



Efeito da equalização na recepção de sinais OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Equalization effect on THE OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) signals reception

Thiago Tertó Santos¹

Thais Oliveira Gomes¹

Leni Joaquim de Matos¹

Tadeu Nagashima Ferreira¹

Resumo: Os sistemas que se utilizam da técnica de modulação OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) operam com subportadoras ortogonais, que se sobrepõem na frequência sem interferir umas nas outras. Trazem consigo, dentre outras vantagens, a robustez ao desvanecimento seletivo e aos efeitos dos multipercursos, sendo usada nos sistemas móveis atuais de quarta geração e promissor para os da futura geração. Neste contexto, o *software* MATLAB[®] é empregado para gerar o sinal OFDM, simular sua transmissão e recepção, e estudar a eficiência de um equalizador na recuperação do sinal, de forma a diminuir o efeito da dispersão temporal, causada pelos multipercursos que chegam ao sistema receptor, amenizando a interferência entre subportadoras. O que se obtém, empregando o mais simples dos equalizadores, o *Zero Forcing*, é o comate aos efeitos negativos dos multipercursos e quem limita a qualidade de recepção do sinal é o ruído, inerente a todo canal de comunicação.

Palavras-chave: OFDM; múltiplas portadoras; equalizador; *Zero Forcing*.

¹Universidade Federal Fluminense

Abstract: The systems that use the OFDM modulation technique operate with orthogonal carriers, which overlap on frequency, without interfering each other. Among others advantages, they are responsible by the robustness to the selective fading and the effects of multipath, and it is used in the current fourth generation mobile systems, but also it is promising for the future generation. In this context, the MATLAB[®] software is applied for generating the OFDM signal, simulating its transmission and reception, and studying the efficiency of a "zero-forcing" equalizer in the signal recovering such that it decreases the time dispersion effect caused by multipath that arrive to the reception system, softening the inter-carrier interference. Although the equalizer used was the simplest one, it combats the negative effects of multipath and the noise, which is inherent in the communication channel, is that limits the reception signal quality.

Keywords: OFDM; multicarrier; equalizer; Zero Forcing.

1. Introdução

A tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) é largamente utilizada em sistemas de *broadcast* de áudio digital e vídeo da Europa, DAB e DVB, respectivamente, pelo WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) utilizando redes de acesso [1], e presente nos sistemas 4G (4ª Geração) atuais de sistemas celulares para uso com transmissão em banda larga LTE (*Long Term Evolution*)/ LTE-Advanced. Tem como principais vantagens: a robustez ao desvanecimento seletivo, a alta eficiência espectral, a baixa distorção por multipercursos e a simplificação nos equalizadores para a recuperação do sinal [2]. Para a quinta geração (5G) de celulares, diversas formas de onda são candidatas e estão sendo analisadas e testadas [3], sendo OFDM uma das possibilidades, entretanto, ainda não houve sua definição, o que só deverá ser fechado no padrão IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications*), a ser proposto pela ITU (*International Telecommunications Union*). É, portanto, uma tecnologia que deverá estar presente na geração 5G de sistemas celulares e de pesquisa contínua.

Em um sistema com uma única portadora, no caso de um desvanecimento na frequência desta portadora, isto significaria a perda de todos os símbolos transmitidos naquele período de tempo. Em sistemas com múltiplas portadoras, caso alguma delas seja perdida, apenas um símbolo da constelação da modulação digital não estará chegando ao receptor, podendo o sinal ser recuperado com códigos corretores de erros [4]. O fato das portadoras serem ortogonais permite que elas se sobreponham, diminuindo o uso do espectro [2].

Este trabalho possui como finalidade o desenvolvimento de um sinal OFDM, em *software* MATLAB®, para que seja feita a simulação dos efeitos causados por um canal, com características similares as de um meio urbano, no qual o sinal recebido é composto por multipercursos [5], a fim de se analisar parâmetros relevantes para a utilização desse tipo de sistema. Além disso, é testada a eficiência de um equalizador simples, o ZF (*Zero-Forcing*) [6] para a recuperação de um sinal após ter sofrido não apenas a influência do ruído, mas resultante de multipercursos que chegam de diferentes orientações, com diferentes amplitudes e fases, em cada instante de tempo. A partir da criação do programa, foram realizadas simulações que testaram variações de relação sinal-ruído e número de multipercursos, comparando o sistema equalizado com o não equalizado e atestando a eficiência do equalizador.

No decorrer do artigo, será descrita a modulação OFDM e a equalização, com ênfase na *Zero-Forcing*. Em seguida, estará o processamento empregado para estudar o efeito do equalizador na recuperação do sinal, após o mesmo ter passado por um canal ruidoso e com a presença de multipercursos do sinal transmitido. Após todo o processamento, serão descritos e comparados os resultados obtidos com e sem o emprego do equalizador, concluindo sobre os mesmos, além de sugerir as possibilidades de melhorias.

Na prática, foi desenvolvido um algoritmo no *software* MatLab® capaz de simular desde a geração até a recepção de um sinal OFDM em um canal caracterizado por multipercursos e pela adição de ruído branco, com e sem o emprego do equalizador *zero forcing*.

2. Geração do sinal OFDM e Equalização

O diagrama de blocos do sistema de geração e recepção de um sinal OFDM [7] é visto na Figura 1, sendo descrito no item 2.1.

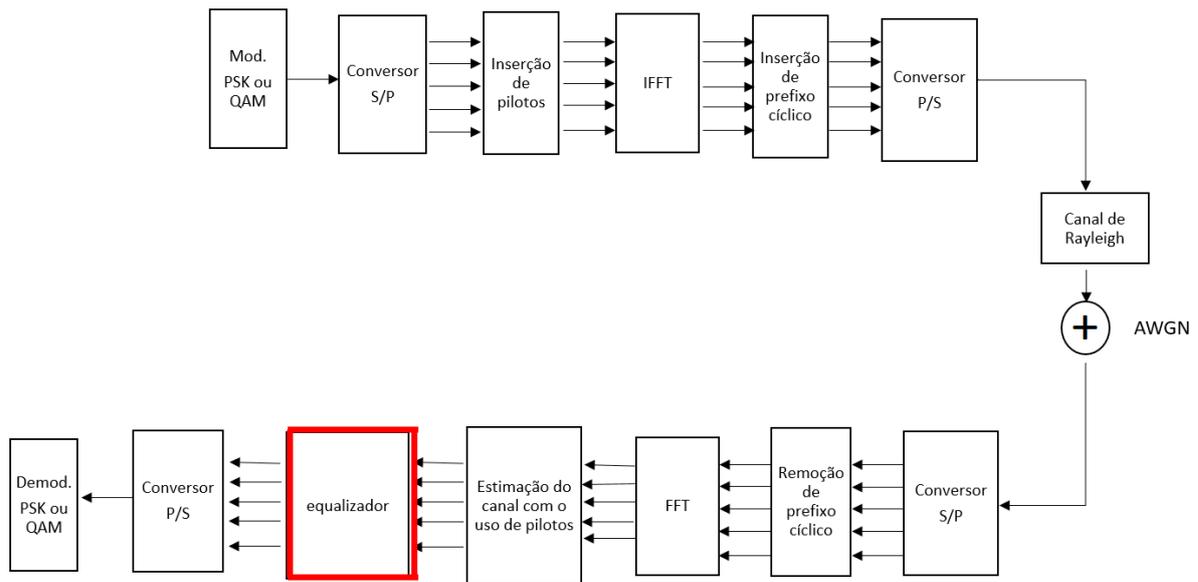


Figura 1: Diagrama de bloco transmissão/recepção para um sinal OFDM.

2.1. Diagrama de blocos da geração do sinal OFDM

A informação a ser transmitida passa, inicialmente, pelo modulador digital, frequentemente do tipo QAM ou PSK [8]. Em seguida, o sinal é transformado de serial para paralelo por um conversor. Depois de inserido o sinal de piloto, o sinal é transferido para o domínio do tempo, através da sua IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*). Finalmente, é inserido um prefixo cíclico no símbolo OFDM. O processo inverso é aplicado para a recepção, considerando-se que o sinal recebido sofreu com os efeitos dos multipercursos e do ruído aditivo gaussiano. O efeito dos multipercursos é sentido quando sinal passa através de um canal do tipo Rayleigh [9]. Este canal é típico de ambientes urbanos, onde não existe a visada entre transmissor (TX) e receptor (RX), levando em conta apenas multipercursos que chegam ao receptor, em diferentes retardos, com diferentes amplitudes e fases, o que faz gerar um sinal de variabilidade na recepção. Além disso, é introduzido o ruído branco AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) [9], simulando todas as fontes de ruído que podem se somar ao sinal transmitido. O equalizador é destacado, pois será o objeto de estudo deste artigo. É importante

dizer que os pilotos é que contribuirão para a equalização do sinal, conforme será descrito no item 2.2.

2.2. Equalização e emprego de pilotos

A equalização é realizada após feita a estimação do canal. Esta, por sua vez, é realizada através de uma sequência de treinamento $X[n]$, transmitida nas subportadoras chamadas de piloto, que é conhecida na recepção e que é enviada em intervalos conhecidos (T) para o canal, como mostra a Figura 2. Assim, quando transmitida pelo canal, sofre o efeito do mesmo (multipercursos e ruído branco) e chega, na recepção, levando a informação do canal. Chamando a função de transferência do mesmo de $H[n]$, e o sinal recebido de $Y[n]$, tem-se que:

$$H[n] = Y[n] / X[n] \quad (1)$$

Na recepção, se a sequência $Y[n]$ passa através de um equalizador que apresenta seus coeficientes segundo a função inversa de Y , ou seja, $1/Y[n]$, recupera-se o sinal X no receptor.

Na Figura 2, os pilotos se encontram junto com as portadoras que transportam a informação. Observa-se que estão sempre à frente da informação, de forma a garantirem que o equalizador possa corrigir seus coeficientes dinamicamente, a cada T segundos.

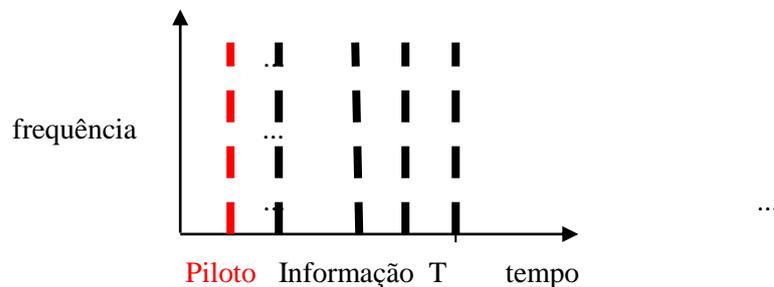


Figura 2: Portadoras piloto em sistemas de equalização com sequência de treinamento.

Neste trabalho, a equalização *Zero Forcing* foi a adotada porque, além de simples, também é realizada com baixo custo computacional [10]. Assim, o algoritmo de equalização linear usado trabalha com a resposta de frequência inversa do canal. O seu nome é devido ao mesmo trazer para nula a ISI (*Inter-Symbol Interference*) em um canal livre de ruído.

3. Procedimentos da simulação

A Tabela 1 mostra os parâmetros empregados no código desenvolvido em MatLab®, em uma simplificação de um cenário de transmissão 4G atual [10]. A criação do bloco transmissor/ receptor segue o mesmo esquema que a Figura 1. Para a obtenção do efeito de

modulação no sinal correspondente ao bloco 1, pode ser utilizada a ferramenta de modulação como *QAMmodulator* ou *PSKmodulator*. O conversor serial/ paralelo (S/P), representado no bloco 2, pode ser realizado pelo comando *reshape*.

Tabela 1: Parâmetros do OFDM

Número de símbolos OFDM transmitidos	16
Ordem do modulador digital (M)	16
Tamanho da IFFT	256 subportadoras
Numero de subportadoras com piloto	24 pilotos
Fração do símbolo OFDM que é repetida	1/4 (prefixo cíclico CP)

Na Figura 1, os blocos 3, 4 e 5 podem ser representados pela ferramenta *OFDMmodulator*, que se encarrega da IFFT, inserção do prefixo cíclico e da inserção de pilotos. Os blocos seguintes do esquema representam as características do canal, como a presença de multipercursos, modelado por uma distribuição de probabilidade Rayleigh e a adição de ruído gaussiano. Para simulação do canal Rayleigh foi utilizado o comando *rayleighchan*, no qual pode ser variado o tempo de atraso de cada multipercurso e os bins (janela de tempo de chegada entre multipercursos).

Os últimos blocos da Figura 1 mostram a parte de recepção do sinal, na qual ele sofrerá o processo inverso do que foi descrito nos primeiros blocos, como a demodulação do sinal OFDM pela ferramenta *OFDMdemodulator*. Em seguida, para a demodulação do sinal é utilizado *QAMdemodulator* ou *PSKdemodulator*.

4. Resultados

Para se analisar o comportamento do canal sobre o sinal, sem o uso de equalização, a Figura 3 mostra os símbolos recebidos em um esquema de modulação QAM-16, com a taxa de erro de bits calculada, para diversas simulações do sinal que foi transmitido em um canal com visada direta (LOS) sem multipercursos, apenas com ruído branco (AWGN), para diferentes valores de relação sinal-ruído (SNR): 30, 25, 20, 15 e 10 dB. Baixando a SNR de 20 para 15 dB, já se observará o aparecimento de bits errados.

Ressalta-se que a SNR não deve ultrapassar o limite a partir do qual se obtém uma BER não tolerável para o sistema, de forma a se obter uma correta detecção de símbolos.

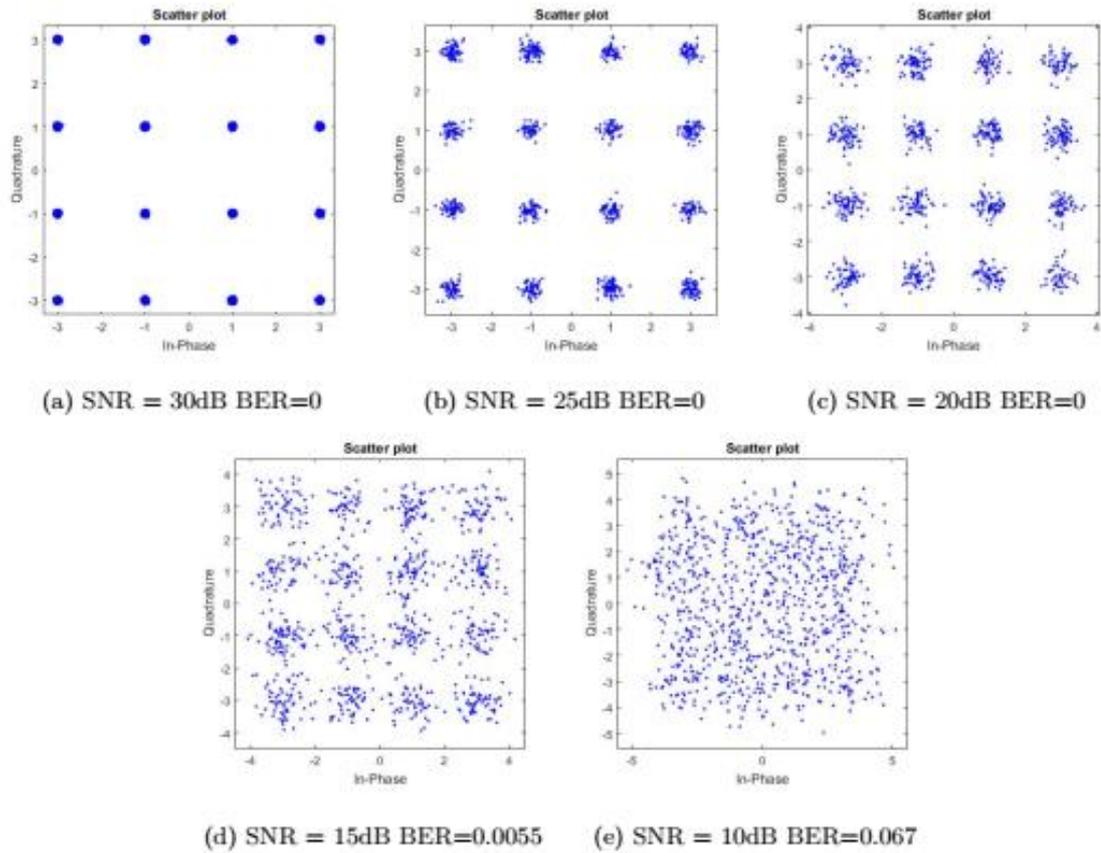


Figura 3: BER versus SNR para um sinal QAM-16 em um canal LOS apenas ruidoso.

Na Figura 4, para uma SNR fixa igual a 30 dB e ainda sem equalização, verifica-se apenas o efeito dos multipercursos sobre o sinal recebido, sem o ruído, mostrando-se o símbolo recebido sem multipercurso, com um e com três multipercursos. O que se observa é que o multipercurso altera a fase do símbolo e que três multipercursos foram suficientes para destruir a constelação, dificultando muito o processo de demodulação digital.

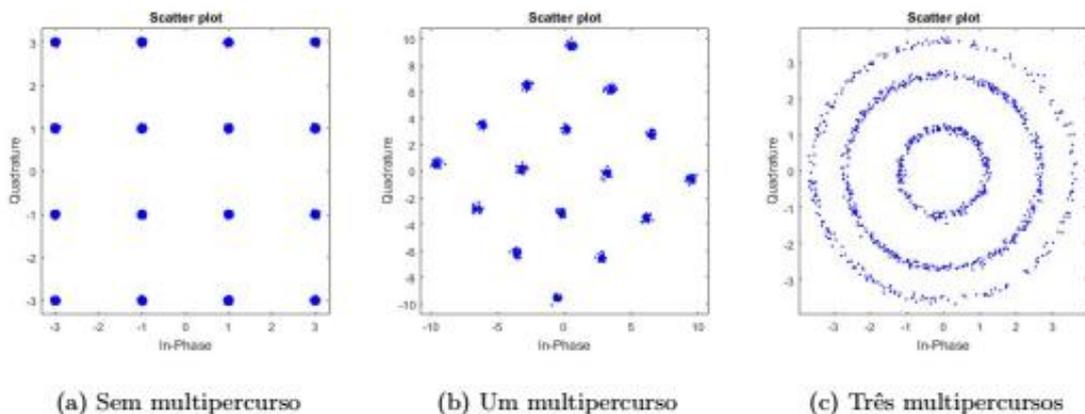


Figura 4: Símbolos do sinal QAM-16 em um canal sem ruído em função do número de multipercursos.

Mesmo sem a presença de ruído, a dificuldade na detecção do símbolo para um canal com multipercursos, mostra a necessidade do emprego de um equalizador de forma a se recuperar o sinal de informação no receptor. Com a informação dos pilotos recebidos e os gravados no receptor, foi criado um equalizador ZF para cancelar os efeitos nocivos através da criação de um algoritmo que gerou um efeito inverso ao do canal.

Ainda sem supor a presença de ruído, quando o equalizador ZF é aplicado aos sinais da Figura 4(b) e Figura 4(c), observa-se o sinal à saída do equalizador na Figura 5(a) e Figura 5(b), respectivamente, mostrando o acerto das fases do símbolo QAM-16.

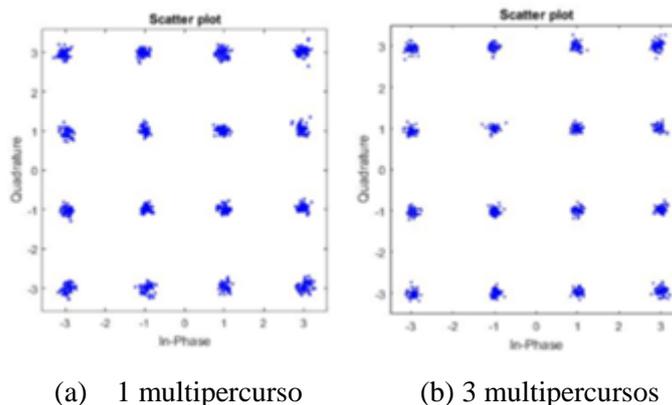


Figura 5: Símbolos do sinal QAM-16 em um canal sem ruído, após a equalização.

A fim de ilustração, escolheu-se como informação a foto da Figura 6 para ser transmitida através do sistema OFDM proposto, empregando a modulação QAM-16.



Figura 6: Foto transmitida pelo sistema OFDM, com modulação QAM-16.(Fonte: [11])

Após passar pelo canal ruidoso, com $SNR = 30$ dB e supondo a presença de três multipercursos, a Figura 7a mostra a constelação referente ao sinal recebido, enquanto a Figura 7b mostra o sinal que é recuperado quando não é empregado o equalizador ZF. Observa-se que, mesmo com alta SNR, a presença dos multipercursos deteriorou o sinal recebido, não sendo possível sua identificação.

Se, entretanto, o equalizador ZF é empregado antes da demodulação QAM-16, o sinal que se obtém para o caso de três multipercursos e $SNR = 30$ dB, é recuperado, com BER

próxima de zero, e está mostrado na Figura 8. Observa-se a recuperação das fases dos símbolos QAM-16 e, também, da foto que foi transmitida pelo sistema.

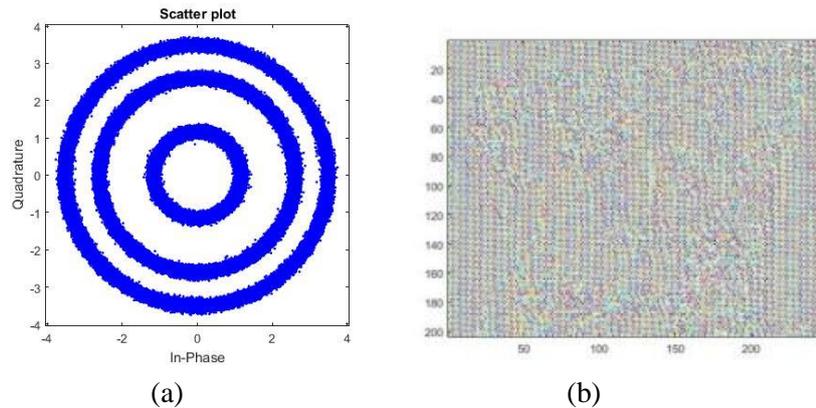


Figura 7: Sinal recebido sem emprego do ZF: (a) constelação e (b) foto.

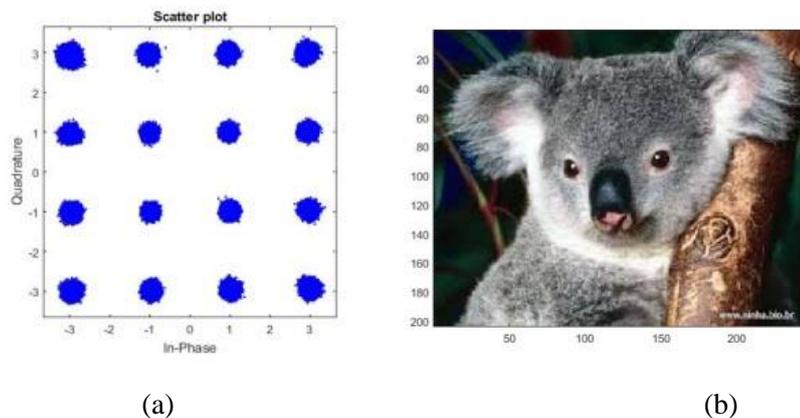


Figura 8: Sinal recebido com emprego do ZF: (a) constelação e (b) foto.

Uma vez que os resultados apontam para a efetiva atuação do equalizador na recuperação de um sinal transmitido num canal com múltiplas reflexões como ocorre, principalmente, nos sinais de celulares, alguns outros testes foram realizados de forma a se observar a resposta do equalizador para um número fixo de 3 multipercursos, mas com a SNR decrescente. O objetivo da simulação é testar a capacidade deste mesmo equalizador para recuperação dos efeitos do ruído branco. O que se observa é que, com SNR = 10 dB ainda se vê a foto original, como mostra a Figura 9a, com BER = $7,27 \times 10^{-2}$, entretanto, a figura já perdeu a nitidez para SNR = 5 dB, onde BER = $18,34 \times 10^{-2}$.

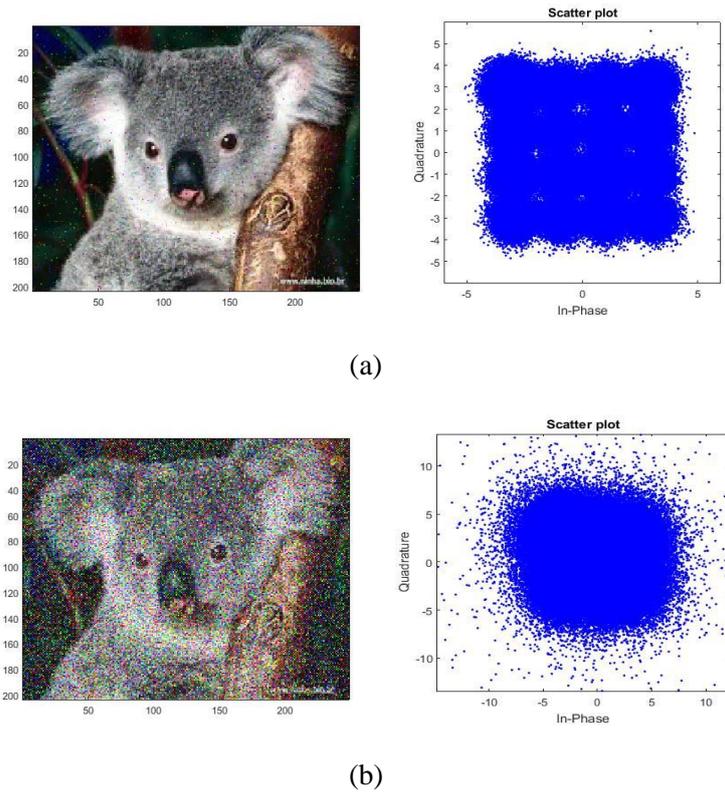


Figura 9: Foto recebida com equalização e 3 multipercursos com SNR: (a) 10 dB, (b) 5 dB.

Para SNR = 0 dB, só se consegue observar uma sombra, como mostra a Figura 10, onde $BER = 32,18 \times 10^{-2}$.

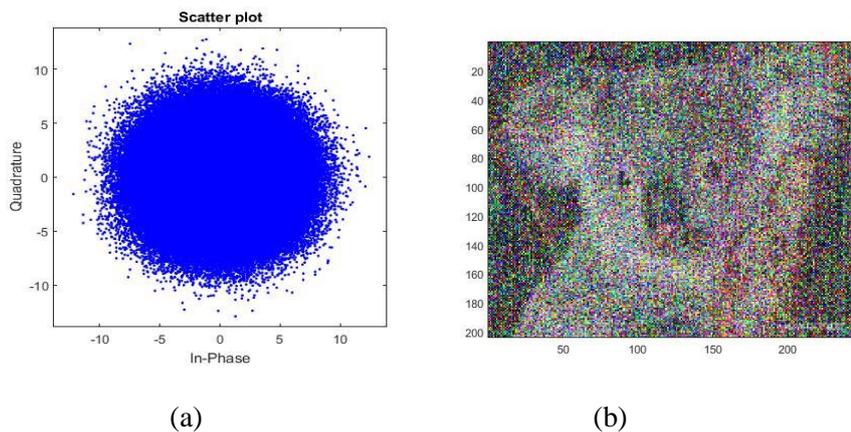


Figura 10: Sinal recebido com equalização, SNR = 0 dB e 3 multipercursos: (a) constelação e (b) foto.

5. Conclusões

O objetivo deste trabalho era analisar o efeito do equalizador *Zero Forcing* na recuperação do sinal transmitido através de um canal sem visada (NLOS), em que o sinal que

chega ao receptor é a composição de multipercursos oriundos de diversos refletores no ambiente entre transmissor e receptor. Para tal, foi simulado um sinal OFDM, empregando modulação QAM-16, e transmitido através de um canal Rayleigh com ruído aditivo gaussiano. Nas simulações realizadas, foi percebido que mesmo o equalizador mais simples, do tipo *Zero Forcing*, seria suficiente para combater os efeitos negativos dos multipercursos. Supondo a presença de três multipercursos, com o OFDM adotado, cujas características foram tabeladas, foi possível receber, com nitidez, a foto transmitida para relações sinal-ruído até 10 dB. Para valores mais baixos, verificou-se piora na recepção, podendo-se dizer que para SNR = 0 dB, já não mais era possível recuperar o sinal, portanto, o emprego do equalizador permite o acerto de fase na constelação QAM-16, que foi alterada devido à distorção temporal do sinal pela presença dos multipercursos, mas o equalizador *Zero Forcing* não leva em conta o ruído, que é inerente a todo canal de comunicação. Sendo assim, pode-se dizer que é a SNR quem limita a recepção do sinal e, em canais muito ruidosos, o sinal será realmente pior. Vale ressaltar que o equalizador ZF empregado foi o mais simples deles e que um equalizador mais robusto permitiria, ainda, melhores resultados, ou seja, menores taxas de erro de bits.

6. Referências

- [1] PRASAD, R. 2004. *OFDM for wireless communication systems*, London, Artech House.
- [2] ANDREWS, G. A., GHOSH, A., and MUHAMED, R. 2007. *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall.
- [3] RAUSCHER, C. 2001. *Fundamental of Spectrum Analysis*, Rohde & Schwarz, Germany.
- [4] BJERGE, F. , PRASAD, F.& R.. An overview of OFDM and related techniques towards development of future wireless multimedia in Proc. of the IEEE RAWCOM 2002. Boston, MA.
- [5] PIRES, J. C. S., MATOS, L. J., FURTADO, L. H. G. 2014. Dispersão Temporal do Sinal Rádio Móvel em Parque Urbano na Faixa de 2,5 GHz. 16° SBMO – Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 11° CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Curitiba, 1-5.
- [6] SHEN, Y. and MARTINEZ, E. 2006. *Channel Estimation in OFDM Systems*, Application Note, Freescale Semiconductor.
- [7] WANG, C. X., HAIDER, F., GAO, X., YOU, X. H., YANG, Y., YUAN, D., AGGOUNE, H. M., HAAS, H., FLETCHER, S. & HEPSAYDIR, E.. Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks - *IEEE Communications Magazine*.
- [8] JEFREY, G. A. 2007. *Fundamentals of WiMAX*, Upper Saddle River, Pearson Education.
- [9] PARSONS, J. D. 2000. *The Mobile Radio Propagation Channel*, John Wiley & Sons, 2nd. Ed..
- [10] ROCHE, G., GLAZUNOV, A. A. and ALLEN, B., 2013. *LTE-Advanced and Next Generation Wireless Networks – Channel Modeling and Propagation*, U. K, Wiley.
- [11] <http://www.calatorii.ha-ha.ro/state.php?state=australia>.