1

Introdução

1.1

Breve Histórico OFDM

O OFDM, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, que pode ser visto como uma evolução do FDM (*Frequency Division Multiplexing*), é uma técnica de transmissão de sinais por multiplexação em frequência que data do final da década do sessenta.

A transmissão dos sinais em sistemas de comunicações pode ser dividida em duas classes: transmissão por portadora única (*Single Carrier Modulation*) ou transmissão por múltiplas portadoras (*Multicarrier Modulation*). Na transmissão por meio de portadora única, os símbolos que compõem os sinais modulam apenas uma única portadora, e são transmitidos em série. No caso da transmissão por múltiplas portadoras, os sinais de dados geram blocos de N símbolos ao longo do tempo, sendo que cada símbolo modula uma dentre N sub-portadoras. Os N símbolos são portanto transmitidos de forma paralela através de N sub-portadoras distintas. Assim, para uma mesma taxa de transmissão de bits, a duração de um símbolo transmitido por meio de múltiplas portadoras é N vezes maior do que a duração de um símbolo transmitido por meio de portadora única. Desta forma, os sistemas de múltiplas portadoras experimentam uma interferência entre símbolos (*Inter Symbol Interference - ISI*) menor do que o experimentado por sistemas de portadora única, possibilitando o uso, na recepção, de equalizadores mais curtos e menos complexos.

Inicialmente, os sistemas de múltiplas portadoras, com multiplexação em frequência, utilizavam filtros com faixa de transição abrupta para conseguir a separação dos sub-canais. Além disso, de modo a diminuir a interferência entre sub-portadoras, faixas de frequências (guarda) eram colocadas em torno de cada sub-portadora. Assim, este tipo de implementação era custoso e o sistema resultante tinha uma baixa eficiência espectral.

O OFDM [1, 2, 3, 4, 5], surgiu da constatação de que sub-portadoras ortogonais e superposição em frequência não são eventos mutuamente exclusivos e possibilitam uma redução na diferença entre as frequências das sub-portadoras. Deste modo sistemas utilizando OFDM apresentam uma

eficiência espectral muito mais elevada que a de seus antecessores. Observe que, se o espaçamento entre as sub-portadoras for $1/T$, onde T é a duração do símbolo transmitido, a informação contida em cada sub-portadora pode ser recuperada adequadamente apesar da superposição dos espectros das sub-portadoras moduladas. Entretanto, como a implementação do banco de moduladores e demoduladores no transmissor e receptor respectivamente era feita inicialmente de forma analógica (com base em osciladores) a condição de ortogonalidade, na prática, era difícil de ser conseguida.

Devido às dificuldades de implementação, apenas algumas aplicações [3, 6], utilizaram o OFDM no passado. A situação mudou depois que foi mostrado que sinais OFDM podem ser gerados digitalmente utilizando-se a Transformada Discreta de Fourier [7]. Mostrou-se, por exemplo, que o banco de osciladores no transmissor pode ser implementado de forma eficiente no domínio digital aplicando-se a Transformada Inversa Discreta de Fourier aos sinais a serem transmitidos. De maneira análoga o banco de osciladores no receptor pode ser implementado utilizando-se a Transformada Discreta (Direta) de Fourier.

1.2

Vantagens do OFDM

Por conta do aumento no tempo de duração dos símbolos transmitidos em cada sub-portadora, o uso da técnica OFDM tem como vantagens, a redução das interferências entre símbolos e a robustez do sistema ao ruído impulsivo e aos efeitos de seletividade em frequência [8, 9]. No caso de existirem erros gerados pelo ruído de rajada, os símbolos podem ser recuperados na recepção utilizando-se esquemas apropriados de codificação como, por exemplo, técnicas de *interleaving* [10].

Conforme mencionado anteriormente, comparado com sistemas que utilizam o FDM, o OFDM apresenta uma melhor eficiência espectral devido ao uso de sub-portadoras ortogonais que permitem uma superposição em frequência. Uma outra vantagem do sistema OFDM é a sua robustez aos efeitos de canais com multipercurso, obtida ao se utilizar intervalos de guarda entre os símbolos OFDM transmitidos.

Considerando-se estas vantagens e o advento de processadores específicos para o cálculo feito por meio da Transformada Discreta de Fourier (e sua inversa), feito por meio do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier, a técnica OFDM vem sendo utilizada com sucesso em diferentes tipos de aplicação como, por exemplo, nos sistemas de transmissão de radio digital (DAB) [11], nos sistemas de transmissão de televisão digital (DVB) [12], em redes locais sem fio (802.16e) [13], em redes de acesso fixas ADSL [14], em sistemas FLASH-OFDM [15], em Powerline Communications [16] e no Downlink LTE [17]

1.3

Problema motivador e escopo da tese

Uma das principais desvantagens do OFDM é a sua sensibilidade a distorções não-lineares. Em sistemas de comunicações sem fios estas distorções são introduzidas principalmente por amplificadores de alta potência (HPA) ou, no caso de comunicações por satélite, por transponders não-lineares. Muitos dos trabalhos disponíveis na literatura não consideram o efeito de memória dos HPAs. Porém, para aplicações em banda larga, estes efeitos não podem ser ignorados. A não-linearidade dos HPAs produz dois tipos de distorção: *amplitude-to-amplitude* (AM/AM) e *amplitude-to-phase* (AM/PM). Estas distorções não-lineares resultam em dois efeitos negativos: (i) deformação da constelação, que degrada o desempenho do sistema, e (ii) espalhamento espectral, que produz interferências nos canais adjacentes. Na literatura podem-se encontrar diversos trabalhos que estudam estes efeitos considerando o HPA sem memória [18]-[25] e em menor número trabalhos que consideram o HPA com memória [26]-[29].

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) recebeu recentemente uma maior atenção devido à sua capacidade de suportar comunicações de alta taxa de dados em ambientes de desvanecimento seletivos em frequência com uma estrutura relativamente simples do receptor. No entanto, o aumento da duração do símbolo OFDM torna o sistema mais sensível às variações de tempo resultantes do canal móvel e da mobilidade do receptor. Em particular, os efeitos do espalhamento Doppler destroem a ortogonalidade das diferentes sub-portadoras e geram uma dispersão da energia entre as sub-portadoras, conhecida como interferência entre portadora (*Inter Carrier Interference - ICI*), que irá causar a degradação do desempenho do sistema. Na literatura podem-se encontrar trabalhos que estudam os efeitos de canais lineares variantes no

tempo, considerando por exemplo canais de propagação com desvanecimento seletivo em frequência [30]-[33], canais de propagação com desvanecimento não-seletivo em frequência [34]-[37] e em alguns casos considerando canais de propagação invariantes no tempo [38, 39].

Assim, torna-se importante o estudo dos efeitos de não-linearidades e canais variantes no tempo em sistemas OFDM, principalmente em sistemas de comunicações móveis. Porém, os trabalhos atualmente disponíveis na literatura se limitam a avaliar os efeitos de não linearidades invariantes no tempo ou o efeito de canais lineares variantes no tempo.

Assim, considerando a importância do assunto e a inexistência de trabalhos na literatura dedicados ao assunto, é de grande interesse obter resultados nesta direção. Assim, este trabalho visa desenvolver expressões que permitam avaliar o efeito conjunto de não-linearidades com memória e canais variantes no tempo sobre sinais OFDM. A investigação deste efeito será realizada em duas etapas: (i) Investigando os efeitos da não-linearidade variante no tempo sobre o espectro de sistemas OFDM e (ii) Investigando o efeito da não-linearidade variante no tempo no desempenho do sistema.

1.4

Organização do texto

O Capítulo 2, aborda alguns aspectos dos sistemas OFDM: A implementação baseada em osciladores coerentes, a implementação baseada em FFT, a utilização do intervalo de guarda com prefixo cíclico (para reduzir os efeitos de interferências entre sub-portadoras) assim como o utilização do pulso formatador. Neste capítulo, também é realizada a caracterização do sinal OFDM.

O Capítulo 3, apresenta os modelos usualmente utilizados no estudo de sistemas não-lineares com memória invariantes no tempo assim como o modelo a ser usado neste trabalho para avaliar os efeitos de não-linearidades variantes no tempo com memória. Esse capítulo inclui a caracterização do canal variante no tempo considerado.

No Capítulo 4, sem perda de generalidade, o sinal OFDM de entrada é considerado como sendo estacionário no sentido amplo (ESA), a caracterização do sinal na saída do canal não-linear variantes no tempo com memória

é realizada de modo a obter uma expressão para a densidade espectral de potência e assim, poder analisar o efeito da não-linearidade com memória variantes no tempo sobre o espectro dos sinais OFDM.

No Capítulo 5, é apresentada a estrutura do receptor. São obtidas expressões matemáticas para os símbolos complexos distorcidos pelo canal não-linear variante no tempo e corrompido pelo ruído térmico do receptor. Assim, utilizando-se estes resultados foram desenvolvidas expressões matemáticas para avaliar o efeito da não-linearidade com memória variante no tempo sobre a taxa de erro de bits de sistemas OFDM.

Finalmente, o capítulo 6, apresenta algumas considerações finais.