

# Cancelamento de Distorções Não Lineares em Sistemas OFDM Cooperativos AF

Felipe Cardoso dos Anjos e Carlos Alexandre Rolim Fernandes

**Resumo**—Este artigo propõe uma técnica iterativa para o cancelamento de distorções não lineares (NL) em sistemas OFDM cooperativos AF. A técnica proposta estima e cancela as distorções NL causados pelo uso de PAs na fonte e no relay. Com esta técnica o receptor estimará as distorções NL da fonte e estas estimativas o auxiliarão na detecção e cancelamento das distorções NL do relay. O sistema proposto foi avaliado através de simulações numéricas. Os resultados obtidos permitiram verificar que a técnica proposta possui uma grande capacidade de cancelar as distorções não lineares, fornecendo resultados muito próximos ao caso com PAs lineares.

**Palavras-Chave**—OFDM, sistema cooperativo, correção iterativa com detecção *hard*, amplificador não linear.

**Abstract**—In this paper, we propose an iterative technique for canceling nonlinear distortions in cooperative OFDM systems AF. The proposed technique estimates and cancels the nonlinear distortions caused by the use of PAs at source and relay. With this technique the receiver will estimate the nonlinear distortions of the source and these estimates will aid in the detection and cancellation of the nonlinear distortions of the relay. The proposed system was evaluated through numerical simulations. The obtained results showed that the proposed technique has a great ability to cancel the nonlinear distortions, providing results very close to the case with linear PAs.

**Keywords**—OFDM, cooperative systems, iterative correction hard detection, nonlinear amplifier.

## I. INTRODUÇÃO

A técnica de Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) está entre as principais tecnologias de interface aérea em sistemas de comunicação sem fio. Esta técnica, além de possuir boa eficiência espectral, é bastante robusta a canais seletivos em frequência, proporcionando ao sistema altas taxas de transmissão de dados, robustez à interferência intersimbólica (ISI - *Intersymbol Interference*) e robustez à interferência entre subportadoras (ICI - *Inter-carrier Interference*), com baixa complexidade [1].

Uma das principais desvantagens dos sistemas OFDM é o alto valor da razão entre a potência de pico e a potência média (PAPR - *Peak-to-Average Power Ratio*) do sinal recebido [2]. Isso ocorre devido à soma coerente das várias subportadoras com símbolos independentes. Um fator bastante agravante da PAPR está relacionado com as distorções causadas pelo uso de amplificadores de potência (PA - *Power Amplifiers*) não

lineares, pois os altos valores da PAPR na entrada destes dispositivos resultam em distorções do sinal transmitido, podendo causar falhas na detecção da informação no receptor [4].

Uma importante característica dos sistemas OFDM é, portanto, a sensibilidade a PAs não lineares. Estes dispositivos podem danificar o sinal transmitido, inserindo distorções na forma de onda do sinal, comprometendo a detecção no receptor [4]. Há algumas soluções com o objetivo de reduzir os efeitos NL impostos pelo uso de PAs, que são: técnicas de pré-distorção NL do sinal no transmissor e técnicas de cancelamento de distorções NL no receptor. As técnicas de pré-distorção realizam um processamento do sinal no transmissor com o objetivo de reduzir a PAPR para que os picos de amplitude do sinal não atinjam regiões não lineares [7], [8]. Já as técnicas de cancelamento de distorções buscam estimar iterativamente e cancelar as distorções NL no receptor [3], [4], [7]-[14].

A proposta deste trabalho visa o cancelamento de distorções NL no receptor. Uma vantagem desta abordagem é que a técnica poderá levar em consideração outras interferências NL do canal, enquanto as técnicas de pré-distorção agem sem levar em consideração as interferências inseridas pelo canal [6], [7]. Outra vantagem do cancelamento de distorção no receptor é que, em *uplink*, a complexidade fica concentrada na estação base. Um outro fator importante a ser mencionado neste estudo é que técnicas iterativas apresentam maior estabilidade do que métodos não iterativos no contexto de cancelamento de interferência [9].

Em outros estudos podemos encontrar aplicações de algoritmos iterativos para o cancelamento de interferências como em [10] e [11], que consideram o impacto não linear sobre os dados pilotos durante a estimação do canal, de forma a melhorar o desempenho do cancelamento das interferências não lineares. Em [3] é proposta uma técnica denominada CIDH (Correção Iterativa com Detecção *Hard*). Esta técnica estima e cancela a distorção causada por *clipping* (ceifamento). O ruído é gerado por um processo conhecido e que pode ser estimado no receptor e na sequência removido. Em [2] os autores aplicam a técnica CIDH em sistemas OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), em que o receptor deverá realizar uma detecção multiusuário para estimar e cancelar as distorções provenientes do PA. Em [8] são avaliados e comparados dois métodos de cancelamento de distorções NL, o método de extensão ativa da constelação, aplicado no transmissor, e o receptor iterativo com CIDH.

Em [12] o autor propõe uma técnica para estimar iterativamente a resposta ao impulso do canal e reduz as fontes de ruído em duas etapas, pré- e pós- processamento do ruído.

Felipe Cardoso dos Anjos e Carlos Alexandre Rolim Fernandes, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, *Campus* de Sobral, CE, Brasil, E-mails: felipecardoso-fca@hotmail.com, alexandrefernandes@ufc.br.

No estudo, a atenuação do ruído pós-processado envolve a reconstrução iterativa do ruído impulsivo residual, que é subtraído do sinal recebido. Em [13], é proposta uma técnica para o cancelamento de distorções NL baseada no modelo de Volterra para o PA em Rádio Cognitivo OFDM baseado no *uplink*. Em [14], foi aplicado um método iterativo para o cancelamento de distorção não linear no receptor para um sistema de Rádio Cognitivo baseado em FBMC (*Filter Bank based Multi-Carrier*) sobre um canal com desvanecimento plano usando o método de detecção de energia. Em [15], os autores propõem um esquema de cancelamento iterativo para interferência de canal adjacente (*ACI - Adjacent Channel Interference*) causada por PA não linear em um sistemas de ondas milimétricas (*mmW - millimeter wave*) por meio de análise de regressão polinomial dos símbolos pilotos e do sinal modulado recuperado no receptor para aumentar a precisão da estimativa nas regiões de nível de sinal mais elevado.

Por outro lado, os sistemas de comunicação cooperativa ocupam lugar de destaque como uma tecnologia promissora para o futuro das telecomunicações. Esta técnica utiliza os nós da rede mais próximos como repetidores (*relays*) que cooperam com o transmissor e receptor para proporcionar diversidade espacial ao sistema. Os ganhos alcançados por meio dessa estratégia são semelhantes aos dos sistemas de múltiplas antenas convencionais, no entanto, com custo e complexidade menores. Para isso os *relays* utilizam algum tipo de protocolo de cooperação, dentre eles, destacamos o protocolo Amplifica-e-Encaminha (*AF - Amplify-and-Forward*) e o protocolo Decodifica-e-Encaminha (*DF - Decode-and-Forward*) [1], [5], [6]. Utilizaremos o protocolo AF neste artigo, visto que apresenta bom desempenho e baixa complexidade de implementação.

Uma técnica para o cancelamento de distorções NL em sistemas OFDM cooperativos é proposta em [4] para estimar e cancelar distorções NL provenientes apenas do *relay*. Neste trabalho, nós estendemos o cancelamento de distorções NL para o caso de um sistema OFDM cooperativo AF com PAs NL tanto na fonte quanto no *relay*. Ou seja, nós aplicamos a técnica de correção iterativa com detecção *hard* (CIDH) para o cancelamento de distorções NL causadas pelo uso de PAs na fonte e no *relay*. Esta técnica será denominada Duplo-CIDH. Com ela o receptor estimará as distorções NL da fonte e estas estimativas o auxiliarão na detecção e cancelamento das distorções NL do *relay*. Para avaliar o desempenho da técnica proposta, são apresentados resultados de simulação ao final do trabalho. Os resultados obtidos demonstram a eficácia do método proposto.

O resto deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta o modelo de sistema OFDM cooperativo AF com PA não linear na fonte e no *relay*. A Seção III trará o algoritmo CIDH para o cancelamento de distorções NL do *relay*. Na Seção IV apresentamos o algoritmo proposto que estima e cancela as distorções da fonte e do *relay*. Na Seção V mostramos os resultados das simulações computacionais. Por fim, a Seção VI traz as conclusões do trabalho e algumas considerações.

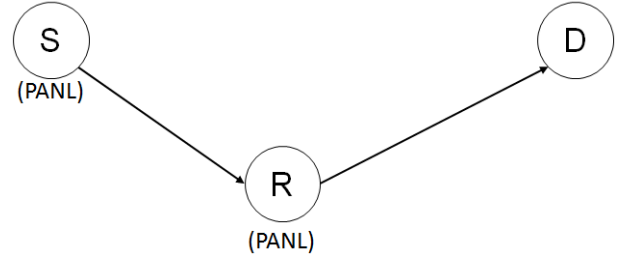


Fig. 1. Modelo de sistema de comunicação cooperativo.

## II. MODELAGEM DO SISTEMA

Consideramos um sistema cooperativo OFDM composto por uma fonte transmissora (S), um *relay* (R) com protocolo AF e um destino (D). A transmissão ocorre em dois *slots* de tempo. Todos esses dispositivos são equipados com uma antena omnidirecional e são *half-duplex*. Assumimos que a fonte e o *relay* possuem PAs não lineares (PANL), como mostra a Figura 1. Consideremos apenas a transmissão envolvendo o *link* Fonte-Relay-Destino (SRD), supondo que o enlace direto Fonte-Destino (SD) não possui qualidade aceitável. Assumimos que os canais são seletivos em frequência e sofrerão interferências causadas por ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) de média nula e variância  $\sigma_w$ .

Na fonte, os sinais são modulados por amplitude em quadratura (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*). Depois disso, aplica-se a transformada de Fourier rápida inversa (IFFT), adiciona-se o prefixo cíclico para gerar os símbolos OFDM e, por fim, o sinal passará por um PA não linear sem memória.

Assumiremos que os dados transmitidos são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.) e para altos valores de  $N$  o sinal no domínio do tempo pode ser considerado uma variável aleatória Gaussiana complexa [14], [16]. Portanto, podemos expressar por meio da extensão do Teorema de Busgang, a saída do PA do transmissor no domínio do tempo, como [4], [13], [14], [16], [17]:

$$u_n^{SR} = f_S(s_n) = k_s s_n + d_n^S; \quad (1)$$

em que  $1 \leq n \leq N$ ,  $s_n$  é o sinal contendo a informação no domínio do tempo,  $u_n^{SR}$  é o sinal de saída do PA não linear,  $f_S(\cdot)$  é a função sem memória que modela o PA da fonte (S),  $d_n^S$  é uma distorção não linear decorrelacionada com  $s_n$  inserida pelo PA da fonte e  $k_s$  é um coeficiente associado ao PA. Existem expressões analíticas para  $k_s$  e para a variância da distorção não linear para alguns modelos de PA [3], [8], [17], [18].

Reescrevendo (1) no domínio da frequência, teremos:

$$U_n^{SR} = k_s S_n + D_n^S; \quad (2)$$

em que  $n$  é o índice da subportadora,  $U_n^{SR}$ ,  $S_n$  e  $D_n^S$  representam, respectivamente, as transformadas discretas de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*) de  $u_n^{SR}$ ,  $s_n$  e  $d_n^S$  para  $1 \leq n \leq N$ .

O sinal recebido do *link* Fonte-Relay no domínio da frequência, pode ser representado por:

$$X_n^{SR} = U_n^{SR} H_n^{SR} + W_n^{SR}, \quad (3)$$

em que  $H_n^{SR}$  e  $W_n^{SR}$  representam, respectivamente, a resposta em frequência do canal SR e o ruído AWGN.

O *relay* adiciona um ganho  $g_n$  a cada subportadora do sinal recebido através do *link* SR no domínio da frequência, sendo o sinal na entrada do PA do *relay* dado por:

$$\begin{aligned} Z_n^{RD} &= g_n X_n^{SR}; \\ &= g_n [U_n^{SR} H_n^{SR} + W_n^{SR}]; \\ &= g_n H_n^{SR} k_s S_n + g_n H_n^{SR} D_n^S + g_n W_n^{SR}, \end{aligned} \quad (4)$$

em que  $H_n^{SR}$  e  $\sigma_W$  expressam, respectivamente, a resposta em frequência do canal SR e a potência do ruído.

O sinal de saída do PA do *relay*, na segunda etapa de transmissão, no domínio da frequência, pode ser representado por:

$$U_n^{RD} = f_R(Z_n^{RD}) = k_r Z_n^{RD} + D_n^R, \quad (5)$$

em que  $k_r$  é o coeficiente associado ao PA do *relay*,  $f_R(\cdot)$  é a função sem memória que modela o PA do *relay* e  $D_n^R$  é uma distorção não linear descorrelacionada com  $Z_n^{SR}$  inserida pelo PA do *relay*. Substituindo (4) em (5), podemos reescrever:

$$\begin{aligned} U_n^{RD} &= k_r g_n H_n^{SR} k_s S_n + k_r g_n H_n^{SR} D_n^S + \\ &+ k_r g_n W_n^{SR} + D_n^R; \end{aligned} \quad (6)$$

O sinal recebido do *link* RD, no domínio da frequência, pode ser representado por:

$$X_n^{RD} = U_n^{RD} H_n^{RD} + W_n^{RD}, \quad (7)$$

em que  $H_n^{RD}$  e  $W_n^{RD}$  representam, respectivamente, a resposta em frequência do canal RD e o ruído AWGN. De modo análogo, substituindo (6) em (7):

$$\begin{aligned} X_n^{RD} &= H_n^{RD} k_r g_n H_n^{SR} k_s S_n + H_n^{RD} k_r g_n H_n^{SR} D_n^S + \\ &+ H_n^{RD} k_r g_n W_n^{SR} + H_n^{RD} D_n^R + W_n^{RD}; \end{aligned} \quad (8)$$

Reescrevendo (8), temos:

$$\begin{aligned} X_n^{SRD} &= H_n^{SRD} S_n + H_n^{RD} k_r g_n H_n^{SR} D_n^S + H_n^{RD} D_n^R \\ &+ W_n^{SRD}; \end{aligned} \quad (9)$$

em que  $H_n^{SRD} = H_n^{RD} k_r g_n H_n^{SR} k_s$  e  $W_n^{SRD} = H_n^{RD} k_r g_n W_n^{SR} + W_n^{RD}$ .

Como se pode ver em (9), os sinais recebidos sofrerão os efeitos provocados pelas distorções NL advindas dos PAs, que podem causar erros na detecção do sinal recebido. No entanto, a aplicação de técnicas de cancelamento de distorções NL são capazes de reduzir estes efeitos e produzir bons resultados.

Nas próximas seções apresentaremos a técnica proposta em [4], que consiste em uma versão da técnica CIDH para um sistema cooperativo onde o *relay* possui um PA não linear. Em seguida, apresentaremos a técnica proposta neste trabalho. Ambos algoritmos supõem que o receptor possui conhecimento de todos os canais e das constantes dos PAs.

### III. CORREÇÃO ITERATIVA COM DETECÇÃO HARD (CIDH) EM SISTEMA COOPERATIVO AF

A técnica CIDH, proposta em [3], consiste em estimar e cancelar as distorções NL em sistemas OFDM não cooperativos. O ruído é reproduzido por um processo de estimação iterativa e cancelado no receptor. Para um sistema de comunicação OFDM cooperativo com um *relay* AF, [4] propõe um receptor iterativo para o cancelamento das distorções NL impostas pelo uso de PA apenas no *relay*.

O sinal recebido no domínio da frequência é equalizado e demodulado para se obter uma estimação inicial dos símbolos transmitidos, supondo que os PAs são lineares. Em seguida, é realizada a detecção *hard* dos símbolos. Na sequência, os sinais são modulados e é gerada uma estimativa dos sinais transmitidos pelo *relay* no domínio do tempo. O passo seguinte submete o sinal estimado à não linearidade imposta pela transmissão para que possamos estimar e cancelar as distorções. Descreveremos a seguir as etapas do algoritmo:

- 1) Fazer  $\tilde{X}_n = X_n^{RD}$ , para  $1 \leq n \leq N$ ;
- 2) Equalizar o sinal no domínio da frequência:  $\tilde{S}_n = \tilde{X}_n / (H_n^{SR} H_n^{RD} k_r g_n)$ ;
- 3) Realizar a detecção *hard*, projetando o sinal  $\tilde{S}_n$  na constelação de símbolos transmitidos;
- 4) Calcular o sinal na entrada do PA no *relay* como:  $\tilde{z}_n^{RD} = \text{IFFT}(\tilde{S}_n H_n^{SR} g_n)$ ;
- 5) Calcular:  $\tilde{u}_n^{RD} = f_R(\tilde{z}_n^{RD})$ ;
- 6) Estimar as distorções NL no *relay* por meio da extensão do Teorema de Bussgang:  $\tilde{d}_n^R = \tilde{u}_n^{RD} - \tilde{z}_n^{RD} k_r$ ;
- 7) Cancelar as distorções da seguinte forma:  $\tilde{X}_n = X_n^{RD} - \tilde{D}_n^R H_n^{RD}$ , em que  $\tilde{D}_n^R$  é a FFT de  $\tilde{d}_n^R$ ;
- 8) Se convergência é atingida, para algoritmo. Caso contrário, ir para Etapa 2.

Como se pode observar, o algoritmo acima cancela apenas as distorções não lineares oriunda do *relay*. Na próxima seção apresentaremos o algoritmo proposto. Com este método proposto, o receptor criará as condições necessárias para obter estimativas das distorções NL da fonte e estas estimativas o auxiliarão na detecção e cancelamento das distorções NL do *relay*.

### IV. DUPLO-CIDH PARA SISTEMA OFDM COOPERATIVO AF

Nesta seção apresentaremos o algoritmo proposto, denominado Duplo-CIDH. Este algoritmo iterativo irá estimar e cancelar as distorções NL provenientes da fonte  $d_n^S$  e do *relay*  $d_n^R$ .

Tal como no algoritmo anterior, o receptor fará a equalização e demodulação do sinal recebido no domínio da frequência para se obter uma estimação inicial dos símbolos transmitidos, supondo que os PAs são lineares. Na etapa seguinte, o algoritmo estima o sinal na entrada do PA na fonte e este sinal é levado para o domínio do tempo para gerar uma estimativa dos sinais transmitidos pela fonte. Em seguida, o algoritmo reproduz a não linearidade imposta na fonte para estimar e cancelar as distorções oriundas do PA da fonte por meio da extensão do Teorema de Bussgang. Na próxima etapa,

o algoritmo usará as estimativas das distorções da fonte para estimar com maior precisão o sinal transmitido pelo *relay*. O receptor reproduzirá a não linearidade impostas no *relay* para estimar as distorções oriundas do PA do *relay* e efetuar o cancelamento. Descreveremos a seguir as etapas do algoritmo:

- 1) Fazer  $\tilde{X}_n = X_n^{RD}$ , para  $1 \leq n \leq N$ ;
- 2) Equalizar o sinal no domínio da frequência:  $\tilde{S}_n = \tilde{X}_n / (H_n^{SR} H_n^{RD} k_s g_n k_r)$ ;
- 3) Realizar a detecção *hard*, projetando o sinal  $\tilde{S}_n$ ;
- 4) Estimar o sinal na entrada do PA na fonte como:  $\tilde{s}_n^{SR} = \text{IFFT}(\tilde{S}_n)$ ;
- 5) Calcular:  $\tilde{u}_n^{SR} = f_S(\tilde{s}_n^{SR})$ ;
- 6) Estimar as distorções NL na fonte por meio da extensão do Teorema de Busgang:  $\tilde{d}_n^S = \tilde{u}_n^{SR} - \tilde{s}_n^{SR} k_s$ ;
- 7) Calcular a FFT de  $\tilde{d}_n^S$ ;
- 8) Estimar o sinal na entrada do PA no *relay* como:  $\tilde{z}_n^{RD} = \text{IFFT}(H_n^{SR} k_s \tilde{S}_n + g_n H_n^{SR} \tilde{D}_n^S)$ ;
- 9) Calcular:  $\tilde{u}_n^{RD} = f_R(\tilde{z}_n^{RD})$ ;
- 10) Estimar as distorções NL no *relay* por meio da extensão do Teorema de Busgang:  $\tilde{d}_n^R = \tilde{u}_n^{RD} - \tilde{z}_n^{RD} k_r$ ;
- 11) Efetuar o cancelamento das distorções da seguinte forma:  $\tilde{X}_n = X_n^{RD} - H_n^{RD} k_s g_n H_n^{SD} \tilde{D}_n^S - H_n^{RD} \tilde{D}_n^R$ , em que  $\tilde{D}_n^S$  e  $\tilde{D}_n^R$  são as FFT's de  $\tilde{d}_n^S$  e  $\tilde{d}_n^R$ , respectivamente;
- 12) Se convergência é atingida, para algoritmo. Caso contrário, ir para Etapa 2.

Em um cenário com a fonte e o *relay* possuindo PAs não lineares, o Duplo-CIDH deve apresentar melhor desempenho em comparação com o algoritmo apresentado anteriormente. De fato, além de estimar as distorções NL da fonte, o Duplo-CIDH estima melhor as distorções NL do *relay*, já que as distorções NL no *relay* dependem das distorções NL da fonte.

## V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção apresentaremos os resultados das simulações numéricas. Para todas as simulações foram utilizadas  $10^5$  amostras de Monte Carlo, modulação 16-QAM, canais com desvanecimento seletivo em frequência do tipo *Rayleigh* com 4 *taps* e prefixo cíclico de tamanho 3. O *relay* está equipado com protocolo de cooperação AF de ganho variável. Utilizamos como indicador de desempenho para avaliar os resultados a taxa de erro de símbolos (SER - *Symbol Error Rate*). Utilizamos  $P_s = P/2$  e  $P_r = P/2$ , em que  $P$ ,  $P_s$  e  $P_r$  são, respectivamente, a potência total de transmissão, potência de transmissão da fonte e potência de transmissão do *relay*. Adotaremos nas simulações o modelo de PA *Soft-Clipping* [17], com amplitude de saturação igual a 1, visto que possui grande aplicabilidade e baixa complexidade de implementação.

A Figura 2 apresenta as curvas da SER em função da SNR para  $N=512$ , para cenários em que há PA linear e PA não linear na fonte e no *relay*, este caso sem aplicação de nenhuma técnica, com aplicação da técnica CIDH apenas no *relay* [3] e com aplicação da técnica proposta Duplo-CIDH. Observa-se na Figura 2 que o caso com PA linear apresenta o melhor desempenho em relação aos casos com PA não linear, como esperado. O caso sem nenhuma técnica apresenta

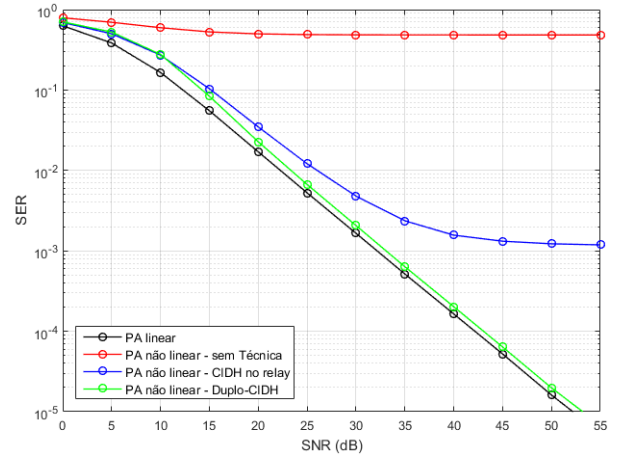


Fig. 2. SER em função da SNR para as técnicas CIDH no *relay* e Duplo-CIDH.

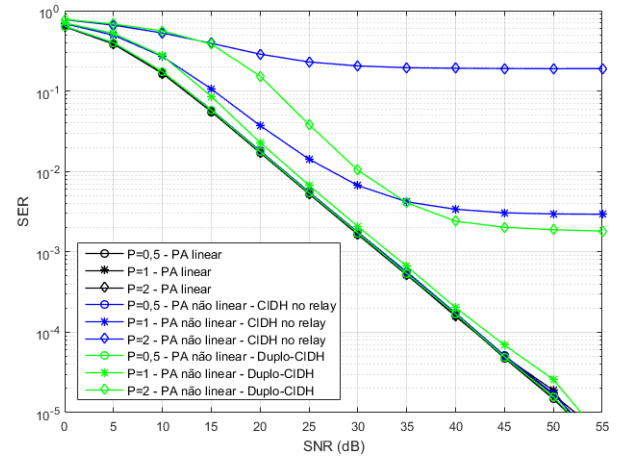


Fig. 3. SER em função da SNR para as técnicas CIDH no *relay* e Duplo-CIDH para vários valores de  $P$ .

o pior desempenho dentro dos cenários analisados. Para o caso com aplicação da técnica CIDH apenas para estimação e cancelamento das interferências causadas pelo PA do *relay* consegue-se melhorar a performance do sistema, no entanto, esta técnica ainda deixou a SER em níveis bastantes elevados. Isto se deve ao fato que ela não cancela as distorções oriundas do PA da fonte. Utilizando a técnica proposta Duplo-CIDH obtemos um ganho expressivamente maior. Isto ocorre pois o algoritmo proposto, em comparação com o anterior, além de estimar as distorções NL da fonte, ele estima as distorções NL do *relay* de forma mais precisa, fornecendo resultados muito próximos ao caso com PAs lineares.

A Figura 3 mostra a SER em função da SNR para as técnicas CIDH no *relay* e Duplo-CIDH para vários valores de  $P$ , potência total de transmissão ( $P = P_s + P_r$ ), e  $N=64$  subportadoras. Primeiramente, percebemos que as curvas com PAs lineares apresentam desempenho superior em relação aos PAs NL para as potências testadas, conforme explicado anteriormente na Figura 2. À medida que a potência de transmissão aumenta há uma perda de desempenho do sistema, isto ocorre porque para altos valores de  $P$  há mais distorções NL inseridas. Neste cenário, a técnica proposta se destaca por

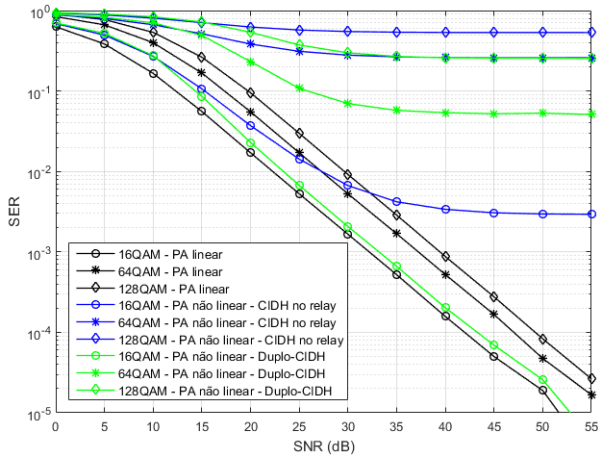


Fig. 4. SER em função da SNR para as técnicas CIDH no relay e Duplo-CIDH para várias ordens de modulação QAM.

apresentar o melhor desempenho nos testes realizados, o que demonstra a eficácia e robustez do receptor com algoritmo Duplo-CIDH.

Na Figura 4, apresenta-se a SER em função da SNR para as técnicas CIDH no relay e Duplo-CIDH para várias ordens de modulação QAM. Observa-se que os cenários com PAs lineares apresentam melhor desempenho em comparação aos cenários com PAs NL para as ordens de modulações analisadas, conforme explicado na Figura 2. Pode-se observar que para o caso da técnica proposta Duplo-CIDH os resultados são sempre melhores do que para a CIDH no relay, para todas as ordens de modulações testadas. Observa-se ainda que, quando a ordem da modulação aumenta, a SER piora em todos os casos analisados. Ademais, a diferença entre as SERs da técnica proposta e do caso linear aumenta quando a ordem da modulação aumenta. Isto ocorre pois, como já demonstrado anteriormente em [7], as modulações com ordens mais elevadas são mais sensíveis às distorções não lineares.

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo propomos uma técnica capaz de estimar e cancelar distorções NL em sistema cooperativo AF OFDM com PA não linear na fonte e no relay. Com esta técnica o receptor estimará as distorções NL da fonte e estas estimações o auxiliarão na detecção e cancelamento das distorções NL do relay. O Duplo-CIDH estende a aplicação proposta em [4] para um caso mais genérico. Seu diferencial está no fato que as distorções NL no relay dependem das distorções NL da fonte, ou seja, este algoritmo, em comparação com o anterior, além de estimar as distorções NL da fonte, ele estima melhor as distorções NL do relay. Os resultados das simulações computacionais realizadas mostraram que a técnica proposta apresenta maiores ganhos em todos os cenários analisados.

Em trabalhos futuros analisaremos o desempenho do receptor considerando o link direto, RD. Será incluído na análise o método de combinação de máxima razão (MRC - *Maximal Ratio Combining*). Outra vertente a ser analisada é a inclusão de técnicas de estimação de canal em conjunto com o método proposto.

## REFERÊNCIAS

- [1] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and G. Y. Li, "OFDM and its Wireless Applications: A Survey," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, Maio 2009.
- [2] Silas L. Silva e C. A. R. Fernandes, "Cancelamento de Distorções Não Lineares em Sistemas OFDMA com Detecção Multiusuário," *XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT'13)*, Fortaleza, Brasil, Setembro 2013.
- [3] H. Chen e A. M. Haimovich, "Iterative Estimation and Cancellation of Clipping Noise for OFDM Signals," *IEEE Communications Letters*, vol. 7, n. 7, pág. 305 - 307, Julho 2013.
- [4] V. del Razo, et al., "Nonlinear Amplifier Distortion in Cooperative Amplify-and-Forward OFDM Systems," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, Bahía Blanca, Argentina, Abril 2009.
- [5] K. J. R. Liu, A. K. Sadek, W. Su and A. Kwasinski, *Cooperative Communications and Networking*, 1st ed., Cambridge University Press, 2008.
- [6] J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dezembro 2004.
- [7] C. A. R. Fernandes, J. C. M. Mota e G. Favier "Analysis and Power Diversity-Based Cancellation of Nonlinear Distortions in OFDM Systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 7, pág. 3520 - 3531, Julho 2012.
- [8] I. A. Ulian e A. N. Barreto, "Comparação entre Pós- e Pré-Processamento para a Mitigação dos Efeitos Não Lineares em um Sistema OFDM," *XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT'11)*, Curitiba, Brasil, Outubro 2011.
- [9] M. Mostafa, "Stability Proof of Iterative Interference Cancellation for OFDM Signals With Blanking Nonlinearity in Impulsive Noise Channels," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, no. 2, pág. 201 - 205, Fevereiro 2017.
- [10] J. Šterba, J. Gazda e M. Deumal, "Iterative Algorithm for Nonlinear Noise Cancellation and Channel Re-Estimation in Nonlinearly Distorted OFDM System," *IEEE 8th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics - (SAMII)*, pág. 65 - 70, Slovakia, Janeiro 2010.
- [11] Z. Li e X. Mu, "A Nonlinear Distortion Compensation Algorithm Combined with Channel Estimation in OFDM System," *International Conference on Computational and Information Sciences*, pág. 813 - 816, Zhengzhou, China, Outubro 2011.
- [12] Y.-R. Chien, "Iterative Channel Estimation and Impulsive Noise Mitigation Algorithm for OFDM-Based Receivers with Application to Power-Line Communications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 6, pág. 2435 - 2442, Dezembro 2015.
- [13] M. B. Mabrouk, et al, "Compensating Power Amplifier Distortion in Cognitive Radio Systems with Adaptive Interacting Multiple Model," *23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pág. 1212 - 1216, Talence, França, Setembro 2015.
- [14] H. Lajnef, M. C. Dakhli e M. H. R. Bouallegue, "The Nonlinear Distortion cancellation for the effect of HPA nonlinearities in filter bank based multi-carrier (FBMC) for Cognitive Radio systems," *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pág. 638 - 643, Tunis, Tunísia, Setembro 2016.
- [15] N. Osawa, S. Ibi e S. Sampei "Iterative Canceller of Adjacent Channel Interference Induced by Nonlinearity of Power Amplifier in Millimeter Wave Systems," *IEEE 26th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC): Fundamentals and PHY*, pág. 781 - 786, Suita, Japão, Setembro 2015.
- [16] I. Iofedov e D. Wulich, "Distortion Cancellation Precoding for OFDM-SDMA Downlink with Nonlinear Power Amplifiers," *IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pág. 704 - 709, Setembro 2015.
- [17] D. Dardari, V. Tralli e A. Vaccari "A Theoretical Characterization of Nonlinear Distortion Effects in OFDM Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 10, pág. 1755 - 1764, Outubro 2000.
- [18] E. J. P. Farias, D. A. Sousa, C. A. R. Fernandes e C. E. R. Fernandes, "Receptor Ótimo para Sistemas OFDM Cooperativos com Amplificadores de Potência Não Lineares," *XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBRT'12)*, Brasília-DF, Brasil, Setembro 2012.