

SISTEMA NOFDM COM DETECÇÃO DE FORÇAGEM A ZERO EM UMA CANAL AWGN

Juliana Santos de Moura^{1*} (IC), Antônio Macilio Pereira de Lucena² (PQ), Daniel Costa Araújo³ (PQ), Douglas Bezerra Linhares⁴ (IC).

1. Universidade de Fortaleza (UNIFOR) – PIBIC/CNPQ

2. Universidade de Fortaleza (UNIFOR) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

3. Universidade Federal do Ceará (UFC) – Doutorado em Engenharia de Teleinformática

4. Universidade de Fortaleza (UNIFOR) – PIBIC/CNPQ

julianamoura@edu.unifor.br

Palavras-chave: NOFDM. ZF. Detector de Máxima Verossimilhança. Portadoras Não-Ortogonais.

Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta de receptor baseada no critério de forçagem à zero para detecção de N sinais m-QAM não-ortogonais em canal AWGN. Apresenta-se o modelo discreto de sinal e a partir deste projeta-se o receptor ZF. Através de simulação computacional avalia-se o desempenho do receptor proposto em termos de taxa de erro de bits. Também se compara os resultados obtidos com o desempenho do receptor ótimo. Por fim, apresentamos nossas conclusões e uma perspectiva para pesquisas futuras

Introdução

A Técnica OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é uma modulação multiportadora que tem sido empregada em sistemas de comunicações móveis para atingir altas taxas de transmissões [1-2]. Neste sistema, diferentemente da técnica tradicional, em que os símbolos são enviados através de uma única portadora, a transmissão de dados é efetuada através de múltiplas portadoras ortogonais com certo grau de superposição espectral. No entanto, o OFDM não é a melhor escolha para canais dispersivos no tempo e na frequência [3] já que nestes cenários manter a ortogonalidade entre as portadoras, torna-se difícil, causando a interferência entre as mesmas e queda de desempenho do sistema.

Canais duplamente dispersivos geram dois tipos de degradação ao sistema: a interferência entre símbolos e interferência entre portadoras. Embora, a inserção do prefixo cíclico no sinal transmitido OFDM elimine a interferência entre símbolos, isto não proporciona proteção contra a interferência entre portadoras. Por isso, o estudo de sistemas empregando multiportadoras não-ortogonais torna-se de grande importância.

O sistema NOFDM (do inglês, *Non-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), assim como o OFDM, utiliza multiportadoras, mas a ortogonalidade entre as portadoras do primeiro não é mantida propositalmente, a fim de aumentar a robustez do sistema.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma estrutura de receptor para um sistema de comunicação com N portadoras não-ortogonais, com superposição espectral através de um canal AWGN.

Nós propomos um receptor que utiliza filtragem linear com critério de forçamento a zero (ZF, do inglês, Zero Forcing) para cancelar a interferência entre portadoras.

Nas próximas seções serão apresentados o modelo do sistema, bem como o projeto do receptor de máxima verossimilhança e o desenvolvimento de seu modelo discreto. Deriva-se também o receptor de forçamento a zero e, por fim, expõem-se os resultados e conclusões respectivamente.

Metodologia

2.1- Modelo do sinal

No transmissor, as $M = m^N$ possíveis formas de ondas da modulação NOFDM são formadas por combinações de N sinais m -QAM. A i -ésima forma de onda corresponde ao sinal equivalente em banda-básica que é expresso por:

$$s_i(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x_{i,n}(k) e^{j2\pi\Delta f t} p(t - kT) \quad , \quad (1)$$

em que, $i = 1, 2, \dots, M, (k-1)T \leq t \leq kT$ é o intervalo de tempo correspondente ao k -ésimo símbolo transmitido e $x_{i,n}(k)$ é o k -ésimo subsímbolo associado à n -ésima portadora m -QAM que é estatisticamente independente para qualquer $n \neq k$. O pulso formatador $p(u)$ é retangular com amplitude unitária e $u \in [0, T]$. A variável Δf define de espaçamento entre as portadoras. Na condição $\Delta f < 1/T$, há uma superposição espectral entre os lóbulos principais das subportadoras que compõe $s_i(t)$ da Eq. (1). O canal é considerado AWGN e o sinal que chega no receptor é dado por:

$$r(t) = s_i(t) + q(t) \quad , \quad (2)$$

em que, $q(t)$ representa o ruído branco equivalente em banda-básica com distribuição gaussiana, densidade espectral de potência $2N_0$ e média nula.

2.2- Receptor de Máxima Verossimilhança

O detector ML é solução ótima para canais AWGN. Este receptor, fundamentalmente, visa maximizar a função de densidade de probabilidade de $r(t)$ condicionada ao conhecimento do sinal transmitido $s_i(t)$, denotada por $f[r(t)/s_i(t)]$.

O critério de máxima verossimilhança é obtido através da maximização das M métricas de correlação $C_k[r(t), s_i(t)], i = 1, 2, 3, \dots, M$, representada pela Eq. (3) [4]:

$$C_k[r(t), s_i(t)] = 2\text{Re} \left\{ \int_{(k-1)T}^{kT} r(t) s_i^*(t) dt \right\} - \int_{(k-1)T}^{kT} |s_i(t)|^2 dt \quad , \quad (3)$$

em que, $E_i(k) = \int_{(k-1)T}^{kT} |s_i(t)|^2 dt$ é a energia do símbolo. Substituindo a Eq.(1) em (3), a métrica de correlação entre $r(t)$ e $s_i(t)$ é dada por:

$$C_k[r(t), s_i(t)] = 2Re \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} x_{i,n}^*(k) \int_{(k-1)T}^{kT} r(t) e^{-j2\pi\Delta f t} dt \right\} - E_i(k) . \quad (4)$$

O receptor ML calcula a métrica de correlação expressa pela Eq. (4) para todas as N possíveis formas de ondas transmitidas e decide pelo conjunto de subsímbolos $[x_{0,i}(k), x_{1,i}(k), \dots, x_{N-1,i}(k)]$ que maximiza a correlação $C_k[r(t), s_i(t)]$ definida em (4). A Fig. 1 mostra a arquitetura do receptor ML:

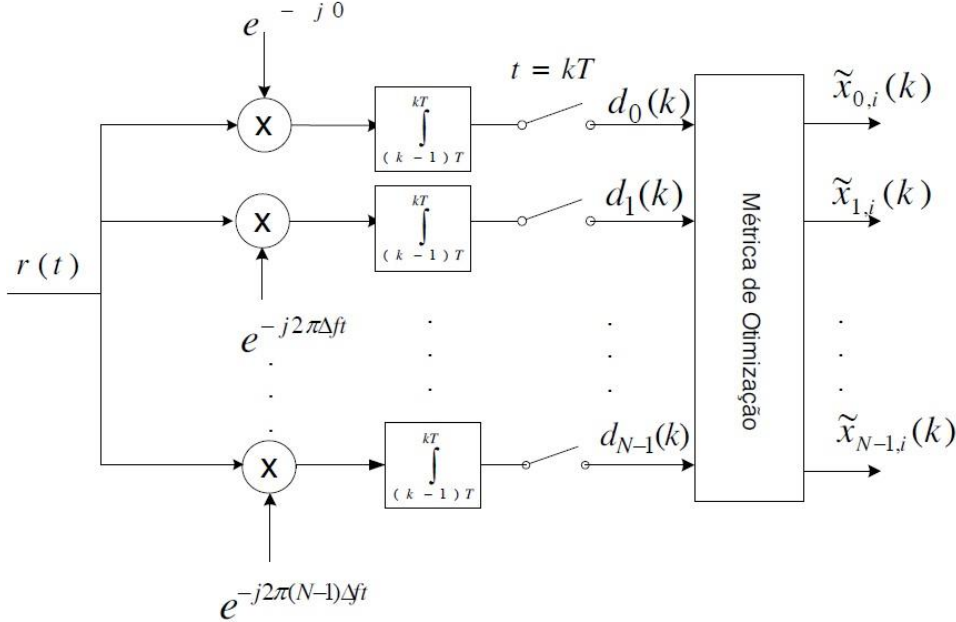


Fig. 1 – Arquitetura do receptor de máxima verossimilhança.

2.3- Detector de Forçagem à Zero (ZF)

O diagrama da Fig.1 apresenta as amostras na saída do integrador e do circuito amostrador, que representam estatística suficiente para detecção dos símbolos [5]. Por outro lado, o detector ML possui uma complexidade que cresce exponencialmente, já que o número de possíveis formas de onda é dado por $M = m^n$. Tomando como exemplo um sistema 4-QAM com 16 portadoras, o detector deverá calcular 4^{16} métricas de correlação, um custo computacional elevado. Objetivando reduzir o custo computacional, esse trabalho propõe o uso do receptor ZF.

A arquitetura ML descrito na Fig. 1 permite a derivação de um modelo discreto no qual o sinal amostrado na saída do integrador na l -ésima frequência pode ser expresso por:

$$d_l(k) = T \left\{ x_l(k) + \sum_{\substack{n=0 \\ n \neq l}}^{N-1} x_n(k) h_{l,n}(\Delta f T, k) \right\} + z_l(k) \quad , \quad (5)$$

em que, $h_{n,m}(\Delta f T, k) = \text{sinc}[(n-m)\Delta f T] e^{j2\pi(n-m)\Delta f t(k-1/2)}$. As variáveis $d_l(k)$, $x_l(k)$ e $z_l(k) = \int_{(k-1)T}^{kT} q(t) e^{j2\pi l \Delta f t} dt$ representam respectivamente as amostras na saída do integrador, os subsímbolos complexos transmitidos e o ruído presente na l -ésima portadora no instante k . Note que na Eq. (5), o subsímbolo transmitido pela l -ésima portadora sofre interferência das $(N-1)$ portadoras e o grau de interferência aumenta a medida que $\Delta f T$ se aproxima de zero. Além disso, nesta equação tem-se apenas a representação discreta da informação na l -ésima frequência. Por outro lado, é desejável que o detector estime conjuntamente todos os N símbolos m -QAM transmitidos. Para isso, utiliza-se a abordagem de

transformação linear para expressar todas as equações, representando as amostras na saída do banco de filtros no instante de tempo kT conforme mostrado a seguir:

$$\mathbf{d}(k) = \mathbf{T}\mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{z}(k) \quad , \quad (6)$$

em que, $\mathbf{x}(k)$ é o vetor coluna dos N m -QAM símbolos transmitidos no instante discreto k , $\mathbf{H}(k)$ é a matriz de transformação definida por:

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 1 & \dots & h_{1,N-1}(\Delta fT, k) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N-1,1}(\Delta fT, k) & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

e o vetor $\mathbf{z}(k)$ representa a parcela de ruído na saída do banco de filtros integradores, sendo sua média nula e a matriz de correlação entre as amostras do sinal de ruído em cada uma das portadoras no instante kT dado por $E[\mathbf{z}(k)\mathbf{z}(k)^H] = TN_0\mathbf{H}(k)$. Se o parâmetro $\Delta fT = 1$, então $\mathbf{H}(k)$ torna-se diagonal, o ruído passa a ser branco e o problema se reduz a detecção de sinais ortogonais. Mas se $\Delta fT < 1$, observa-se que o sistema passa a ser variante no tempo.

Um equalizador de forçagem a zero efetua uma transformação linear sobre os sinais recebidos $\{d_n(k), 0 \leq n \leq N - 1\}$ de modo a estimar os símbolos transmitidos $\{x_n(k), 0 \leq n \leq N - 1\}$. A matriz $\mathbf{W}(k)$ é selecionada de forma a cancelar a interferência entre as portadoras. Portanto $\mathbf{W}(k) = \mathbf{H}(k)^{-1}$ e o sinal transformado é [3],[4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k) &= \mathbf{W}(k)\mathbf{d}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{H}(k)^{-1}\mathbf{d}(k) \\ &= \mathbf{x}(k) + \mathbf{H}(k)^{-1}\mathbf{z}(k) \end{aligned} \quad (7)$$

Note que, em $\mathbf{y}(k)$, não há interferência entre as portadoras, no entanto, dependendo de $\mathbf{H}(k)$ pode haver amplificação da potência do ruído.

Resultados e Discussão

Foram feitas simulações utilizando o detector ZF, apresentado na seção anterior, considerando duas portadoras 4-QAM. Como comparativo utilizamos as curvas de taxa de erro de bits (BER, *Bit Error Rate*) do receptor ML dado em [5].

A Fig. 2 apresenta um comparativo entre a BER do detector ZF com a do ML para o caso de duas portadoras e grau de superposição $\Delta fT = 0,6$.

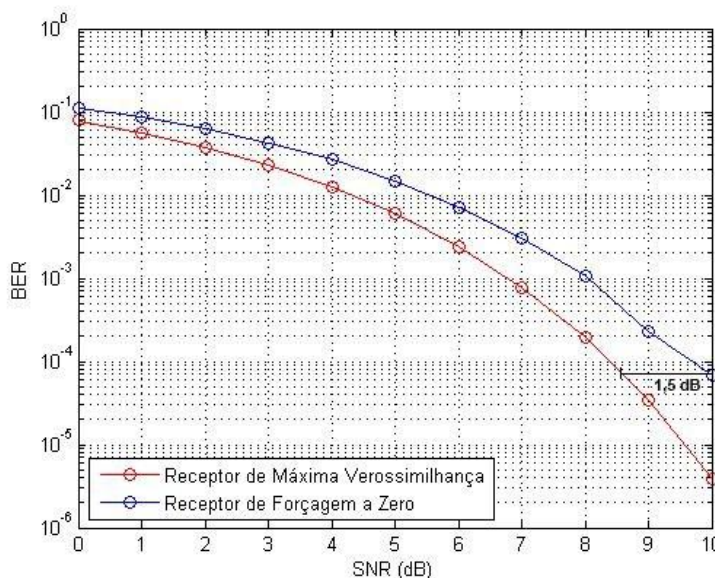


Fig. 2 – Taxa de erro de bits para o detector ML e ZF para $N = 2$ e $\Delta fT = 0,6$.

Observa-se que no detector de forçagem a zero há uma perda de 1,5 dB em relação ao de máxima verossimilhança. Simulou-se também para 5 portadoras e $\Delta fT = 0,73$, e os resultados estão mostrados na Fig. 3.

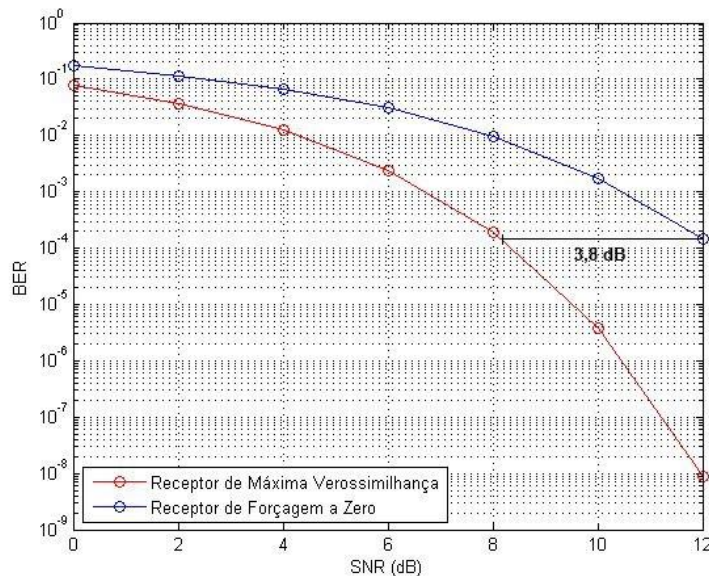


Fig. 3 – Taxa de erro de bits para o detector ML e ZF para $N = 5$ e $\Delta fT = 0,73$.

Comparando as Fig. 2 e Fig. 3, conclui-se que o aumento do número de portadoras resultou em uma degradação no desempenho do sistema. Nota-se que mesmo com grau de superposição menor, $\Delta fT = 0,73$, a perda com relação ao ML foi de 3,8 dB para 5 portadoras.

Conclusão

Neste trabalho, foi proposta uma arquitetura de receptor ZF, para um sistema de comunicação com N portadoras não-ortogonais. Constatou-se que o receptor ZF apresenta uma perda de desempenho em termos da taxa de erro de bits (BER), quando comparado ao receptor ML. Especificamente, a estrutura do receptor ZF é muito mais simples do que o seu correspondente ML. É interessante ressaltar que o receptor ZF pode ser implementado utilizando-se apenas operações lineares.

Como perspectiva futura pretende-se investigar novas técnicas para mitigação da interferência entre as portadoras.

Referências

- [1] Strohmer, T.; Beaver, S.;, "Optimal OFDM design for time-frequency dispersive channels," Communications, IEEE Transactions on , vol.51,no.7, pp. 1111- 1122, July 2003 doi: 10.1109/TCOMM.2003.814200.
- [2] Bingham J.A.C : "Multicarrier modulation data transmission: an idea whose time has come", IEEE Trans. Commun. Mag, 1990, vol. 28, no. 5, pp 5-14.

[3] ARAUJO, Daniel Costa, A. M. P. Lucena. “Sistema de comunicação com Múltiplas Portadoras m-QAM Não-Ortogonais”, Brasília, DF: XXX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Setembro/2012.

[4] J. G. Proakis, “Digital Communications”, 4rd ed. New York, Mc-GrawHill, 2007.

[5] ARAUJO, Daniel Costa. “Sistemas de Comunicações com Sinais m-QAM Não-Ortogonais”. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Teleinformática) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo suporte financeiro dado a esta pesquisa. Agradecemos também a Thiago França Brito, nosso colega de curso, pelo conhecimento que nos foi repassado.