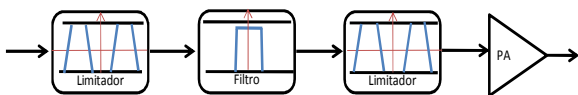


Fig. 1. Diagrama de blocos da CFR.

A utilização de *clipping* gera distorções no espectro de frequência e, conseqüentemente, modifica as métricas que medem as distorções dentro da banda passante e na banda de rejeição. Essas métricas são fixadas com limites máximos permitidos. Neste contexto, o limitador recorta o sinal enquanto o filtro tem como alvo minimizar as distorções que acontecem nos canais adjacentes [8]. Para obter a melhor redução da PAPR é necessário encontrar os coeficientes tanto dos limitadores quanto do filtro. O foco deste trabalho é realizar uma comparação entre duas arquiteturas de CFR, uma com apenas um limitador do tipo *hard-clipping* mais filtro e outra com um segundo limitador do mesmo tipo que atua como um PA saturado, ou seja, (limitador + filtro + limitador), para determinar qual abordagem é mais viável na redução da PAPR do sinal de envoltória complexa.

A representação matemática do limitador *hard-clipping* no domínio do tempo é dada por:

$$x[n] = \begin{cases} w[n] & |w[n]| < L \\ L \exp\{j\angle w[n]\} & |w[n]| \geq L \end{cases} \quad (1)$$

onde $x[n]$ é o sinal de saída e $w[n]$ é o sinal de entrada. L representa o parâmetro de valor real chamado de fator de *clipping*, o qual será escolhido através de uma otimização. Tanto a saída quanto a entrada deste bloco estão no domínio do tempo, representado por $[n]$ e sendo $|w[n]|$ uma componente de amplitude e $\angle w[n]$ a componente de fase do sinal de envoltória de entrada e de valor complexo.

III. FILTRO DIGITAL

O processo de filtragem é necessário para diminuir as distorções fora da banda que são geradas quando o sinal passa através do bloco de limitação. Uma particularidade dos filtros digitais é a sua tendência na restauração dos picos do sinal que foram recortados pelo *clipping* no bloco anterior, o qual pode causar um aumento da PAPR.

A Fig. 2 apresenta a resposta em frequência do filtro a ser utilizado neste trabalho, que é um filtro passa-baixas.

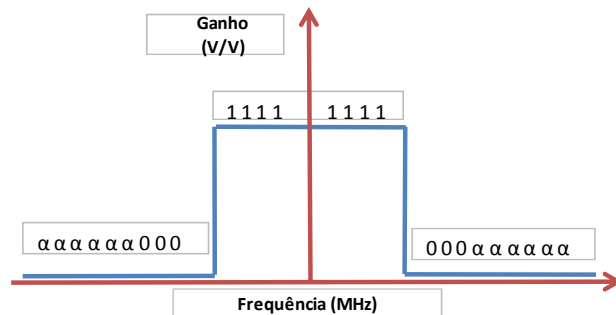


Fig. 2. Resposta em frequência do filtro presente na CFR.

O sinal da envoltória complexa passa primeiro pelo limitador. A saída do bloco de limitação está no domínio do tempo. Esse sinal é convertido para o domínio da frequência através da transformada rápida de Fourier para, em seguida, passar pelo filtro no domínio da frequência. Para tal conversão, usa-se uma sequência de 2048 amostras. Desse total, exatamente 256 amostras no domínio da frequência, que correspondem a contribuições na banda lateral inferior (amostras de número 795 até 922) e banda lateral superior (amostras de número 1128 até 1255) são multiplicadas pela variável α . As amostras correspondentes ao canal principal, exatamente 159 pontos começando em 945 e terminando em 1103, foram multiplicadas por 1. Além disso, exatamente 22 amostras entre a banda inferior e o canal principal, assim como 24 amostras entre o canal principal e a banda superior, foram multiplicadas por zero. As demais amostras também são multiplicadas por zero. O valor de α é otimizado. Finalmente, o sinal de saída do filtro é convertido de volta para o domínio do tempo, o qual entra no segundo bloco de limitação.

IV. IDENTIFICAÇÃO PARAMÉTRICA

Nesta pesquisa é importante conhecer qual dos métodos de CFR é mais eficiente na hora de reduzir a PAPR do sistema. Para tal fim é preciso identificar os coeficientes de cada bloco nas arquiteturas investigadas. Por sua vez, é fundamental conhecer as métricas que servem de restrições segundo legislação para a correta operação do sistema de comunicação. Essas métricas de restrição são a magnitude do vetor de erro (EVM) e a razão de potência de canal adjacente (ACPR). Para a identificação dos parâmetros utiliza-se uma ferramenta de otimização não linear com restrições, onde a função objetivo minimiza o valor da PAPR na saída do último

bloco da cascata que implementa a CFR e as restrições garantem que os limites de EVM e ACPR sejam respeitados. Neste trabalho, as variáveis a serem otimizadas foram o fator de *clipping* do primeiro limitador, o coeficiente α do filtro na frequência e o fator de *clipping* do segundo limitador.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção são descritos os resultados de redução da PAPR de um sinal teste. O sinal teste usado neste trabalho foi um sinal WCDMA de 2048 amostras no domínio do tempo com uma frequência de amostragem de 61,44 MHz e largura de banda de 3,84 MHz, tendo uma PAPR de 8,60 dB.

A EVM é uma métrica que mede a qualidade do sinal. É uma função dos sinais interferentes que acontecem na banda principal do sinal a ser transmitido. Ela é calculada no domínio do tempo, através de

$$EVM = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N |\tilde{y}(n) - \tilde{y}_{REF}(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |\tilde{y}_{REF}(n)|^2}} \times 100\% \quad (2)$$

onde $\tilde{y}(n)$ é o sinal no qual será calculado o valor de EVM se referenciando com o sinal $\tilde{y}_{REF}(n)$ e N representa o número total de amostras no tempo discreto. Para este trabalho é necessário encontrar o valor ótimo da PAPR que garanta um EVM dentro dos limites. O valor de EVM não deve ultrapassar 17,5% segundo o padrão 3GPP para um sinal WCDMA.

Por outro lado, a métrica ACPR mede as distorções máximas permitidas fora da banda principal. Neste estudo, a ACPR não deve ser maior que -45 dB nas bandas adjacentes do sinal. A ACPR opera no domínio da frequência e, para determinar seu valor, usa-se

$$ACPR = 10 \log_{10} \left[\frac{\int_{adj} |\tilde{Y}(f)|^2 df}{\int_{princ} |\tilde{Y}(f)|^2 df} \right] \quad (3)$$

onde $\tilde{Y}(f)$ é a representação no domínio da frequência do sinal na saída do último bloco da cascata que implementa a CFR. Esse valor está baseado na transformada discreta de Fourier e faz referência à integração dos canais adjacente e principal. Para determinar a ACPR, foi usada uma largura de banda tanto para o canal principal quanto para os adjacentes de 3,84 MHz, assim como uma distância de 5 MHz entre as frequências centrais das bandas adjacentes e da banda principal.

Para a obtenção simultânea de todos os parâmetros da CFR, utilizou-se uma ferramenta de otimização não linear com restrições no Matlab, baseada no algoritmo dos pontos interiores. Adotou-se valores iniciais no intervalo

de 0 a 1 para os fatores de *clipping* dos blocos de limitação e para o coeficiente α do bloco de filtragem. A função objetivo deve minimizar a PAPR na saída do último bloco da cascata que implementa a CFR. As restrições não lineares exigem EVM e ACPR dentro dos limites indicados anteriormente.

A seguir, são apresentados os resultados obtidos na redução da PAPR ao se implementar um CFR com um único bloco de limitação e com dois blocos limitadores. Pode-se observar na Tabela 1 que a maior redução no valor da PAPR ocorreu com a utilização do CFR com 2 limitadores, proporcionando uma melhora de 1,2 dB em relação ao caso com apenas um limitador.

TABELA 1. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

CFR	1 Limitador	2 Limitadores
Redução na PAPR	3,3 dB	4,5 dB

A técnica de CFR permite a redução da PAPR. No entanto, para tal fim ela insere distorção no sinal. Na Fig. 3 são mostradas as amplitudes dos sinais no domínio do tempo capturadas na entrada e na saída das duas realizações de CFRs otimizadas neste estudo.

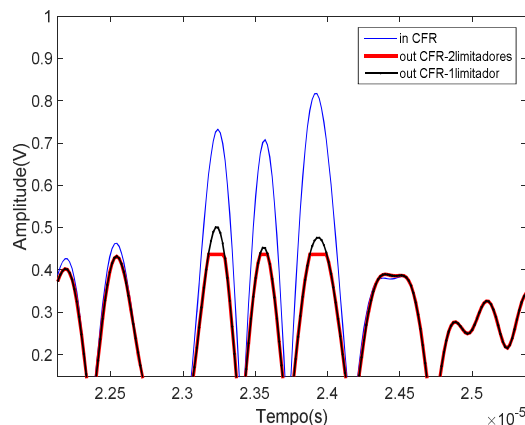


Fig. 3. Amplitude dos sinais na entrada e na saída das CFRs com 1 e 2 limitadores.

Na Fig. 4 nota-se que a técnica de CFR produz uma resposta não linear, devido à compressão na curva. Além disso, observa-se um efeito de memória evidenciado na dispersão da curva. É interessante notar que o valor de pico ao se usar a técnica de CFR com dois limitadores é igual a 0,43 V e, no caso da técnica de CFR com somente um limitador, o valor de pico é 0,5 V. A Fig. 5 mostra as densidades espectrais de potência (PSDs) de diversos sinais ao longo das CFRs otimizadas neste trabalho. O sinal de entrada, que é o sinal com menos distorções, está indicado em preto. O sinal na saída do primeiro limitador, que é o sinal apresentando os maiores níveis de distorção,

está indicado em azul. O sinal na saída do CFR com um único limitador, ou seja, na saída do filtro, está indicado em verde. O sinal na saída do CFR com dois limitadores, ou seja, na saída do segundo limitador, está indicado em vermelho.

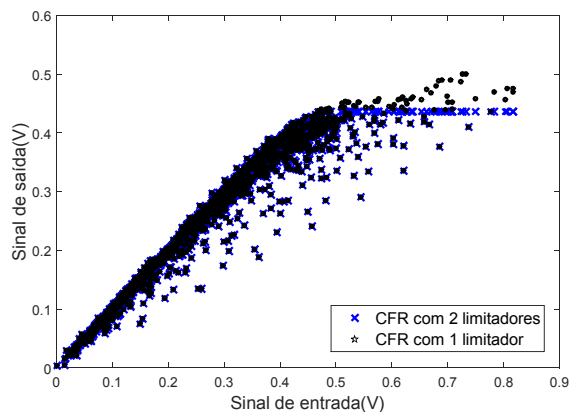


Fig. 4. Amplitude de saída em função da amplitude de entrada para CFRs com um e com dois limitadores.

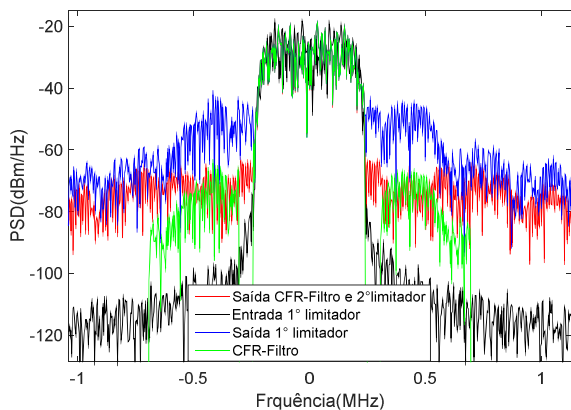


Fig. 5. Densidades espectrais de potência (PSDs) dos CFRs usando um e dois blocos de limitação.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho evidencia que a técnica de CFR com dois limitadores é bem mais eficiente na redução da PAPR do que implementar uma técnica de CFR usando apenas um limitador. Além disso, foi realizada uma otimização global para a identificação simultânea de todos os parâmetros dos limitadores e filtro. Através dessa

otimização, obteve-se o nível de saturação do PA, que corresponde ao fator de *clipping* do segundo limitador, uma vez que esse mesmo limitador age como um PA saturado. O CFR com 2 limitadores oferece uma redução adicional de 1,2 dB no valor da PAPR do sinal de teste em comparação com o CFR com 1 único limitador. Cumpre destacar que, no que se refere à aplicação prática da CFR, não há nenhum custo adicional para a implementação deste segundo limitador. A implementação prática deste segundo limitador é realizada mediante a saturação do PA linearizado pelo DPD.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Sandrine, "Power consumption trade-off between power amplifier OBO, DPD, and clipping and filtering", *International Teletraffic Congress (ITC), 26th international, IEEE*, p. 1-5, 2014.
- [2] D. Raychaudhuri and N. B. Mandayam, "Frontiers of Wireless and Mobile Communications", *Proceedings of the IEEE*, v.100, no.4, p.824-840, 2012.
- [3] D. Gustafsson, C. M. Anderson, and C. Fager, "A modified Doherty power amplifier with extended bandwidth and reconfigurable efficiency", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v.61, n.1, p.533-542, 2013.
- [4] F.A. Schoulten and E.G. Lima, "Optimized IIR filter applied to the limiting and filtering technique for peak-to-average power ratio reduction", *XVII Microelectronics Students Forum (SForum)*, Fortaleza, 2017.
- [5] L. D. Silva, "Limitador seguido de filtro linear para redução do fator de crista em sistemas de comunicações sem fio". *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curitiba, 2016.
- [6] Q. Hammi, "Efficient linear amplification using digitally predistorted overdriven power amplifiers", *IEEE Transactions on broadcasting*, v.61, n.3, p. 398-406, 2015.
- [7] T. Jiang and Y. Wu, "An overview: Peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signals", *IEEE Transactions on broadcasting*, v.54, n.2, p.257-268, 2008.
- [8] R. Braithwaite, "A combined approach to digital predistortion and crest factor reduction for the linearization of an RF power amplifier", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v.61, n.1, p.291-302, 2013.