

Aplicação das sequências de Slepian no projeto de filtros curtos

Iandra Galdino, Didier Le Ruyet, Marcello L. R. de Campos e Rostom Zakaria

Resumo—Modulação por amplitude em quadratura baseada em banco de filtros multiportadora (QAM-FBMC) é uma técnica de modulação multiportadora promissora para futuros sistemas de comunicação. Neste artigo, propomos a otimização de filtros protótipo curtos com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema QAM-FBMC. O filtro proposto é obtido otimizando a soma ponderada das sequências esferoidais prolatas discretas (DPSS), também conhecidas como sequência de Slepian, de forma a minimizar a interferência intrínseca do sistema. Ao mesmo tempo, os coeficientes escolhidos mantêm o confinamento espectral do filtro. O método proposto é flexível graças à adequação de seus parâmetros.

Palavras-Chave—Banco de filtros, QAM-FBMC, 5G, estrutura de rede, rede quincunce.

Abstract—Quadrature Amplitude Modulation based Filter-Bank Multi-Carrier (QAM-FBMC) is a promising multicarrier modulation technique for communication systems. In this paper, we propose a short prototype filter optimization to improve the QAM-FBMC system performance. The presented filter is obtained by optimizing the weighted sum of discrete prolate spheroidal sequences (DPSS) also known as Slepian sequence, to minimize the system intrinsic interference. At the same time, the chosen coefficients keep the spectral confinement of the filter. The proposed method is flexible thanks to the suitability of its parameters.

Keywords—Filter-bank, QAM-FBMC, 5G, Slepian sequences, DPSS.

I. INTRODUÇÃO

A quinta geração de redes móveis de comunicação (5G) promete uma grande expansão dos serviços ofertados, como o desenvolvimento de cidades inteligentes e a utilização de veículos autônomos por exemplo. Para que isso seja possível, o desenvolvimento e utilização de uma série de ferramentas e tecnologias como acesso dinâmico de espectro duplex e flexível (do Inglês, *dynamic spectrum access* - DSA), comunicações ultra confiáveis de baixa latência (do Inglês, *Ultra Reliable Low latency Communications* - URLLC), e também acesso múltiplo de *uplink* sem avanço de tempo para comunicações massivas do tipo máquina (do Inglês, *massive machine-type communications* - MTC) [1].

Em comunicações sem fio convencionais, a multiplexação por divisão ortogonal de frequência com prefixo cíclico (do Inglês, *cyclic-prefix orthogonal frequency division multiplexing* CP-OFDM) foi adotada como esquema multiportadora padrão. Apesar de apresentar benefícios devidamente

comprovados como transmissão independente e ortogonal e bom desempenho em sistemas com múltiplos-transmissores e múltiplos-receptores (do Inglês, *Multiple-input multiple-output* MIMO), estes benefícios estão presentes apenas em um cenário síncrono e estritamente ortogonal, o que não representa a totalidade das situações reais.

Visando lidar com as limitações observadas no CP-OFDM, para melhorar a robustez do sistema em relação ao canal e também para lidar com as restrições impostas por diferentes cenários de comunicações 5G, várias formas de onda têm sido estudadas. Dentre as formas de onda propostas mais conhecidas podemos citar o banco de filtros com múltiplas portadoras baseado em símbolos QAM, (do Inglês, *Quadrature amplitude modulation filter-bank multicarrier* QAM-FBMC). A ideia por trás do QAM-FBMC é modificar o já conhecido OQAM-FBMC (Offset - QAM-FBMC) para transmitir símbolos QAM. Uma vez que esses símbolos não são deslocados no tempo como acontece no sistema OQAM-FBMC, no receptor do sistema QAM-FBMC observamos a presença de interferência intrínseca ao sistema.

Uma das principais vantagens do QAM-FBMC para a rede 5G é a não dependência da sincronização, e também a não ortogonalidade do sistema, tornando assim a operacionalidade do sistema mais abrangente.

O sistema QAM-FBMC, que aplica um único filtro protótipo (do Inglês, *prototype filter* PF), foi proposto em [2]. Recentemente, visando minimizar a interferência do sistema QAM-FBMC muitas propostas de projeto de filtro protótipo foram estudadas usando a abordagem de um PF [3], [4]. Além disso, uma segunda abordagem do QAM-FBMC, que emprega dois filtros protótipos, também foi proposta em [5], e projetos de PF também foram sugeridos com base nessa nova abordagem em [6] e [7].

Embora encontremos algumas propostas de filtro protótipo para sistemas QAM-FBMC na literatura, a grande maioria trata de filtros que denominamos longos, ou seja, filtros cujo valor do coeficiente de sobreposição (do Inglês, *Overlapping factor*) é definido como $K = 4$. Neste caso, o comprimento do filtro protótipo é equivalente a quatro vezes o tamanho do símbolo QAM-FBMC.

Neste artigo apresentamos uma extensão dos trabalhos desenvolvidos em [8], considerando o caso particular de filtros curtos ($K = 1$), não contemplado nos trabalhos anteriores. Apresentamos um projeto de filtro protótipo curto para sistemas 5G que utiliza sistemas QAM-FBMC com um único PF, considerando a redução total da interferência e mantendo o confinamento espectral, dando continuidade assim aos trabalhos apresentados em [8]. Uma vez que o foco é a baixa latên-

cia, necessária para sistemas 5G, diferentemente dos trabalhos mencionados anteriormente, o fator de sobreposição aplicado é de $K = 1$, o que leva a um PF que denominamos como curto. Para isso, otimizamos a soma ponderada de sequências prolatas discretas (do Inglês, *discrete prolate spheroidal sequences* DPSS), também conhecidas como sequências de Slepian. Ao mesmo tempo a otimização proposta mantém o confinamento espectral do filtro para uma limitação de largura de banda previamente determinada.

As características mais significativas da abordagem proposta incluem: flexibilidade para controlar a atenuação fora da banda de passagem do filtro, que está diretamente relacionada à interferência; o pequeno comprimento do filtro protótipo obtido leva a uma diminuição do custo de implementação e otimização; extensibilidade a diferentes fatores de sobreposição e quantidades de subportadoras, o que significa que o comprimento do filtro também é adaptável.

Este artigo está estruturado da seguinte maneira: o sistema QAM-FBMC é apresentado na Seção II. O projeto de filtro protótipo é apresentado na Seção III. A Seção IV apresenta os filtros obtidos. Na Seção V os resultados da simulação mostram o desempenho que os filtros curtos otimizados podem proporcionar. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção VI.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sinal QAM-FBMC transmitido obtido pela multiplexação de símbolos QAM através de M subportadoras utilizando um filtro protótipo $g[m]$ pode ser descrito matematicamente no domínio de tempo discreto da seguinte forma

$$s[m] = \sum_{n'} \sum_{k'=0}^{M-1} d_{k',n'} g[m - nM] e^{j2\pi \frac{k'}{M} m}, \quad (1)$$

sendo $d_{k',n'}$ símbolos QAM complexos alocados na k' -ésima subportadora e enviados no n' -ésimo instante de tempo.

Também é possível descrever o sinal transmitido $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ considerando o domínio de tempo discreto no formato matricial

$$\mathbf{s}_{n'} = \mathbf{G}\mathbf{W}^H \mathbf{d}_{n'}, \quad (2)$$

sendo $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ a matriz de IFFT (do Inglês, *Inverse Fast Fourier Transform*), $\mathbf{G} = \text{diag}(\mathbf{g})$ e $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ representa a resposta ao impulso do filtro protótipo curto utilizado.

Considerando ainda o canal ruidoso AWGN (do Inglês, *Additive White Gaussian Noise*), o n -ésimo símbolo demodulado no receptor pode ser descrito como

$$\hat{\mathbf{d}}_n = \mathbf{W}\mathbf{G}^H \mathbf{s}_n + \mathbf{W}\mathbf{G}^H \mathbf{v}_n, \quad (3)$$

sendo \mathbf{v}_n a representação do ruído.

A. Interferência intrínseca do sistema

Na recepção, além da informação desejada observamos também a presença da interferência. A interferência que observamos em uma subportadora específica na recepção é proveniente dos símbolos vizinhos em consequência do filtro protótipo utilizado. Desta forma, considerando a transmissão de um símbolo $d_{k',n'} = 1$ na subportadora k' e no n' -ésimo

bloco, na recepção a informação demodulada na k -ésima subportadora do n -ésimo bloco $\hat{d}_{k,n}$ representa a interferência, e pode ser descrita matematicamente como

$$\begin{aligned} \hat{d}_{k,n} &= \mathbf{w}_k^H \mathbf{G}^H \mathbf{G} \mathbf{w}_{k'} d_{k',n'} + \mathbf{w}_k^H \mathbf{G}^H \mathbf{v}_{k,n} \\ &= \mathbf{g}^H (\text{diag}(\mathbf{w}_k))^H \text{diag}(\mathbf{w}_{k'}) \mathbf{g} d_{k',n'} + \mathbf{w}_k^H \mathbf{G}^H \mathbf{v}_{k,n} \\ &= \mathbf{g}^H \mathbf{P}^{\Delta k} \mathbf{g} d_{k',n'} + \mathbf{w}_k^H \mathbf{G}^H \mathbf{v}_{k,n} \end{aligned} \quad (4)$$

sendo $\mathbf{w}_{k'} = \left[1 \quad e^{j\frac{2\pi}{M}k'} \quad \dots \quad e^{j\frac{2\pi}{M}(M-1)k'} \right]^T$, $\Delta k = k' - k$, and $\mathbf{P}^{\Delta k} = (\text{diag}(\mathbf{w}_k))^H \text{diag}(\mathbf{w}_{k'})$.

Conhecendo a descrição da interferência, podemos descrever a energia dos coeficientes de interferência entre símbolos de um mesmo bloco ISI (do Inglês, *Inter-symbol interference*). É importante ressaltar que, por se tratar do sistema QAM-FBMC, e também devido à utilização de filtros curtos ($K = 1$), observamos a interferência apenas entre símbolos de um mesmo bloco. A energia total da interferência observada pode ser descrita como

$$\mathcal{E}_n = \sum_{k=0, k \neq k'}^{M-2} |\Gamma_k|^2, \quad (5)$$

sendo

$$\begin{aligned} |\Gamma_k|^2 &= \left(\mathbf{g}^H \mathbf{P}^{\Delta k} \mathbf{g} \right)^H \left(\mathbf{g}^H \mathbf{P}^{\Delta k} \mathbf{g} \right) \\ &= \mathbf{g}^H \left(\mathbf{P}^{\Delta k} \right)^H \mathbf{g} \mathbf{g}^H \mathbf{P}^{\Delta k} \mathbf{g}. \end{aligned} \quad (6)$$

Neste caso, $\Gamma_k = \mathbf{g}^H \mathbf{P}^{\Delta k} \mathbf{g}$ representa os coeficientes de interferência.

B. Out-of-band energy (OOBE)

Sabendo que as características do filtro protótipo empregado também são responsáveis pela interferência observada no receptor, sua escolha é de fundamental importância para o desempenho do sistema.

A OOBE é um parâmetro comumente utilizado para analisar o confinamento espectral de um filtro. Similarmente ao que foi apresentado em [9], podemos calcular a OOBE de um filtro definido no domínio do tempo discreto utilizando a forma matricial

$$\text{OOBE} = \mathbf{g}^H \mathbf{O} \mathbf{g}, \quad (7)$$

sendo \mathbf{g} o filtro protótipo $\mathbf{O} \in \mathbb{R}^{(M \times M)}$ é uma matriz simétrica e semi-definida positiva cujo (l, c) -ésimo componente pode ser descrito como

$$o_{lc} = \frac{\sin(\pi(l-c)(1-B_W))}{\pi(l-c)} e^{j\pi(l-c)} \quad (8)$$

sendo que $B_W = 2\Omega_p$ representa a largura da banda de passagem do filtro, definida como $3/M$ neste trabalho.

III. PROJETO DO FILTRO PROTÓTIPO OPF-DPSS

As características intrínsecas das sequências discretas esferoidais prolatas (DPSS) indicam uma potencial utilização em sistemas QAM-FBMC. A primeira sequência da série $\phi^{(0)}(L_g, B)$ é originalmente conhecida como a clássica janela prolate (do Inglês, *prolate window*). Segundo Slepian

[10], a janela prolata oferece a concentração tempo-frequência ótima para um dado comprimento do filtro (L_g) e largura de banda (B), e pode ser definida como o autovetor correspondente ao maior autovalor da matriz $\mathbf{Q}(L_g, B)$ geralmente chamado de janela Slepian, ou janela esferoidal prolata no domínio de tempo discreto. As demais sequências da série (autovetores) têm concentração de energia decrescente, que pode ser determinada pelos autovalores da matriz $\mathbf{Q}(L_g, B)$.

Conhecendo as características favoráveis de sequências esferoidais prolatas discretas, desenvolvemos uma técnica de projeto de filtro protótipo que utiliza como base as sequências DPSS, e em seguida otimizamos o filtro obtido. Para isso, consideramos o confinamento espectral, através do parâmetro banda-tempo do DPSS, e minimizamos a interferência intrínseca do sistema QAM-FBMC. Começamos projetando uma função que representa o filtro protótipo desejado usando as sequências DPSS.

Como os autovalores podem ser considerados como o índice de concentração de energia das sequências DPSS [11], nossa proposta consiste em selecionar os autovetores $\phi^{(p)}(L_g, B)$ da matriz $\mathbf{Q}(L_g, B)$ cujos autovalores $\lambda_p(L_g, B)$ são maiores que um determinado limite γ . Sendo $\mathbf{Q}(L_g, B)$ definida por [10]

$$\mathbf{Q}(L_g, B)_{l,c} = \frac{\sin(\pi(l-c)B)}{\pi(l-c)} \quad l, c = 0, 1, 2, \dots, L_g - 1 \quad (9)$$

Os autovalores são ordenados de forma que os primeiros têm maior concentração de energia, e.g. estão muito próximos de 1, e os autovalores restantes estão próximos de 0 [11]. Ao fazer este processo, selecionamos as sequências N_e com maior concentração de energia para uma determinada limitação de banda B e comprimento de filtro L_g .

Desta forma, descrevemos o filtro protótipo proposto como uma soma ponderada de N_e sequências DPSS

$$\mathbf{g} = \sum_{p=0}^{N_e-1} w_p \phi^{(p)}(L_g, B), \quad (10)$$

em que $\mathbf{g} = [g[0], g[1], \dots, g[L_g - 1]]$ é a representação discreta de $g(t)$, sendo $g[m] = g(m \frac{T}{M})$, e w_p os coeficientes de ponderação da soma.

Uma vez que apresentamos a definição do filtro protótipo proposto em (10), e levando em consideração a interferência do sistema descrita em (5), propomos ainda um problema de otimização para encontrar o melhor filtro protótipo para o sistema QAM-FBMC de forma a minimizar a interferência observada. Nesse sentido, queremos encontrar os pesos ótimos w_p do filtro protótipo que minimizem a energia dos coeficientes de interferência intrínseca $\Gamma_{k,n}$, porém mantendo a concentração de OOBE do filtro. Assim, formulamos nosso problema de otimização da seguinte maneira

$$\min_{\mathbf{w}} \sum_{k' \neq k} \left| \mathbf{g}^H \mathbf{P}^{\Delta k} \mathbf{g} \right|^2 \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{g}^H \mathbf{g} = 1 \quad (11)$$

Para resolver o problema de otimização proposto, usamos neste trabalho o método dos pontos interiores (do Inglês, *interior point* PI) [12]. O processo de otimização foi realizado diversas vezes, cada uma delas considerando diferentes

vetores de pesos iniciais aleatórios \mathbf{w} , e selecionamos o melhor resultado obtido, *i.e.* aquele que apresenta a menor quantidade de interferência. Nossos filtros protótipos obtidos são indicados como filtros otimizados baseados em DPSS (do Inglês, *Optimized prototype filter*), OPF-DPSS.

Diferentemente da proposta apresentada em [8], neste trabalho são otimizados filtros curtos ($K = 1$). Sabe-se que filtros longos (e.g. $K = 4$) são mais concentrados no domínio da frequência do que os filtros curtos. Este fato deve-se à maior quantidade de coeficientes o que traz maior flexibilidade para o processo de otimização. Portanto, para que fosse possível a otimização proposta neste trabalho, o limiar utilizado para seleção dos autovalores foi definido como $\gamma = 0.9$ ao invés de 0.99 definido em [8]. Caso mantivéssemos o limiar $\gamma = 0.99$ apenas a primeira sequência seria selecionada, ou seja, a janela prolata.

IV. RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO

Nesta seção nós apresentamos os resultados obtidos através da otimização proposta para configurações específicas do sistema QAM-FBMC. Nós definimos o fator de sobreposição como $K = 1$ (filtros curtos) e o número de subportadoras como $M = 128$, o que resulta em um filtro de comprimento $L_g = 128$.

Para manter um bom compromisso entre a quantidade de sequências selecionadas para compor o filtro protótipo N_e e o OOBE, utilizamos em nossos projetos o limiar $\gamma = 0.9$ para selecionar os autovalores e consequentemente os autovetores correspondentes. Ainda, para que tenhamos uma comparação com os filtros de última geração conhecidos na literatura, determinamos a largura de banda dos filtros otimizados como $B = 7/M$, $B = 3/M$, e $B = 1.7/M$. Desta forma podemos comparar o efeito da alteração do fator de sobreposição de $K = 4$ [8] para $K = 1$. Além disso, a comparação com filtros curtos encontrados em [13] permite a análise do desempenho dos filtros propostos em relação à variação da OOBE.

Na Tabela I são apresentadas algumas das características dos filtros obtidos considerando coeficientes reais e complexos.

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DOS FILTROS OTIMIZADOS.

Filtro	ISI	Coefficientes	OOBE	N_e
OPF-DPSS 1.7/M	-6.32 dB	Real	0.0155	1
OPF-DPSS 1.7/M	-6.32 dB	Complexo	0.0155	1
OPF-DPSS 3/M	-4.59 dB	Real	0.0314	2
OPF-DPSS 3/M	-8.33 dB	Complexo	0.0190	2
OPF-DPSS 7/M	-8.13 dB	Real	0.2008	6
OPF-DPSS 7/M	-14.56dB	Complexo	0.0229	6

Conforme esperado, aumentando a banda de passagem do filtro otimizado a interferência observada no sistema diminui consideravelmente. Ainda, quando consideramos coeficientes complexos, para uma mesma largura de banda, a interferência pode ser reduzida ainda mais. Observando o filtro OPF-DPSS 7/M nota-se que é possível atingir uma ISI de -14.56 , algo próximo ao esperado para um filtro longo, ($K = 4$) [3], [7], [8].

Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas as respostas em frequência dos filtros otimizados com coeficientes reais e complexos, respectivamente.

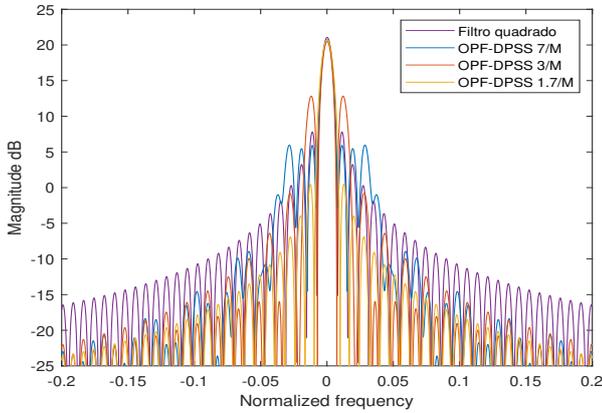


Fig. 1. Filtros otimizados com coeficientes reais, 7/M, 3/M e 1.7/M.

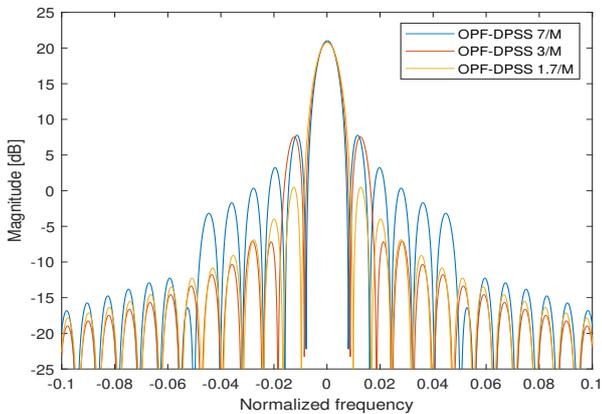


Fig. 2. Filtros otimizados com coeficientes complexos, 7/M, 3/M e 1.7/M.

Embora o lóbulo principal permaneça o mesmo em todos os casos, aumentado a largura de banda do filtro otimizado os lóbulos secundários dos filtros aumentam proporcionalmente. Tal fato é esperado, uma vez que estamos alterando as restrições da otimização proposta em termos de concentração espectral.

V. PERFORMANCE DO SISTEMA

Nesta seção avaliamos e comparamos o desempenho do sistema utilizando os filtros otimizados através da curva de erro de bit (do Inglês, *Bit Error rate* BER). O desempenho do sistema é analisado considerando a modulação 4QAM, o canal de pedestres (do Inglês, *1 Extended Pedestrian A* EPA), definido pela 3GPP [14], e os filtros curtos otimizados. Comparamos ainda os resultados obtidos com o desempenho do sistema quando utilizando filtros curtos encontrados na literatura, como por exemplo o filtro QMF e o OPF- β [13].

Na Figura 3 apresentamos o desempenho dos filtros otimizados com largura de banda 1.7/M com coeficientes reais e complexos. Considerando um limiar de 0.9 para os autovalores selecionados, temos $N_e = 1$, um autovetor utilizado na composição do filtro otimizado. Como podemos observar, a ISI obtida é a mesma para os dois filtros, o que ocasiona um desempenho bastante semelhante dos filtros. Ainda, para

aprimorar o desempenho do sistema, é utilizada a técnica de cancelamento de interferência iterativo (do Inglês, *iterative interference cancellation* IIC). Mesmo após uma iteração de IIC as performances continuam idênticas.

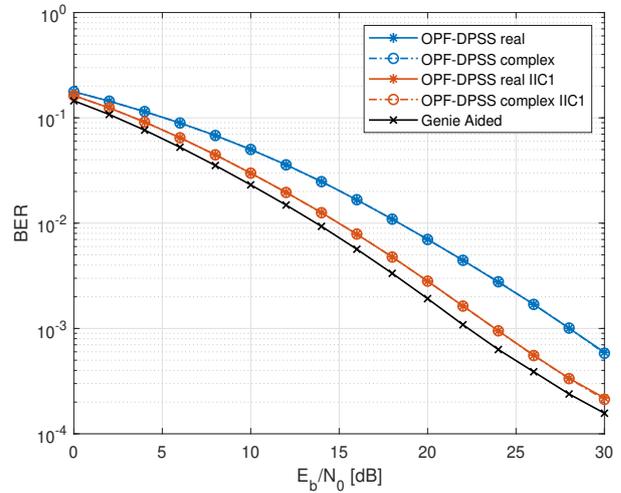


Fig. 3. Performance do sistema QAM-FBMC utilizando os filtros real e complexo com banda de passagem 1.7/M.

Quando aumentamos a banda do filtro otimizado para 3/M, temos $N_e = 2$, portanto dois autovetores compõem o filtro protótipo. Na Figura 4 apresentamos o desempenho dos filtros real e complexo obtidos com largura de banda 3/M. Neste caso a utilização de coeficientes complexos gera uma diminuição significativa da ISI, que se reflete no desempenho do sistema. Com apenas uma iteração de IIC o filtro complexo tem desempenho similar àquele da *Genie Aided*, curva obtida considerando o conhecimento e remoção de toda a interferência do sistema. Na Figura 5 apresentamos ainda

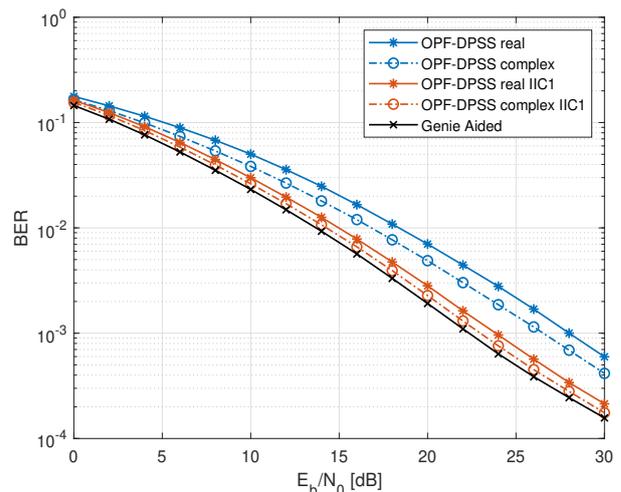


Fig. 4. Performance do sistema QAM-FBMC utilizando os filtros real e complexo com banda de passagem 3/M.

o desempenho do filtro otimizado com banda de 7/M. Mais uma vez, relaxando a largura de banda do filtro otimizado aumentamos a quantidade de autovetores selecionados $N_e = 6$ e consequentemente atingimos menor ISI, -14.56dB através

da otimização proposta, obtendo assim a melhor performance entre os filtros otimizados. Como podemos observar, o filtro

que aquela obtida com a utilização de alguns filtros longos ($K = 4$), e.g. Type I [7], cuja ISI é de -10.63dB .

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho propomos o projeto de filtros curtos para sistemas QAM-FBMC utilizando as seqüências de Slepian. Nós propomos um filtro protótipo composto pela soma ponderada das seqüências de Slepian, com maior concentração de energia, de forma a manter o confinamento espectral do filtro. Em seguida propomos um problema de otimização que busca os coeficientes da soma ponderada de forma a minimizar a interferência intrínseca do sistema. Os resultados da otimização e também da simulação mostram que a interferência é indubitavelmente reduzida, e consequentemente o desempenho do sistema melhora. Além disso, observando a resposta em frequência dos filtros otimizados, torna-se evidente que aumentando a banda do filtro utilizado diminuimos a interferência do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Gupta and R. K. Jha, "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies," *IEEE access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [2] R. Zakaria and D. Le Ruyet, "Intrinsic interference reduction in a filter bank-based multicarrier using QAM modulation," *Physical Communication*, vol. 11, pp. 15–24, 2014.
- [3] H. Kim, H. Han, and H. Park, "Waveform design for QAM-FBMC systems," in *International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [4] I. Galdino, R. Zakaria, D. Le Ruyet, and M. L. R. de Campos, "Short-Filter design for intrinsic interference reduction in QAM-FBMC modulation," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, pp. 1487–1491, 2020.
- [5] H. Nam, M. Choi, S. Han, C. Kim, S. Choi, and D. Hong, "A new filter-bank multicarrier system with two prototype filters for QAM symbols transmission and reception," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 9, pp. 5998–6009, 2016.
- [6] Y. Qi and M. Al-Imari, "An enabling waveform for 5G—QAM-FBMC: Initial analysis," in *Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [7] Y. H. Yun, C. Kim, K. Kim, Z. Ho, B. Lee, and J.-Y. Seol, "A new waveform enabling enhanced QAM-FBMC systems," in *International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. IEEE, 2015, pp. 116–120.
- [8] I. Galdino, R. Zakaria, D. Le Ruyet, and M. L. De Campos, "Prototype Filter for QAM-FBMC Systems Based on Discrete Prolate Spheroidal Sequences (DPSS)," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 31 244–31 254, 2022.
- [9] A. Antoniou and W.-S. Lu, *Practical optimization: algorithms and engineering applications*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] D. Slepian, "Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis, and uncertainty—V: The discrete case," *Bell System Technical Journal*, vol. 57, no. 5, pp. 1371–1430, 1978.
- [11] D. Slepian and H. O. Pollak, "Prolate spheroidal wave functions, Fourier analysis and uncertainty—I," *Wiley Online Library - Bell System Technical Journal*, vol. 40, no. 1, pp. 43–63, 1961.
- [12] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex optimization*. Cambridge University press, Cambridge, 2004.
- [13] I. G. Andrade, R. Zakaria, D. Le Ruyet, and M. L. de Campos, "Short-Filter design for intrinsic interference reduction in QAM-FBMC modulation," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 7, pp. 1487–1491, 2020.
- [14] "3GPP TS 36.104 - Base Station (BS) radio transmission and reception." [Online]. Available: <https://portal.3gpp.org>

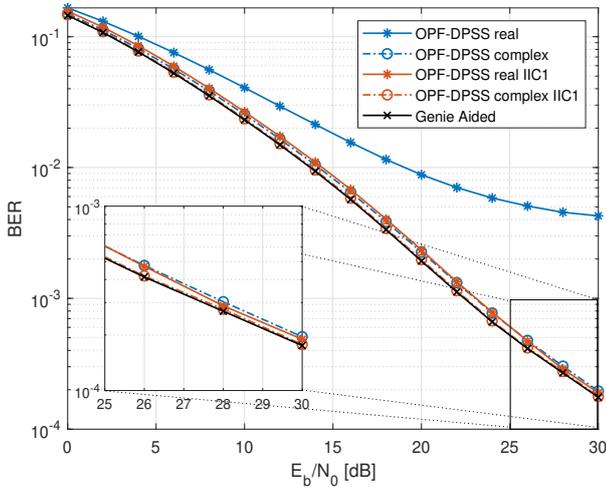


Fig. 5. Performance do sistema QAM-FBMC utilizando os filtros real e complexo com banda de passagem $7/M$.

complexo otimizado OPF-DPSS $7/M$, atinge desempenho próximo ao da curva de *genie aided*, e similar ao do filtro real com uma iteração de IIC. Ainda, após uma iteração de IIC, o filtro complexo atinge exatamente o mesmo desempenho da curva de *genie aided*, o que comprova sua eficácia.

Também foram comparados na Figura 6 o desempenho do filtro otimizado OPF-DPSS $7/M$ com o desempenho dos filtros encontrados na literatura: QMF (do Inglês, *Quadrature mirror filter*), cuja ISI é de -3.01dB e OOBÉ é de 0.0051; e também com o filtro OPF- β proposto em [13] cuja ISI é de -3.64dB e a OOBÉ 0.0051.

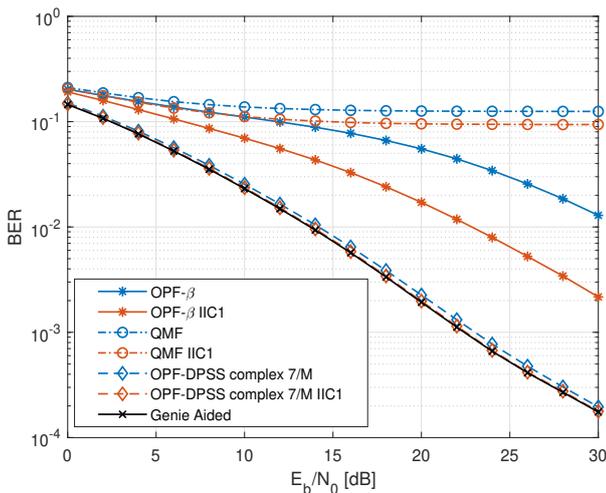


Fig. 6. Comparação da performance do sistema QAM-FBMC utilizando os filtros OPF- β , QMF, e o filtro complexo proposto OPF-DPSS $7/M$

Conforme o esperado, relaxando a restrição da concentração em frequência obtemos melhor desempenho, em consequência da diminuição da ISI. Neste caso, mesmo considerando a utilização de filtros curtos atingimos a ISI de -14.5dB , menor