

2

Técnica de Transmissão OFDM

Na área de telecomunicações, novas aplicações estão surgindo como, por exemplo, o desenvolvimento da transmissão terrestre de TV com modulação digital, o que necessita um grande compromisso entre a taxa de bits transmitidos e a largura de banda. Para os atuais sistemas multimídia, as taxas de bits variam de alguns kbps (para voz), até 20 Mbps, para HDTV (High Definition Television), a televisão de alta definição.

Ao se enfrentar esta questão, o primeiro ponto que surge é como transmitir uma grande quantidade de bits/s no ar garantindo-se a qualidade do serviço, isto é, que modulação poderá atender, da melhor maneira, os compromissos contraditórios (taxa de bits e largura de banda). O ambiente de propagação terrestre é severo devido à existência de muitas ondas refletidas, ou seja, um ambiente de propagação multipercurso, o que provoca desvanecimento seletivo do sinal transmitido, além de outros efeitos. Uma solução poderia ser a utilização de técnicas de equalização no receptor; no entanto, existem dificuldades práticas relacionadas à maneira de se operar esta equalização em tempo real nas taxas da ordem de Mbps e utilizando-se um hardware compacto e de baixo custo. Um candidato promissor que elimina a necessidade de complexos equalizadores é o OFDM, uma técnica de modulação que utiliza múltiplas portadoras [4].

Aplicações do tipo *Wireless LAN*, que utilizam taxas de transmissão desde 20Mbps até 100Mbps para as redes de alta velocidade, e outras aplicações modernas, que exigem taxas cada vez maiores, sofrem severamente com os efeitos do desvanecimento seletivo. A solução utilizada pelos sistemas de transmissão serial tradicionais, que utilizam uma simples portadora, é o uso de equalização para combater a interferência entre símbolos (ISI), causada pelo espalhamento de retardo do canal, tipo de degradação comum em canais de propagação multipercurso. Entretanto, quanto maior a taxa de transmissão desejada, maior será a ISI e maior será a complexidade (maior número de *taps*) do equalizador. Assim uma forma mais eficiente de equalização ou uma nova técnica de transmissão deve ser buscada. Um sistema de transmissão baseado na modulação

multiportadora, também chamado de sistema de transmissão paralelo ou multiplexado, surge então como uma alternativa para aliviar os problemas do sistema serial, que utiliza modulação com portadora simples. A modulação multiportadora se enquadra nesse último caso e será analisada em detalhes a seguir, com o propósito de entender como ela consegue diminuir os problemas da modulação com portadora simples mencionados.

Uma vantagem da técnica de transmissão paralela ou multiportadora, sobre a transmissão serial, e talvez a principal, é a redução da sensibilidade do sistema ao espalhamento de retardo do canal, e portanto, à interferência entre símbolos. Ao dividir o sinal de entrada com uma alta taxa de transmissão, R , em M sinais com uma baixa taxa ($\frac{R}{M}$), que são transmitidos por M subportadoras, cada um desses M novos sinais irá agora experimentar um desvanecimento aproximadamente plano em frequência, ao contrário do sinal de banda larga original, que sofre o efeito severo do desvanecimento seletivo do canal rádio móvel. Analisando sob outro ponto de vista, para o sistema paralelo, o intervalo de símbolo é aumentado de um fator M reduzindo, portanto, a sensibilidade ao espalhamento de retardo do canal e à interferência entre símbolos associados [5].

A técnica de transmissão OFDM consiste na transmissão paralela de dados em subportadoras ortogonais [4], [5], [6], [7]. Em cada subportadora é transmitida uma seqüência de pulsos modulados digitalmente (modulação AM-PM), com um valor reduzido para a taxa de transmissão de símbolos.

Primeiramente, é considerado o caso onde uma seqüência de bits é usada para modular um sistema de transmissão digital de única portadora ($M = 1$). Para símbolos de duração T_s , o sinal de transmissão $s_{sc}(t)$ é dado pela seguinte expressão:

$$s_{sc}(t) = \Re(m(t)e^{j2\pi f_c t}) \quad (2-1)$$

onde f_c representa a frequência da portadora para transmissão em rádio frequência (RF), $m(t)$ representa a envoltória complexa de $s(t)$ com relação a frequência f_c e o termo \Re denota a parte real do termo entre parênteses.

A envoltória complexa de $s_{sc}(t)$, pode ser representada pela seguinte equação:

$$m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_n g(t - nT_s) \quad (2-2)$$

onde $d_n \in (A_i + jB_i)_{i=1}^M$, representa o ponto na constelação do esquema de modulação AM-PM transmitido no n -ésimo intervalo de sinalização e $g(t)$ denota o pulso formatador do sinal na transmissão.

Com o uso de pulsos formatadores de *Nyquist*, a largura de faixa equivalente de ruído ocupada pelo sistema de transmissão de única portadora (B_s) é dada por:

$$B_s = \frac{1}{2T_s} \quad (2-3)$$

A largura de faixa ocupada por cada uma das M subportadoras OFDM (B_{sub}) é definida como:

$$B_{sub} = \frac{B_s}{M} \quad (2-4)$$

Assim a taxa de símbolos de cada subportadora OFDM é reduzida por um fator igual a M , o número de subportadoras do sistema OFDM. Isto implica em um aumento da duração dos pulsos transmitidos por cada subportadora.

Sendo assim, os valores de T e de B_{ofdm} , definidos como a duração dos símbolos e a largura de faixa de um sistema de transmissão OFDM, respectivamente, são dados por:

$$T = MT_s \quad (2-5)$$

$$B_{ofdm} = MB_{sub} = B_s \quad (2-6)$$

Assim o valor da banda ocupada por um sistema OFDM, dado em (2-6), é igual ao valor obtido para um sistema de transmissão de única portadora, dado em (2-4).

Entretanto, por empregar uma transmissão paralela de dados em subportadoras ortogonais estreitas, a técnica de transmissão OFDM torna o sistema de transmissão mais robusto aos efeitos da seletividade em frequência, visto que há um aumento intervalo de duração dos pulsos transmitidos em cada subportadora. O uso de pulsos de maior período torna o sistema mais imune aos efeitos de espalhamento de retardo do canal canais de propagação multipercurso. Os tipos de canal de propagação serão detalhados no próximo capítulo.

A técnica OFDM constitui uma evolução da técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*), a qual se utiliza de bandas de guarda para separar os espectros dos sinais de cada subportadora do sinal de transmissão. Isto resulta em desperdício de faixa de frequências, fato inadmissível nos sistemas de transmissão atuais.

Para contornar este problema, a técnica OFDM utiliza-se da sobreposição espectral de M subportadoras, com espaçamento em frequência dado por $\Delta f = \frac{1}{T}$.

O termo T representa o intervalo de duração de um símbolo OFDM. Note que cada símbolo OFDM é formado por um conjunto de M subsímbolos de um esquema de modulação AM-PM, ambos de duração T_s .

Verifica-se que o uso da sobreposição espectral garante um melhor aproveitamento da largura de faixa de frequências destinada ao sistema.

Apesar de haver sobreposição espectral, os espectros dos sinais de cada subportadora são matematicamente ortogonais entre si, o que permite a demodulação dos feixes de símbolos recebidos, na condição de sincronismo de portadora e de relógio na recepção.

O espaçamento entre subportadoras é determinado de forma que cada subportadora seja alocada na posição dos nulos espectrais das demais, preservando a condição de ortogonalidade no domínio da frequência. Para tanto, os pulsos utilizados na transmissão para cada subportadora devem ser retangulares com isso, de acordo com as propriedades da Transformada de Fourier, o espectro em cada um dos subcanais terá a forma de uma $\text{sinc}(f)$ centrada na frequência da

subportadora correspondente aquele subcanal. Os zeros da $\text{sinc}(f)$ ocorrem a distâncias $\frac{1}{T}$ (onde k é um inteiro), da frequência da subportadora, de tal forma que, se as subportadoras forem espaçadas de $\frac{1}{T}$ não haverá superposição de espectro nas frequências centrais onde a informação estará contida. Dessa forma teremos a ortogonalidade das subportadoras e a informação poderá ser totalmente recuperada com uma demodulação/equalização no domínio da frequência. Na Figura 2.1 temos o espectro de frequência de um sinal OFDM em banda básica mostrando a superposição entre as *sincs* de cada subportadora para compor o espectro total:

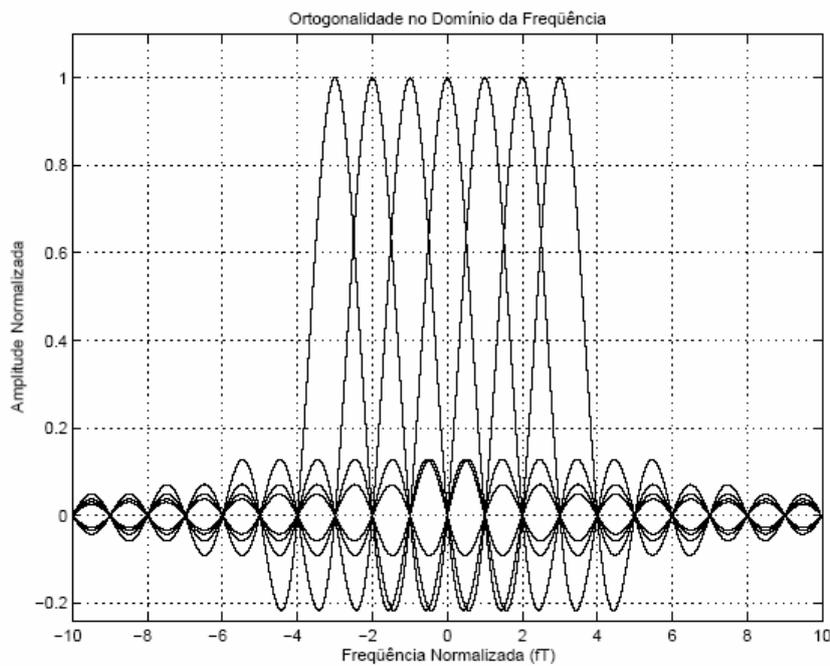


Figura 2.1 – Ortogonalidade no domínio da frequência.

Por outro lado, a ortogonalidade no domínio do tempo decorre do fato de que cada subportadora possui exatamente um número inteiro de ciclos dentro de um intervalo de duração de um símbolo OFDM. Preservada a condição de ortogonalidade observa-se que, no domínio do tempo, duas subportadoras quaisquer do sinal de transmissão OFDM em banda básica diferem exatamente de um número inteiro de ciclos, como pode ser observado na Figura 2.2.

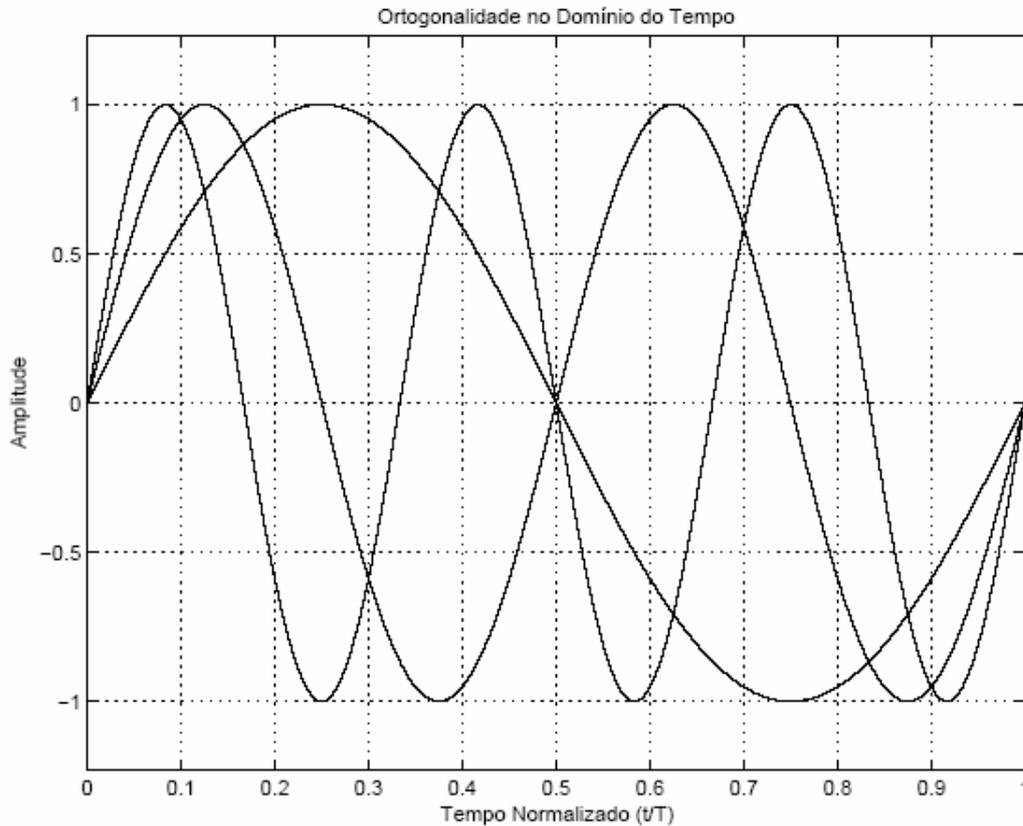


Figura 2.2 – Ortogonalidade no domínio do tempo

2.1

Transmissão e Recepção do sinal OFDM

Os sinais de cada uma das M subportadoras do sistema OFDM podem ser expressos da seguinte forma:

$$s_i(t) = \begin{cases} \Re(d_i e^{j2\pi(f_i + f_c)t}), & t \in [0, T] \\ 0, & t \notin [0, T] \end{cases} \quad i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (2-7)$$

com $f_{i+1} - f_i = \frac{1}{T}$ e os termos complexos d_i representam o mapeamento dos símbolos na constelação do esquema de modulação empregado na subportadora de ordem i . O sinal $s_i(t)$ pode ser expresso como:

$$s_i(t) = \Re(d_i e^{j2\pi(\frac{i}{T})t} e^{j2\pi f_c t}), 0 \leq t \leq T \tag{2-8}$$

Para cada intervalo de duração T , o sinal de transmissão OFDM, representado por $s_{ofdm}(t)$, é formado pela combinação dos sinais modulados nas subportadoras do sistema. Para isto, um conjunto de M sub-símbolos é utilizado para formar cada símbolo OFDM, sendo que cada sub-símbolo modula apenas uma das subportadoras do sistema. Se $g(t)$ denota a expressão do pulso formatador, definido como um pulso retangular unitário com duração T , o sinal $s_{ofdm}(t)$ e sua envoltória complexa $s(t)$ em relação à frequência f_c , são dados por:

$$s_{ofdm}(t) = \Re\left(\sum_{i=0}^{M-1} d_i g(t) e^{j2\pi(\frac{i}{T})t} e^{j2\pi f_c t}\right), 0 \leq t \leq T \tag{2-9}$$

$$s(t) = \sum_{i=0}^{M-1} d_i g(t) e^{j2\pi(\frac{i}{T})t}, 0 \leq t \leq T \tag{2-10}$$

A recepção do sinal OFDM pode ser implementada, baseando-se na ortogonalidade das subportadoras $s_i(t)$, por meio de uma estrutura de correladores ou filtros casados, conforme ilustrado na Figura 2.3:

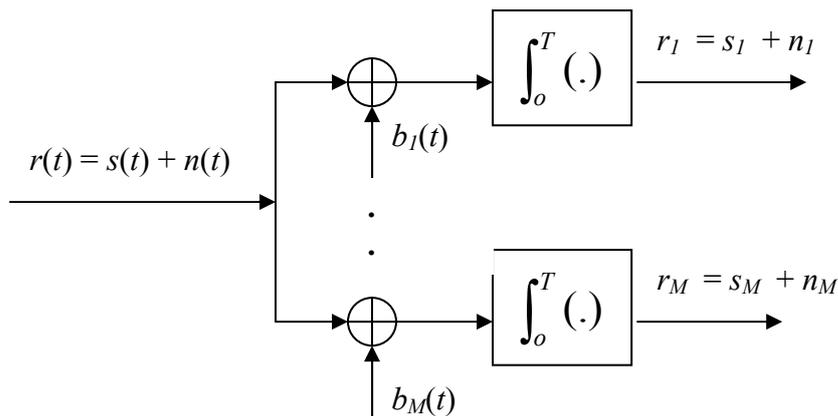


Figura 2.3 – Equivalente banda básica do esquema geral de receptor ótimo utilizando correlator (projeção nas bases)

Para esta estrutura, a envoltória complexa do sinal na recepção representado por $r(t)$, é formada pela soma da envoltória complexa $s(t)$ do sinal de transmissão OFDM com a envoltória complexa do ruído no receptor $n(t)$.

No receptor, o sinal $r(t)$ é correlacionado com funções base do tipo:

$$b_i(t) = e^{-(j2\pi f_i + \theta)t}, 0 \leq t \leq T \quad i = 0, 1, 2, \dots, M-1 \quad (2-11)$$

Notando-se, a partir da Figura 2.3, que r_i representa a saída do i -ésimo correlator tem-se:

$$r_i = \int_0^T e^{-(j2\pi f_i + \theta)t} \left[\sum_{k=0}^{M-1} d_k e^{(j2\pi \frac{k}{T}t)} + n(t) \right] dt = \int_0^T n(t) e^{-(j2\pi f_i + \theta)t} dt + \int_0^T e^{-(j2\pi f_i + \theta)t} \left[\sum_{k=0}^{M-1} d_k e^{(j2\pi \frac{k}{T}t)} \right] dt$$

$$r_i = n_i + e^{-j\theta} \left[\sum_{k=0}^{M-1} d_k \int_0^T e^{(j2\pi \frac{k-i}{T}t)} dt \right] \quad (2-12)$$

Sendo as funções $b_i(t)$ ortogonais:

$$\int_0^T b_i^*(t) b_k(t) dt = \begin{cases} T, & \text{se } i = k \\ 0, & \text{se } i \neq k \end{cases} \quad (2-13)$$

como as parcelas do somatório em (2-13) são nulas pra $i \neq k$ obtém-se:

$$r_i = T e^{-j\theta} d_i + n_i \quad (2-14)$$

Na condição de sincronismo de portadora ($\theta = 0$) e relógio, a saída do i -ésimo correlator corresponde ao símbolo mapeado na constelação do esquema AM-PM da i -ésima subportadora, acrescido de uma parcela devido ao ruído. Esta saída é encaminhada a um receptor de mínima distância.

Como podemos notar pelas Figuras 2.3, uma implementação paralela é totalmente inviável na prática, já que seriam necessários bancos de M osciladores

e filtros analógicos, e o número de subportadoras M que justificam a escolha da técnica OFDM costuma ser da ordem das centenas ou milhares.

Na década de 70, o conceito de modulação multiportadora em que se baseia OFDM já havia sido descoberto e estudado, contudo, não havendo tecnologia naquela época que permitisse a sua implementação, a idéia ficou apenas em caráter teórico. A partir da segunda metade da década de 80, com o avanço na microeletrônica e o surgimento dos DSPs, surgiram então os primeiros protótipos de sistemas com modulação OFDM, utilizando implementações baseadas em FFT (*Fast Fourier Transform*) [7], [8] como será visto na próxima seção.

2.2

Geração e detecção dos sinais por meio de IDFT/DFT

A abordagem matemática do sinal OFDM na transmissão e recepção recai na transformada discreta de Fourier (DFT) [5], [7], [9], [10] devido ao uso de um número finito de M subportadoras.

Considere o equivalente passa-baixa de um símbolo OFDM, dado em (2-10), e repetido aqui por conveniência:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{M-1} d_n e^{j2\pi(\frac{n}{T})t}, 0 \leq t \leq T \quad (2-15)$$

onde M representa o número de subportadoras, T é o intervalo de duração dos símbolos OFDM e os termos d_n denotam os sub-símbolos mapeados nas constelações dos esquemas de cada subportadora. O sinal $s(t)$ amostrado M vezes, nos instantes $t = lT_s$, é dado por:

$$s(lT_s) \equiv s_l = \sum_{n=0}^{M-1} d_n e^{j2\pi l(\frac{n}{N})}, \quad l = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2-16)$$

A aplicação da DFT sobre um vetor qualquer de entrada \mathbf{x} (de M componentes) gera um vetor \mathbf{X} , cujas componentes são dadas por:

$$\mathbf{X}(k) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} \mathbf{x}(n) e^{-j2\pi k \left(\frac{n}{M}\right)}, 0 \leq k \leq M-1 \quad (2-17)$$

O fator multiplicativo $\frac{1}{M}$ foi colocado em (2-17) apenas por conveniência, sem perda de generalidade.

Aplicando-se a transformada inversa de Fourier (IDFT) sobre o vetor \mathbf{X} retorna-se ao vetor \mathbf{x} . As componentes de \mathbf{x} são obtidas das componentes de \mathbf{X} por meio de:

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{k=0}^{M-1} \mathbf{X}(k) e^{-j2\pi k \left(\frac{n}{M}\right)}, 0 \leq n \leq M-1 \quad (2-18)$$

Comparando (2-16) com a definição para a operação de IDFT, dada em (2-18), tem-se:

$$s(lT_s) \equiv s_l = \sum_{n=0}^{M-1} d_n e^{j2\pi n \left(\frac{l}{N}\right)} \equiv IDFT(d_k), l = 0, 1, \dots, M-1 \quad (2-19)$$

Assim a amostra da envoltória complexa do sinal de transmissão OFDM, $s(t)$, pode ser obtida por meio da aplicação do algoritmo IDFT sobre a seqüência d_k ($k = 0, 1, \dots, M-1$), gerando M amostras de $s(t)$, seguidas de um filtro passa-baixa para interpolar as amostras geradas.

Equivalentemente, o sinal de recepção OFDM pode ser obtido amostrando-se o sinal recebido a uma taxa de $\frac{1}{T_s}$ e, aplicando-se o algoritmo de DFT sobre cada bloco de M amostras recebidas. Em condições ideais do canal de propagação essa operação fornece os valores d_k , uma vez que:

$$\hat{d}_k \equiv DFT(s(lT_s)) \equiv \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} s_l e^{j2\pi \left(\frac{kl}{N}\right)} \quad (2-20)$$

$$\hat{d}_k = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} d_n e^{j \frac{2\pi}{M}(n-k)l} = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} d_n \left(\sum_{l=0}^{M-1} \left[e^{j \frac{2\pi}{M}(n-k)l} \right]^l \right) \quad (2-21)$$

$$\hat{d}_k = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} d_n \left[\frac{1 - e^{j \frac{2\pi}{M}(n-k)M}}{1 - e^{j \frac{2\pi}{M}(n-k)}} \right] = d_k \quad (2-22)$$

Assim foi definido o processo de geração e detecção do sinal OFDM que pode ser realizado utilizando processamento digital de sinais, lançando mão das propriedades da Transformada Discreta de Fourier (DFT) que pode ser calculada de forma rápida e eficiente através do algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*).

2.3

Intervalo de guarda – sistemas CP e ZP-OFDM

Uma das principais vantagens do uso da técnica de transmissão OFDM é sua robustez contra o espalhamento de retardo do canal (τ_{rms}) [4]. O aumento do tempo de duração dos símbolos ($T = MT_s$) eleva a tolerância do sistema aos efeitos do espalhamento de retardo, pois há uma redução no valor da relação entre τ_{rms} e T , tornando o sistema mais imune a ISI, ou para sistemas OFDM, IBI (*Inter-Block Interference* – Interferência entre Símbolos OFDM).

Para reduzir os efeitos da IBI sobre o sinal recebido, um intervalo de guarda de duração T_g é introduzido em cada símbolo OFDM. Este intervalo deve ser dimensionado de forma que, na transmissão de um determinado símbolo OFDM, a resposta da convolução entre o sinal transmitido e o canal de propagação não interfira na recepção do símbolo seguinte [9]. Com a inserção do intervalo de guarda, a duração de um símbolo OFDM (T_{ofdm}) passa a ser definida por:

$$T_{ofdm} = T + T_g \quad (2-23)$$

O intervalo de guarda pode ser formado pela extensão cíclica do símbolo ou pelo preenchimento de zeros. No primeiro caso, o intervalo de guarda é acrescentado no início de cada símbolo OFDM, de forma a gerar o sinal de

transmissão CP-OFDM (*Cyclic Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). No segundo caso, a inserção de zeros é feita no final de cada símbolo OFDM, e deste modo obtém-se o sinal de transmissão ZP-OFDM (*Zero Padding – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).

Na transmissão CP-OFDM, a extensão cíclica corresponde à inserção, no início de cada símbolo OFDM, de uma cópia do bloco formado pelas $G = \frac{T_g}{T_s}$ últimas amostras deste símbolo. Note que, para o receptor CP-OFDM convencional, as informações contidas no intervalo de guarda são descartadas no receptor [9], logo somente as M amostras, contidas no intervalo T , são utilizadas para o cálculo da operação de DFT.

Na transmissão ZP-OFDM, o símbolo OFDM correspondente é preenchido com G amostras zero, o que permite eliminar a IBI na recepção. É importante destacar que, nesta dissertação, considera-se o receptor ZP-OFDM onde as informações contidas no intervalo de guarda não são descartadas [1], mas utilizadas no cálculo da operação de DFT.

O número de amostras considerado para dimensionar o tamanho do intervalo de guarda, em cada um dos sistemas, é função do valor de espalhamento de retardo do canal (τ_{rms}), que será definido no Capítulo 3. Os efeitos do canal de propagação, [10], [11], [12], [13], [14] sobre as componentes do sinal de transmissão OFDM é assunto do próximo capítulo. Entretanto, se os valores de τ_{rms} forem menores que a duração T_g , ou alternativamente o número de amostras G for maior que o comprimento em amostras do canal de propagação, definido como L , haverá ausência de interferências entre as subportadoras que compõem cada símbolo OFDM. Deste modo, não haverá ICI (*Inter-Carrier Interference – Interferência entre subportadoras*), e assim não há perda de ortogonalidade entre as subportadoras na recepção.

Na próxima sub-seção o processo de transmissão e recepção do sinal OFDM bem como os seus parâmetros de projeto.

2.4

Processamento do sinal OFDM na transmissão e recepção

Os principais parâmetros para o projeto de um sistema de transmissão OFDM são: a largura de faixa de frequências (B_s), a taxa de transmissão requerida para o sistema (R) e o espalhamento de retardo do canal (τ_{rms}).

O projeto do sistema de transmissão OFDM também deve considerar o espalhamento *Doppler* do canal [11], [12], [13], [14] definido como o deslocamento da frequência da portadora, e a degradação da SNR (**Signal-to-Noise Ratio** – Relação Sinal Ruído) devido ao ruído de fase e aos desvios de frequência [15], [9].

Com base no espalhamento de retardo do canal multipercurso (τ_{rms}), define-se a duração do intervalo de guarda, representado por T_g [9]. De acordo com o tipo de transmissão desejado, CP ou ZP-OFDM, aplica-se a extensão cíclica ou a inserção de zeros, respectivamente, ambas contendo G amostras. Ao adicionar o intervalo de guarda, os símbolos OFDM passam a ter duração T_{ofdm} , dada em (2-23).

Entretanto, deve-se atentar para o fato de que o descarte das amostras contidas no intervalo de guarda, durante o processamento do sinal CP-OFDM na recepção, insere uma degradação na SNR do sistema, dada por [10]:

$$SNR_{perda} = -10 \log\left(1 - \frac{T_g}{T_{ofdm}}\right) \quad (2-24)$$

Para minimizar o valor de SNR_{perda} , a duração de um símbolo OFDM (T_{ofdm}) deve ser muito maior que o valor do intervalo de guarda (T_g). No entanto, um alto valor para T_{ofdm} implica na necessidade de um número maior de subportadoras para o sistema [9], aumentando a sua complexidade.

Determinada a duração de cada símbolo OFDM, o número de subportadoras é obtido pela razão entre a banda disponível para o sistema (B_s) e o espaçamento entre subportadoras ($\Delta f = \frac{1}{T}$). Atendidos os requisitos relativos a τ_{rms} e a B_s taxa de transmissão requerida para o sistema (R), bem como o desempenho em termos

da BER (*Bit Error Rate* - Taxa de Erro de Bit), são obtidos por meio da escolha de um esquema de modulação AM-PM apropriado para ser empregado nas subportadoras.

O processamento dos sinais na transmissão e recepção de um sistema de OFDM [9] é ilustrado na Figura 2.4.

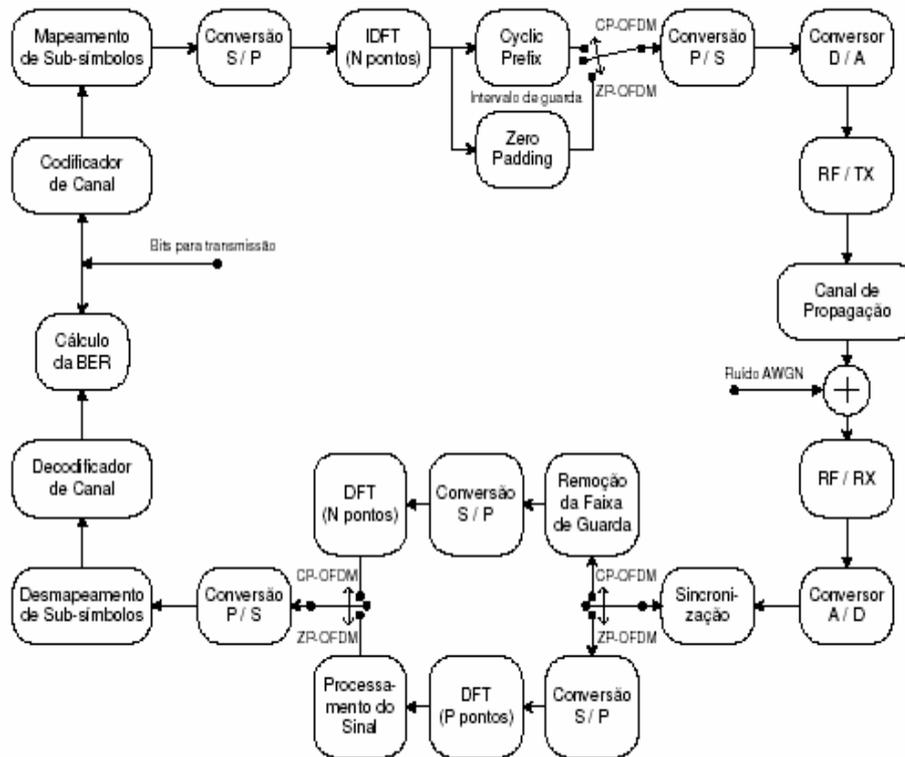


Figura 2.4 – Detalhamento da transmissão e recepção para o sistema OFDM

Após a codificação dos bits de entrada, o processamento do sinal de transmissão OFDM inicia-se com o mapeamento de blocos de M sub-símbolos (de duração T_s) nas constelações associadas aos esquemas de modulação de cada uma das M subportadoras do sistema, gerando a seqüência $\{d_k\}_{k=0}^{M-1}$.

Conforme visto da seção 2.3, a IDFT desta seqüência corresponde às amostras, tomadas a uma taxa de $\frac{1}{T_s}$, do sinal $s(t)$, dado em (2-10) e de duração

$$T = MT_s.$$

As amostras da envoltória complexa do sinal de transmissão OFDM $s(t)$, concatenadas com as amostras inseridas no intervalo de guarda, são aplicadas em um digital/analógico (D/A), de forma a gerar o sinal que irá modular a portadora de alta frequência, cujo espectro está centrado na frequência f_c .

O processamento do sinal de recepção OFDM inicia-se com a demodulação do resultado da convolução entre o sinal de transmissão em alta frequência e a resposta impulsional do canal de propagação. O sinal demodulado é aplicado em um conversor analógico/digital (A/D), de modo a gerar as $P = M + G$ amostras do símbolo OFDM a serem processadas pelo receptor.

Primeiramente, estas amostras são aplicadas em processos de sincronização do intervalo de duração dos blocos e compensação de possíveis erros de sincronização de frequência. Terminada esta etapa, para sistemas de transmissão CP-OFDM convencional, as amostras contidas no intervalo de guarda com extensão cíclica são removidas do conjunto de amostras do sinal corrigido em frequência. No caso do sinal ZP-OFDM, o intervalo de guarda é preservado, o que implica em um redimensionamento da operação DFT no receptor, com objetivo de contemplar a dimensão P do bloco de observações. Maiores detalhes serão vistos no próximo capítulo.

Em ambos os sistemas, o bloco de amostras do sinal corrigido em frequência é submetido à operação de DFT, de forma a obter, na recepção, as estimativas dos sub-símbolos d_k transmitidos. Estas estimativas, por sua vez, são desmapeadas e, após a etapa de decodificação do canal, geram os bits de informação.

2.5

Vantagens e desvantagens do uso da técnica a OFDM

Dentre as vantagens da técnica OFDM, verifica-se que sua aplicação torna o sistema de transmissão digital mais robusto aos efeitos da seletividade em frequência [5], [9], expressos em termos do espalhamento de retardo do canal (τ_{rms}). Isto decorre do aumento no tempo de duração dos símbolos transmitidos em cada subportadora ($T = MT_s$).

Uma outra vantagem é a capacidade de eliminar a IBI (interferência entre símbolos OFDM), e em muitos casos a ISI (interferência entre subsímbolos), ao se utilizar o intervalo de guarda em cada símbolo OFDM transmitido.

Por empregar a transmissão paralela de dados em subportadoras de largura de faixa estreita, a técnica OFDM permite aproximar as respostas em frequência das parcelas do canal ao caso ideal de planura na resposta em amplitude e linearidade na resposta em fase. O conjunto resultante de canais paralelos estreitos no domínio da frequência caracteriza um cenário de desvanecimento plano, o que vem a simplificar as necessidades de equalização.

Os sistemas de transmissão OFDM apresentam maior robustez ao ruído impulsivo, devido ao aumento no tempo de duração dos símbolos. Caso hajam erros provocados por ruído de rajada, os símbolos podem ser recuperados na recepção por meio de esquemas apropriados de codificação, como o uso de técnicas de *interleaving* [16].

Dentre as desvantagens da técnica OFDM, verifica-se a incompatibilidade do uso do esquema convencional de transmissão em canais seletivos em frequência com desvanecimento, uma vez que a informação transmitida em uma subportadora pode ser perdida, na presença de um desvanecimento profundo, caso do sistema CP-OFDM [9]. Por conta disto, métodos de codificação são combinados com técnicas de *interleaving* [16], para combater os efeitos do desvanecimento.

No caso do *interleaving* no domínio do tempo, os bits são enviados em instantes distintos, com intervalos maiores que o tempo de coerência do canal, que será introduzido no Capítulo 3. Este método é aplicável em ambientes caracterizados por apresentar desvanecimento rápido. Entretanto, isto implica em retardo na transmissão de dados o que muitas vezes é intolerável.

O *interleaving* no domínio da frequência é recomendado para ambientes com alto grau de espalhamento. Os bits codificados são enviados em bandas de frequências distintas, separadas pela largura de faixa de coerência do canal.

Outra desvantagem da técnica OFDM é o problema de picos de potência [17]. A envoltória complexa do sinal de transmissão OFDM pode apresentar altas excursões de amplitude. O sinal OFDM em banda básica é formado pela soma de M sinais complexos modulados em diferentes frequências. Em alguns casos, estes

sinais poderão se somar ou anular em fase, resultando em um alto valor para a PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) do sistema. Neste cenário, o amplificador de potência do transmissor irá introduzir distorções não-lineares que por sua vez irão destruir a ortogonalidade entre subportadoras.

A técnica OFDM também é vulnerável a desvios de frequência, como também a problemas de sincronização na frequência [15]. Os desvios de frequência provocam a perda da ortogonalidade entre as subportadoras do sistema. Já os erros de sincronização provocam um deslocamento de fase nos símbolos estimados. A sensibilidade de sistemas OFDM com relação aos desvios de frequência das subportadoras e ruído de fase são analisados em [15].

Em particular, o OFDM é mais sensível a estes tipos de degradação do que os sistemas de transmissão de única portadora, sendo que a sensibilidade cresce com o tamanho da constelação empregada, devido ao fato dos símbolos OFDM serem de maior duração ($T = MT_s$), além da presença de interferências quando há perda de ortogonalidade entre as subportadoras.

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos da técnica de transmissão OFDM onde foram abordados os detalhes do processo de transmissão de sinais CP-OFDM e ZP-OFDM, bem como as vantagens e desvantagens do uso da técnica OFDM. No próximo capítulo são apresentados os modelos discretos para a transmissão de sinais CP-OFDM e ZP-OFDM, juntamente com a definição dos tipos de canal de propagação utilizados nesta dissertação.