

1

Introdução

Sistemas de transmissão sem-fio, operando em altas taxas, são uma realidade atualmente. Internet, Televisão Digital e telefonia celular são exemplos conhecidos de transmissão sem-fio, e que operam em velocidades cada vez mais altas para atender uma demanda sempre crescente por serviços de alta qualidade.

Para que seja possível chegar a estas altas taxas de transmissão digital (superiores a milhões de bits por segundo), as portadoras do sinal de informação estão na ordem de alguns GHz em alguns sistemas. Nesse cenário, o canal de transmissão se apresenta com vários percursos (canais multipercurso) entre origem e destino, o que leva uma mesma informação a chegar em instantes diferentes no receptor. Surge então o fenômeno da interferência entre símbolos (IES), devido ao alargamento dos pulsos enviados.

Somado a este problema, aparece também o desvanecimento do canal, que por conta do movimento relativo entre transmissor e receptor, leva a envoltória do sinal a flutuar de acordo com as variações do canal. Sob estas condições, é necessário realizar uma equalização eficiente no sinal recebido, no intuito de mitigar os problemas acima relatados.

Uma maneira alternativa de se realizar uma transmissão, é implementá-la em blocos no domínio da frequência. Neste método, insere-se uma faixa de guarda em cada bloco transmitido, de maneira que é possível eliminar o efeito da interferência entre blocos (IEB) sucessivos. Um dos sistemas mais conhecidos nesse modelo é a transmissão OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) [7], [13], [18], ou multiplexação por divisão de frequências ortogonais. Este, já é empregado no padrão europeu de transmissão digital de áudio e vídeo (DAB/DVB), e também é utilizado com sucesso em modems DSL (*digital subscriber lines*) nos Estados Unidos. O OFDM foi proposto para os sistemas cabeados de televisão digital e para redes móveis sem-fio, como especificado nos padrões IEEE802.11a e 11g, WiMAX (IEEE 802.16), DVB-T, UWB e no padrão HIPERLAN/2. De forma sucinta, sua estrutura é apresentada na Figura 1.1 para uma classe conhecida como CP-OFDM, onde há a inserção de um prefixo cíclico como faixa de guarda.

Por realizar uma Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT da sigla em inglês), é possível converter o canal em vários sub-canais paralelos. Dependendo da faixa de guarda adotada em cada bloco, estes canais se tornam livres de IES, com um ganho em cada sub-canal igual ao valor de sua resposta em frequência.

Dessa maneira, a equalização associada a cada bloco pode ser realizada por um filtro linear discreto (Ex: *tapped-delay line*) com cada coeficiente do filtro digital independente do outro. Isto reduz a complexidade do filtro consideravelmente, especialmente quando os número de símbolos por bloco é grande.

No entanto, o revés de se utilizar uma IDFT na transmissão gera alguns problemas, entre eles

1. PAPR (*peak-to-average power ratio*) ou razão pico-valor médio de potência. O OFDM apresenta excursões altas do sinal a ser transmitido, o que acarreta em dificuldades no dimensionamento do amplificador no terminal transmissor. Assim, é necessário um alto valor de *back-off* no amplificador para mantê-lo operando na sua região linear e evitar com isso os produtos de intermodulação gerados pela não-linearidade da região de saturação de um amplificador.
2. Devido ao fato da transmissão ocorrer em sub-canais independentes, toda a informação de um símbolo está contida num sub-canal. Isto causa sensibilidade à nulos no espectro do canal, ao descasamento entre os osciladores de transmissão-recepção e o efeito Doppler em que ambos acarretam desvios (*offset*) de frequência nas sub-portadoras.
3. OFDM sem código não permite ganhos de diversidade devido aos multi-percursos.

Diversas técnicas são utilizadas para aliviar os problemas descritos, como por exemplo: códigos corretores de erro e algoritmos para redução de PAPR. Porém, a PAPR resultante ainda está alguns Decibéis acima das transmissões com uma única portadora (*single-carrier*).

Assim, um recente método de transmissão surge como uma maneira de mitigar os problemas encontrados pelo OFDM: os sistemas com transmissão em uma única portadora e com equalização no domínio da frequência, que são conhecidos como SC-FDE (*Single-carrier-frequency domain equalization*).

Este sistema, como ilustra a Figura 1.1 para o CP-SC-FDE, com prefixo cíclico, descarta a IDFT na transmissão e realiza apenas as transformadas na

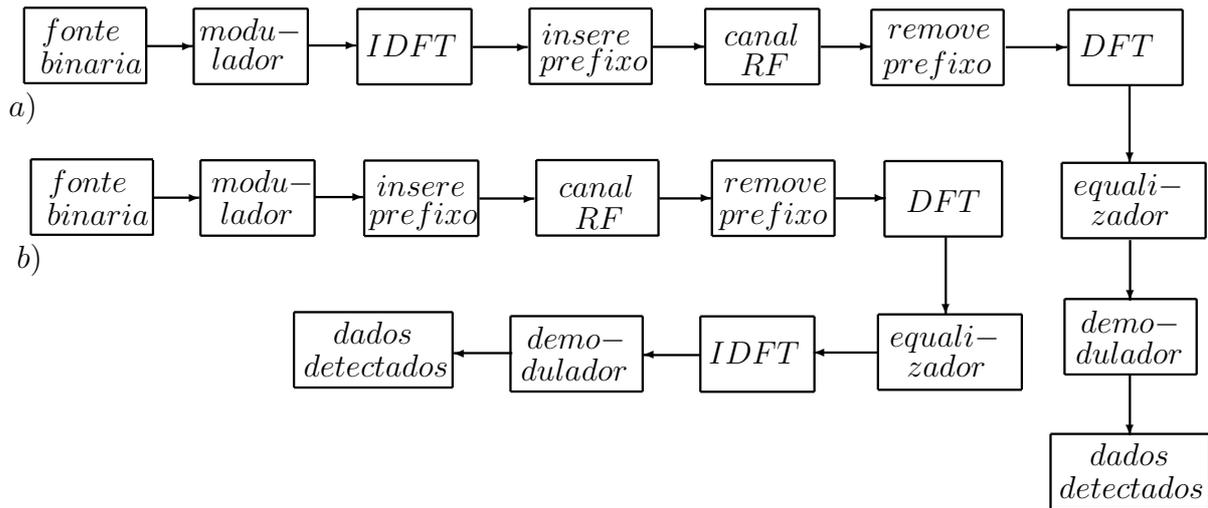


Figura 1.1: Diagrama em blocos de a) OFDM e b) *single-carrier* com equalização no domínio da frequência.

recepção, eliminando assim o problema de PAPR, além de, em geral, diminuir a complexidade dos dispositivos transmissores.

O projeto 3GPP-LTE (*Third Generation Partnership Project - Long Term Evolution*), que estuda evoluções para o sistema UMTS (*Universal Mobile Telecommunications Systems*), propôs uma série de recomendações que, principalmente, já preparam o sistema para atender requisitos do futuro. No que tange ao *uplink* (sentido usuário \rightarrow central ou *hub*), projetou-se que seria utilizada SC-FDMA (Múltiplo acesso dos usuários feito com SC-FDE) e o *downlink* (*hub* \rightarrow usuário), utilizando OFDM. Dessa maneira, a central fica encarregada de realizar maior processamento, devido ao número de DFTs, enquanto o dispositivo do usuário necessita de apenas uma DFT (Figura 1.1).

1.1

Organização deste trabalho

Esta dissertação é organizada da seguinte forma. O Capítulo 2 aborda os conceitos básicos de uma transmissão SC, assim como o modelo de transmissão pelo seu equivalente banda-básica. São introduzidas duas maneiras de inserir faixa de guarda no bloco transmitido. O modelo do canal utilizado ao longo deste trabalho é também apresentado. Por fim, uma análise do sinal recebido, assim como técnicas para equalizá-lo.

O Capítulo 3 trata das estruturas de equalização. Duas das principais expressões analíticas são apresentadas: MMSE (*Minimum Mean Squared-Error*) e ZF (*Zero-Forcing*). São então introduzidos algoritmos para equalização adaptativa: LMS (*Least Mean Square*), NLMS (*Normalized Least Mean Square*) e

RLS (*Recursive Least Square*). O uso destes equalizadores adaptativos será inserido no contexto de transmissões em blocos de dados (operando no domínio da frequência). Curvas de desempenho são apresentadas para o sistema com estes algoritmos adaptativos, assim como comparações de convergência entre eles. Ao final, o modo de operação conhecido como "orientado pela decisão" (ou *decision directed* em inglês), faz uso das próprias estimativas do decisor para atualizar os algoritmos adaptativos.

O Capítulo 4 aborda as estruturas de equalização com decisões realimentadas. A necessidade de uma equalização após o estágio linear é explicada. Segue então a derivação do algoritmo que implementa esta configuração, conhecida como filtros *backwards* ou filtros de *feedback*. São apresentadas estruturas que operam tanto no caminho direto (*forward*, no domínio da frequência), conforme visto no Capítulo 3, quanto no laço de retorno. Estes, operando no domínio do tempo.

O Capítulo 5 introduz o sistema *OFDM*, seu modelo e sua formulação matemática, assim como considerações a respeito de sua operação. Resultados de desempenho são também apresentados. Por fim, um modelo unificado entre os sistemas *SC* e *OFDM* é descrito assim como comparações de desempenho entre os dois sistemas.

O Capítulo 6 tece comentários finais sobre os resultados obtidos. Encerra-se este trabalho com conclusões e com sugestões para trabalhos futuros acerca do tema abordado.

1.2

Notação adotada

Símbolos minúsculos em negrito representam vetores (ex: \mathbf{a}), símbolos maiúsculos em negrito representam matrizes (ex: \mathbf{A}). Uma matriz diagonal pode ser obtida diagonalizando os elementos de um vetor pelo operador *diag*; nesse caso $\mathbf{B} = \text{diag}(\mathbf{b})$. $\mathbb{E}(\cdot)$, \star , \otimes , significam respectivamente: valor esperado, convolução linear e convolução circular. Para operações com vetores e/ou matrizes usamos: $(\cdot)^\dagger$, $(\cdot)^T$, $(\cdot)^H$ para representar, na ordem: pseudo-inversa, tranposto e hermitiano.

Outras notações utilizadas são: $\mathcal{Re}\{\cdot\}$, $\mathcal{Im}\{\cdot\}$ que significam respectivamente parte real e parte imaginária. $\tilde{m}(f) = \mathcal{F}\{m(t)\}$ representa a transformada de Fourier de um sinal contínuo, assim como $\tilde{\mathbf{b}}^{(i)}[k]$ representa a k -ésima componente da transformada discreta de Fourier (DFT, na sigla em inglês) do i -ésimo vetor $\mathbf{b}^{(i)}[t_k]$, onde t_k representa amostras discretas do tempo t .