

HARDWARE ACELERADOR BASEADO EM FPGA PARA A ESTRUTURA DE REDE DO 5G UTILIZANDO TÉCNICA DE PRÉ-CODIFICAÇÃO DO SINAL UFMC COM LINGUAGEM OPENCL

Palavras-Chave: FPGA, UFMC, PAPR, Pré-codificação

Autores/as:

Gabriel Pedro Paião, FT, Unicamp

Youssef Hassan Gharib, FT, Unicamp

Prof. Dr. Rangel Arthur (orientador) FT, Unicamp

INTRODUÇÃO:

Um sistema de comunicação qualquer consiste na transmissão de informação de um local para o outro. Para um sistema de comunicação sem fio, como é o caso do 5G, a informação que sai do transmissor precisa ser modulada. A modulação consiste num processo utilizado em telecomunicações para a transmissão eficaz de sinais de baixa frequência. O princípio da modulação baseia-se na ideia de associar ao sinal que contém a informação outro que lhe servirá de suporte, conhecido como onda portadora. Para isso as características da portadora são modificadas com a finalidade de transmitir as informações, sendo feitas as alterações combinadas de frequência, amplitude ou fase. A operação se realiza num andar chamado modulador. Por fim, essa onda portadora modulada trafega por um canal de comunicação transportando toda informação [1].

Sistemas de comunicação da 4ª Geração (4G) como *LTE/LTE Advanced* e *Wi-fi* utilizam da técnica *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), que é a Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais. Isto se dá principalmente pela alta eficiência de largura de banda que oferece, sua capacidade de superar a dispersão induzida pelo canal e o emprego da equalização de toque único no domínio da frequência que ela suporta. [2].

Embora tenha implementação eficiente e robustez à atrasos de canal, este método sofre de alta PAPR que resulta na baixa eficiência do amplificador de potência e aumenta o consumo de bateria. Além disso, o espectro OFDM possui muitos lóbulos laterais fora da banda, causando problemas de baixa eficiência espectral [3] e elevando o ruído no receptor, o que prova que esse método é insuficiente para preencher os requerimentos do 5G. O UFMC, no entanto, é uma generalização da técnica de OFDM no qual grupos de sub-bandas são filtrados. O UFMC divide a banda total em sub-bandas, onde cada

sub-banda possui um número fixo de subportadoras [4].

No transmissor UFMC, as sub-bandas são formadas a partir de toda a banda de subportadoras (N). Depois, todas as subportadoras são convertidas em transmissão serial para paralela antes de ser aplicada a Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT). O IFFT de N pontos é calculado, com os portadores não alocados sendo substituídos por zeros para evitar interferência entre as portadoras. O comprimento do filtro (L) é filtrado para todas as sub-bandas e os resultados das diferentes sub-bandas são mesclados. A operação de filtragem é usada para reduzir as emissões espectrais que estão fora da banda. Cada sub-banda tem um filtro Dolph-Chebyshev adicionado a ela, que fará a filtragem do sinal após a saída da IFFT.

No receptor, o sinal recebido é executado e extraído através da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT), na qual cada filtro de sub-banda expande o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência com fator de 2. Um lóbulo principal da subportadora corresponde a cada valor de frequência alternativo. Na maioria dos casos, a equalização por subportadora é empregada para equalizar os canais e os efeitos combinados da filtragem de sub-banda. Neste caso, nenhum efeito de canal é estimulado, apenas o filtro de sub-banda é equalizado. Por fim, o canal de Ruído Gaussiano Branco (AWGN) é introduzido no sinal de recepção para obter a Relação Sinal-Ruído SNR equivalente a testes realizados em campo [4].

METODOLOGIA:

A. Definição de PAPR

PAPR define-se como a relação ente a potência máxima e a média de um sinal $x(t)$, podendo ser escrita como

$$PAPR(dB) = 10 \log \frac{\max |x(t)|^2}{E \{|x(t)|^2\}}$$

Para ilustrar de forma gráfica os valores do PAPR, a Função de Distribuição Cumulativa Complementar (CCDF) é utilizada

$$CCDF = Probabilidade(PAPR \geq PAPR_0)$$

Sendo $PAPR_0$ um nível de referência escolhido.

B. Técnica SRC

A técnica de pré-codificação proposta consiste em multiplicar o sinal original por uma matriz tipo SRC, do inglês, *Square Root Cosine* de dimensões $L \times N$, antes de fazer a conversão de serial para paralelo. Com essa modificação, deve haver uma redução eficiente de PAPR no canal.

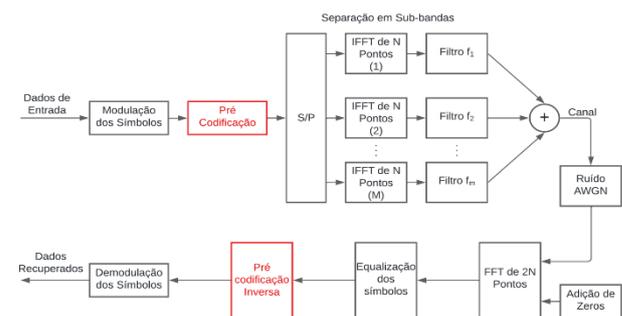


Figura 1. Diagrama de blocos do modelo de pré-codificação proposto

De modo geral, a matriz é do tipo

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{0,0} & p_{0,1} & \cdots & p_{0,N-1} \\ p_{1,0} & p_{1,1} & \cdots & p_{1,N-1} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ p_{L-1,0} & p_{L-1,1} & \cdots & p_{L-1,N-1} \end{bmatrix}$$

Onde $p_{i,j}$ são os elementos da matriz de pré-codificação, $L = N + N_p$ é o número total de subportadoras, N_p são subportadoras extras usadas para *overhead* sendo $0 \leq N_p \leq N$.

Considerando na entrada do sistema um vetor \mathbf{x} com número de subportadoras ortogonais N do tipo

$$\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]$$

A saída do pré-codificador seria

$$\mathbf{z} = \mathbf{P} \times \mathbf{x} = [z_0, z_1, \dots, z_{L-1}]$$

Os elementos da matriz \mathbf{P} são sugeridos como

$$p_{i,n} = p_{i,0} e^{-j2\pi \frac{in}{N}}$$

com

$$p_{i,0} = \begin{cases} \frac{(-1)^i}{\sqrt{N}} \text{sen} \left(\frac{\pi i}{2N_p} \right) & 0 \leq i < N_p \\ \frac{(-1)^i}{\sqrt{N}} & N_p \leq i < N \\ \frac{(-1)^i}{\sqrt{N}} \text{cos} \left[\frac{\pi(i-N)}{2N_p} \right] & N \leq i < L - 1 \end{cases}$$

O parâmetro β , conhecido como variável nula, é

$$\beta = \frac{L - N}{N} = \frac{N_p}{N}$$

Percebe-se, então, que conhecendo o número de subportadoras ortogonais e subportadoras de *overhead*, é possível definir a matriz \mathbf{P} . Além disso, é fácil demonstrar que \mathbf{P} satisfaz a condição de ortogonalidade abaixo

$$\mathbf{P} \times \mathbf{P}^T = \mathbf{I}$$

Onde \mathbf{I} é a matriz identidade de dimensões $N \times N$ e \mathbf{P}^T é a transposta da matriz original \mathbf{P} .

C. Implementação

A programação desse acelerador foi feita por meio da linguagem OpenCL, que permite aplicações de computação reconfigurável e pode ser aplicável em diferentes arquiteturas, desde CPU e GPU, até o FPGA. Desta forma, o trabalho foi validado aplicando o código OpenCL em diferentes CPUs de plataformas AMD e Intel de modo a simular um comportamento semelhante ao que se teria com o FPGA proposto, comparando o tempo de processamento entre a aplicação nas CPUs e o modelo tradicional.

Embora cada plataforma necessite de otimizações específicas, um único código OpenCL pode ser aplicado em todas elas, aumentando sua escalabilidade. Além disso, a OpenCL possui diversos recursos que aproveitam do paralelismo dos FPGAs para melhorar seu desempenho e tempo de processamento, como o desenrolamento de laços, a evitação de chamadas de funções e a maximização da largura de banda da memória global [5]. Apesar de ter o processamento no FPGA, o sistema ainda precisa de um computador para funcionar como controlador, já que o mecanismo da linguagem OpenCL segue a abordagem mestre-escravo, na qual um *software host* (computador) controla a execução do programa OpenCL (*kernel*) dentro de um dispositivo de computação (FPGA) que suporta o framework OpenCL.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Para calcular os efeitos da aplicação da técnica de pré-codificação SRC, o sistema UFMC foram simulados em ambiente Matlab,

com os parâmetros iniciais mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do Sistema UFMC

Parâmetros	Valores
Tamanho da FFT (N)	512
Tamanho da Sub-banda	200
Número de Sub-bandas	10
Método de Modulação	QAM
Atenuação de lóbulo lateral	40 dB
Janela do Filtro	Dolph-Chebyshev
Tamanho do Filtro	43
Canal	AWGN
E_b/N_0	10 dB
Bits por subportadora	4 (16-QAM)

A Figura 2 mostra as curvas da CCDF mediante variação do parâmetro β , ou seja, aumento do número N_p de subportadoras de *overhead*. Nota-se uma considerável diminuição da PAPR com o uso da pré-codificação em relação ao valor tradicional para o sistema UFMC. Nota-se que o menor valor da PAPR é obtido com β .

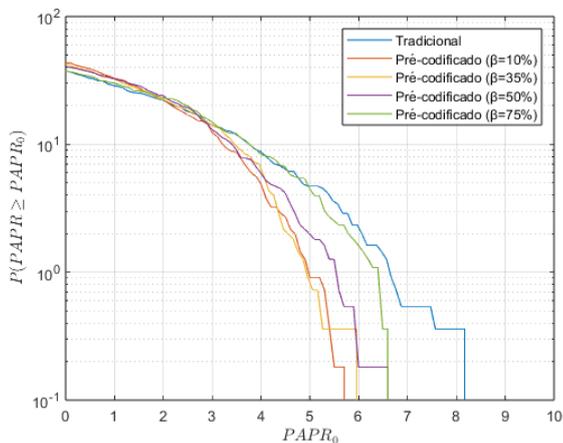


Figura 2. CCDF do sistema UFMC para diferentes valores de β

O efeito da pré-codificação SRC na Taxa de Erro de Bit, do inglês *Bit Error Rate* (BER) foi analisado na Figura 3. Um pequeno aumento é percebido, evidenciando uma leve degradação do desempenho do sistema em relação ao tradicional, no que diz respeito à BER. Como

referência, também são plotadas as curvas da BER para a modulação QAM e para a modulação OFDM tradicional e pré-codificada.

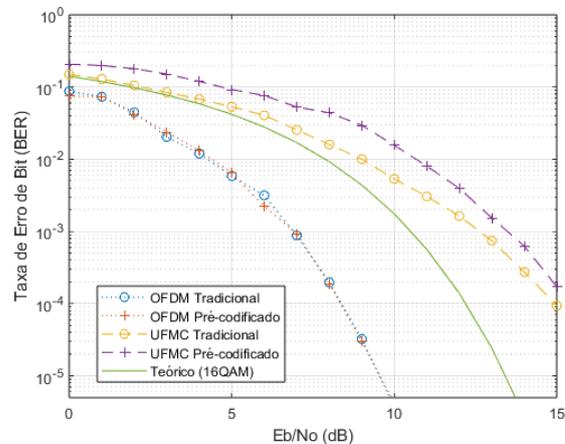


Figura 3. Comparação da BER dos sistemas UFMC tradicional e pré-codificado.

CONCLUSÕES:

Este trabalho apresentou uma técnica de pré-codificação baseada na função raiz quadrada do cosseno (SRC) aplicada ao sistema de modulação multiportadora UFMC, considerado um candidato a aplicações 5G. O objetivo principal foi reduzir a alta relação entre a potência de pico e a média (PAPR) desse sistema, que é um fator limitante para o desempenho de um sinal de telecomunicação.

Os resultados de simulação mostraram que a técnica proposta foi capaz de reduzir significativamente o PAPR do sistema, chegando a valores próximos aos de sistemas de portadora única. Em um nível de probabilidade de 10^{-5} , a redução permitiu um PAPR em torno de 6,5 dB. Quanto à taxa de erro de bit (BER), observou-se uma leve degradação na BER em comparação ao sistema convencional.

Portanto, conclui-se que a técnica de pré-codificação SRC mostrou-se eficaz na redução

do PAPR para sistemas UFMC utilizados em aplicações 5G, com impacto mínimo no desempenho de BER. Essa abordagem apresenta-se como uma solução promissora para mitigar os problemas de alto PAPR nessas tecnologias de modulação multiportadora, sem aumentar significativamente a complexidade computacional do sistema.

BIBLIOGRAFIA

- [1] RIBEIRO, Filipe T. S.. **Wimax: Estudo e Simulação da Camada Física do Padrão IEEE 802.16d**. Disponível em <http://bit.ly/3KcGSML>. Data de acesso: 27 de Março de 2023.
- [2] MOLLA, A. A., AHAMMED, M. F., KADIR, M. I.. **Evaluation of UFMC as a Potential Waveform Contender of OFDM for Next-Generation Wireless**. 2021 International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (ICECIT), Khulna, Bangladesh, 2021, pp. 1-4.
- [3] RANI, P. N.. RANI, C. S.. **UFMC: The 5G modulation technique**. 2016 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), Chennai, India, 2016, pp. 1-3.
- [4] RAJA, M. P.. SUJATHA, S.. PRAJOON P.. **Novel PAPR Reduction in UFMC system for 5G Wireless Networks Using Precoding Algorithm**. 2022 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India, 2022, pp. 84-88.
- [5] BORROMEO, Justine Cris. KONDEPU, Koteswararao. ANDRIOLLI, Nicola. VALCARENGHI, Luca. **FPGA-accelerated SmartNIC for supporting 5G virtualized Radio Access Network**. Computer Networks. Volume 210. 2022
- [6] S. B. Slimane, **Reducing the peak-to-average power ratio of OFDM signals through precoding**, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 2, pp. 686–695, 2007.
- [7] S. Gökceli, T. Levanen, T. Riihonen, M. Renfors, and M. Valkama, **Frequency-selective papr reduction for OFDM**, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 6, pp. 6167–6171, 2019.
- [8] V. S. Nagaraju, R. Anusha, and R. R. Vallabhuni, **A hybrid PAPR reduction technique in OFDM systems**, in 2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE), pp. 364–367, 2020.
- [9] A. M. K. Bebyrahma, T. Suryani, and Suwadi, **Analysis of combined PAPR reduction technique with predistorter for ofdm system in 5G**, in 2022 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), pp. 478–483, 2022.
- [10] M. Rowe, **Open RAN functional splits, explained**, Aug 2021.
- [11] A. Sahu, T. B. Rehman, and K. Pachori, **Hybrid PAPR reduction techniques for 5G system: A survey**, in 2022 IEEE International Conference on Current Development in Engineering and Technology (CCET), pp. 1– 7, 2022.
- [12] Y. Jian, Z. Zang, and W.-Y. Yan, **Papr distribution analysis of OFDM signals with pulse shaping**, in 2005 Asia-Pacific Conference on Com- munications, pp. 473–477, 2005.