

## ESTUDO DA TÉCNICA DE TRANSMISSÃO OFDM

**Fabiano de Toledo Penteado<sup>1</sup>, Linécio dos Santos Paula<sup>2</sup>**

1 – R. Cel. Donato Mascaranhas, 372 Monte Castelo – 12215-060 – São José dos Campos – SP  
Brasil – [fabiano@eqe.com.br](mailto:fabiano@eqe.com.br)

2 – Av. Shishima Hifumi, 2911 Urbanova – Campus Univap, Incubadora Tecnológica – 12244-000  
– São José dos Campos – SP – Brasil - [linelcio@eqe.com.br](mailto:linelcio@eqe.com.br)

**Palavras-chave:** OFDM, Transmissão, Ortogonal, Wireless, FFT.

**Área do Conhecimento:** III – Engenharias.

A técnica de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é muito recente sendo uma evolução da técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*). Essa técnica trabalha com sobreposição espectral de várias subportadoras. Nas técnicas mais antigas o envio dos dados é feito serialmente utilizando uma única portadora sendo cada portadora um canal de comunicação. A técnica OFDM se utiliza de um conceito de transmissão paralela dos dados conhecida como MCM (Multi-Carrier Modulation), onde os dados são divididos em pequenos pacotes e enviados em  $n$  subportadoras com a utilização de modulações individuais. Essa divisão dos dados em pequenos pacotes proporciona uma diminuição da dispersão temporal causada por multipercurso no canal. Os primeiros sistemas a usar a MCM visaram aplicações militares entre 1950 e 1960 (ref. 18). A técnica OFDM foi patenteada nos EUA em 1970. É considerada uma técnica SS pelo fato da informação ser espalhada em várias portadoras. Essa técnica dispensa o uso de filtros separadores de frequências como os utilizados em sistemas FDMA, em modems multitonos. Ao invés disso, as formas de onda temporais componentes de um símbolo OFDM são escolhidas de tal forma que seus espectros apresentem ortogonalidade, o que implica em interferência nula entre os mesmos. Isto permite que o espectro disponível seja otimizado. Na figura 1 temos a ilustração dos espectros superpostos de forma que a interferência entre eles, nos pontos onde se situam as portadoras é nulo. Tais formas de onda são geradas através de

transformadas rápidas de Fourier (FFT), tanto no transmissor quanto no receptor. Em relação à técnica FDM, consegue-se uma economia espectral da ordem de 50% (figura 2).

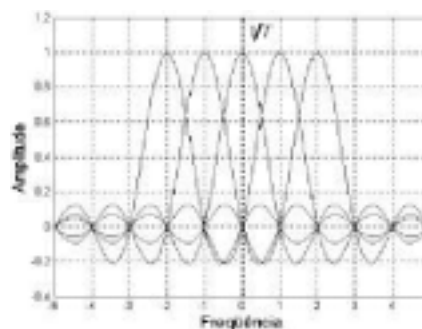


Fig. 1 - Espaço entre as subportadoras.

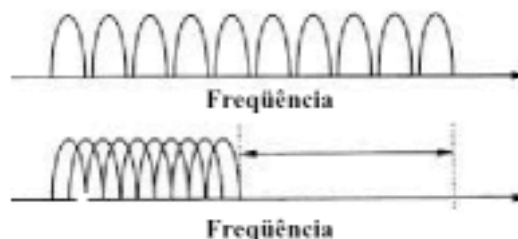


Fig. 2 - Espectros FDM convencional e OFDM.

O termo Multiplexing na técnica OFDM decorre da fragmentação de um pacote de dados e sua distribuição nas diversas subportadoras. Durante muito tempo a aplicação prática desse conceito se mostrava limitada devido à impossibilidade de implementação confiável da FFT, devido à instabilidade de osciladores nos transmissores e nos receptores, linearidade exigida nos amplificadores, etc. Após muitos anos de intensa pesquisa na década de 80, com a evolução de componentes dedicados ao processamento de sinais, muitos dos problemas de implementação foram resolvidos e hoje a MCM já faz parte de muitos padrões de comunicação. E a tendência de sua utilização é aumentar.

**Transmissão e Recepção do sinal OFDM.**  
Os sinais de  $N_s$  subportadoras (por exemplo moduladas em QAM) espaçadas de  $\Delta f (=1/T)$  e iniciando em  $t = t_s$  podem ser expressos por

$$s_j(t) = \text{Re} \left\{ d_j \cdot \exp \left[ j2\pi \cdot \left( \frac{t}{T} \right) \cdot (t - t_s) \right] \right\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s_j(t) = 0, \quad t_s + T < t < t_s$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, (N_s - 1)$$

onde  $T$  é a duração do símbolo e  $d_j$  é o símbolo complexo QAM transmitido pela subportadora de ordem  $j$ . Os símbolos QAM  $d_j$  são comumente denominados subsímbolos de um símbolo OFDM. O sinal OFDM equivalente em banda base é o somatório de  $N_s$  subportadoras deste tipo.

Considerando-se um intervalo  $T$  para o símbolo OFDM iniciando em  $t = t_s$ , esse sinal pode ser expresso por:

$$s_j(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{j=0}^{N_s-1} d_j \cdot \exp \left[ j2\pi \cdot \left( \frac{t}{T} \right) \cdot (t - t_s) \right] \right\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s_j(t) = 0, \quad t_s + T < t < t_s$$

A técnica de transmissão do sinal analógico se dá conforme mostra a figura 3. A recuperação do sinal OFDM é feita através da passagem do mesmo por um banco de  $N_s$  correlatores, seguidos de comparações com limiares de decisão adequados (figura 4).

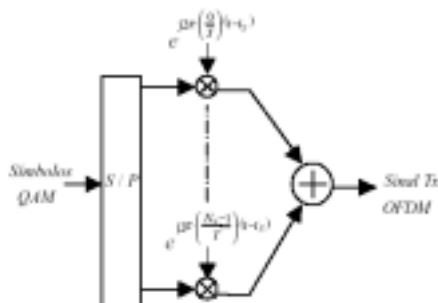


Fig. 3 - Transmissão analógica do sinal

Admitindo-se que a entrada do receptor é o sinal OFDM da Eq. (3), na ausência de ruído

$$r_j = \int_{t_s}^{t_s+T} \exp \left[ -j2\pi \cdot \left( \frac{t}{T} \right) \cdot (t - t_s) \right] \cdot s_j(t) dt$$

$$r_j = \sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \cdot \int_{t_s}^{t_s+T} \exp \left[ -j2\pi \cdot \left( \frac{t}{T} \right) \cdot (t - t_s) \right] dt = d_j \cdot T \quad (3)$$

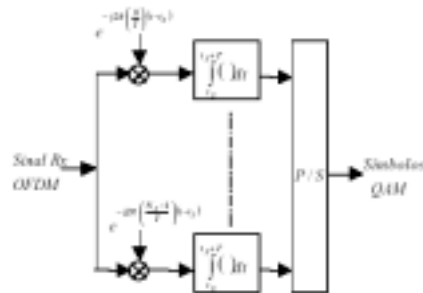


Fig. 4 - Recepção analógica do sinal

a saída do  $j$ -ésimo correlator será

Ao se observar a Eq. 3 nota-se que o sinal complexo OFDM em banda base equivale a uma IDFT (Transformada de Fourier Discreta Inversa) da sequência discreta formada pelos  $N_s$  subsímbolos QAM que compõem cada símbolo OFDM. Com isso o uso de um banco de osciladores para a modulação e demodulação é eliminado, e em no lugar utiliza-se algoritmos de Transformada Rápida Inversa de Fourier - IFFT (modulação) e Transformada Rápida de Fourier - FFT (demodulação).

#### Processamento digital do sinal

A geração do sinal OFDM inicia quando o sinal chega a um conversor Serial-Paralelo (S/P), criando conjuntos de  $N_s$  palavras de  $k$  bits que logo em seguida são armazenadas em um buffer para serem mapeadas em  $N_s$  símbolos complexos  $d_i$ , que determinarão os pontos na constelação de cada subportadora. Em seguida é efetuada uma IFFT a este bloco de subsímbolos complexos obtendo como resultado  $N_s$  amostras  $s(i)$  correspondentes a um símbolo OFDM. (figura 5). Pode acontecer que  $N_s$  não seja uma potência de 2 e para corrigir isso é comum acrescentar subsímbolos complexos  $d_i$  de valor nulo. O objetivo disso é poder utilizar um algoritmo de IFFT mais simples baseado numa sequência com comprimento na base de 2. Para uma melhor utilização da

faixa de transmissão disponível os símbolos nulos são colocados na parte mais externa do espectro do sinal. A recepção do sinal OFDM é feito de forma inversa a de transmissão (figura 6).

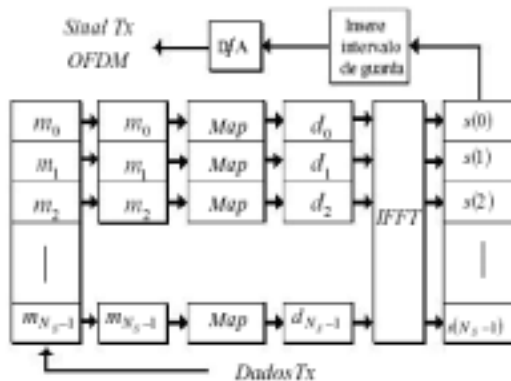


Fig. 5 - Transmissão digital do sinal.

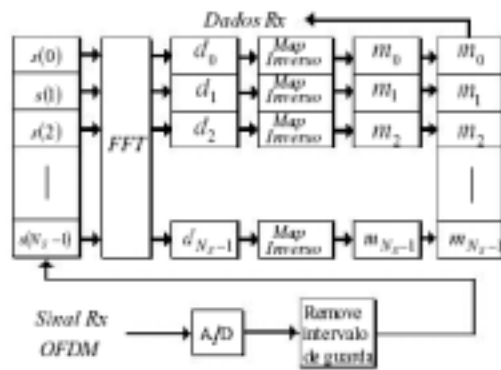


Fig. 6 - Recepção do sinal OFDM.

A transmissão do sinal OFDM pode ser feita com modulação adicional ou sem modulação adicional. Para se utilizar uma modulação adicional deve-se empregar quadratura (figura 7). Essa configuração é utilizada em sistema wireless.

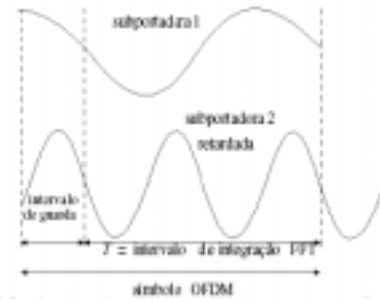


Fig. 10 - Intervalo de guarda com extensão cíclica.

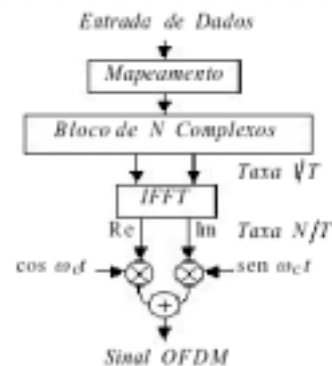


Fig. 7 - Transmissão com modulação adicional.

Em alguns sistemas wireline onde não se deseja uma modulação adicional, a transmissão direta é possível desde que se tenha na saída da IFFT valores reais e não complexos. A solução desse problema consiste em gerar uma nova sequência de  $2N$  elementos a partir da sequência original de  $N$  elementos, obtendo-se a IFFT com sequência real. O novo bloco de dados complexos  $d_i$  gerado a partir do bloco original de dados  $d_i$  obedece às equações (4). A figura 8 ilustra o esquema da transmissão sem a modulação adicional.

$$d'_i = \begin{cases} d_i, & i = 1, \dots, N-1 \\ d_{2N-i}^*, & i = N+1, \dots, 2N-1 \end{cases}$$

$$d'_0 = \text{Re}\{d_0\}$$

$$d'_N = \text{Im}\{d_0\}$$
(4)

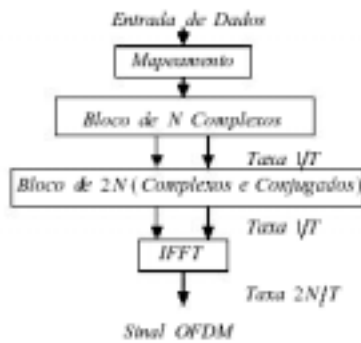


Fig. 8 - Transmissão sem modulação adicional

**Intervalo de guarda** Para eliminar a interferência entre símbolos (ISI, Intersymbol Interference) é introduzido um intervalo denominado “intervalo de guarda” em cada símbolo OFDM. O dimensionamento desse intervalo tem que ser de tal forma que as componentes multipercursos de um símbolo não venham a interferir na recepção do próximo símbolo. Esse tempo deve ser bem maior que os atrasos esperados no canal.

Um símbolo OFDM (de duração  $T_s$ ) será constituído, então, pelo símbolo útil OFDM (de duração  $T$ ) mais o intervalo de guarda (de duração  $T_g$ ). Uma forma de implementar o tempo de guarda é impor intervalos de ausência de sinal entre os símbolos. Nesse caso, entretanto, temos a origem do problema de Interferência entre Subportadoras (ICI, Interchannel Interference), degradando a ortogonalidade entre as subportadoras. A figura 9 ilustra a interferência ICI. Quando o receptor OFDM tenta demodular a subportadora 1 ele encontra alguma interferência da subportadora 2. Da mesma forma, quando a subportadora 2 for demodulada poderá encontrar interferência da subportadora 1. A causa dessa interferência é a diferença do número de ciclos entre as duas subportadoras, dentro do intervalo de cálculo da FFT ( $T$ ), não corresponder a um número inteiro. Para eliminar essa interferência

estende-se ciclicamente o símbolo OFDM no intervalo de guarda. (figura 10). Isto garante que réplicas atrasadas do símbolo OFDM sempre terão um número inteiro de ciclos dentro do intervalo de análise da FFT (desde que o atraso seja muito menor que o tempo de guarda). Assim sendo, os sinais multipercusos com atrasos pequenos (comparados com o tempo de guarda) não causarão ICI. Outro fator de relevância é o tipo de modulação utilizada em cada subportadora. Modulações de ordem elevada (como a QAM-64, por exemplo) são mais sensíveis à ICI e à ISI do que as modulações de ordem menor (como a QPSK), o que exigirá a utilização de códigos de correção de erro com maior capacidade de correção.

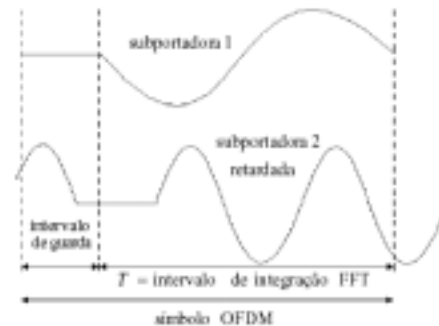


Fig. 9 - Intervalo de guarda sem extensão cíclica.

**Determinação dos Parâmetros OFDM** Para se equacionar uma comunicação em OFDM necessita-se de três requisitos principais: a largura de faixa do sinal (BW), a taxa de transmissão requerida (R) e o espalhamento de retardo do canal ( $\tau_{rms}$ ). Quando se faz um projeto completo de um modem OFDM leva-se também em conta o espalhamento Doppler do canal ( $v_{rms}$ ), a degradação na S/N devido ao ruído de fase ( $D_{fase}$ ) e a degradação na S/N devido ao desvio de frequência ( $D_{freq}$ ). O efeito causado pelo espalhamento doppler será contrário do efeito produzido pelo espalhamento de retardo, no sentido de que pode ser conseguida uma boa tolerância em relação a este último diminuindo-se o espaçamento entre subportadoras, enquanto uma maior robustez poderá ser conseguida aumentando-se este espaçamento. A definição apropriada de  $T_g$  dependerá do tipo de codificação e modulação utilizada mas,

para regra geral, pode-se utilizar um  $T_g$  duas a quatro vezes o valor de  $\tau_{rms}$ . Após a determinação de  $T_g$  é obtido o valor de  $T_s$  (duração do símbolo OFDM) com a soma de  $T_g$  com  $T$ . Na equação 5 temos a perda na relação S/N devido à introdução do tempo de guarda. Por esse motivo, o tempo  $T_s$  deve ser muito maior que  $T_g$ .

$$(S/N)_{PERDA} = -10 \log \left( 1 - \frac{T_g}{T_s} \right) \quad (5)$$

Uma boa escolha para o valor de  $T_s$  é no mínimo cinco vezes maior que  $T_g$ , o que nos dará uma perda em S/N de aproximadamente 1db. Mas o fato de se aumentar de mais  $T_s$  acarreta um aumento de  $N_s$  com uma diminuição de  $\Delta f$ , implicando também em maior complexidade de implementação, maior sensibilidade a ruídos de fase, deslocamento de frequência, aumento na relação entre a potência de pico e a potência média do sinal. Determinados  $T_s$  e  $T_g$ ,  $N_s$  aparece através da divisão de BW por  $\Delta f$ . Atendidos os parâmetros de BW e  $\tau_{rms}$ , observa-se o requisito relativo a R através da escolha da modulação utilizada nas subportadoras. O número de bits que cada subsímbolo empregado representará é obtido pela relação  $R(T_s/N_s)$ .

Fontes de Degradação de Desempenho da Técnica OFDM São três os problemas que podem causar o desvio de ortogonalidade entre as subportadoras no receptor OFDM:

- ✓ primeiro deles seria o de ruído de fase, causado pelo jitter em osciladores, produzindo uma portadora modulada em fase por um sinal aleatório. Isso cria ICI na recepção.
- ✓ segundo caso se deve ao fato de os osciladores sempre trabalharem com uma margem de erro, esse erro pode ocasionar uma diferença significativa entre as frequências dos osciladores transmissores em relação aos osciladores receptores, o que acaba também gerando ICI na recepção.
- ✓ A terceira fonte de problema, mais rara de ocorrer, é o erro de temporização do símbolo, o que é resolvido com a utilização do intervalo de guarda.

A sensibilidade ao ruído de fase e ao desvio de frequência são freqüentemente mencionados como desvantagens do sistema

OFDM em relação ao sistema de portadora única, porém algo que se tem que notar é que no sistema OFDM essas degradações podem ser mantidas em níveis admissíveis coisa que não se consegue fazer com os sistemas de única portadora.

**Ruídos de fase:** O ruído de fase pode ser originado pelo fato do oscilador jitter de fase, o que acaba modulando em fase a portadora gerada. Esse ruído de fase será comum para todas as subportadoras. Essa rotação na fase das subportadoras poderá ser eliminado medindo-se a variação na fase de uma subportadora piloto e subtraindo esta rotação de todas as subportadoras. A densidade espectral de potência do ruído de fase de um oscilador é comumente modelada por um espectro de Lorentz, que equivale ao quadrado do módulo da função de transferência de Butterworth de 1º ordem. O espectro unilateral da saída do oscilador neste caso pode ser descrito como

$$S_s = \frac{2/\pi B_o}{1 + (f - f_c)^2/B_o^2}, \quad f \geq f_c \quad (6)$$

onde  $B_o$  é a semi faixa de 3dB do sinal do oscilador.

A figura 11 ilustra um exemplo de espectro de Lorentz de ruído de fase, com origem na frequência central e uma semi faixa de 3dB de 1Hz, típico de osciladores na faixa de 5GHz. Para um canal Gaussiano, a Eq.7 fornece a degradação na S/N devido à ICI causada pelo ruído de fase

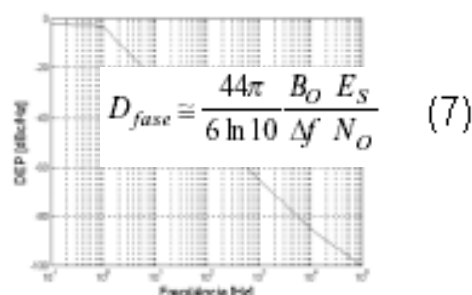


Fig. 11 - Densidade espectral de potência do sinal de um oscilador com ruído de fase

Como pode ser observado na Eq.(7), essa degradação será proporcional à razão entre  $B_o$  e  $\Delta f$ . O maior problema que pode ser produzido pelo ruído de fase em sistemas OFDM é a ICI introduzida (figura 12).

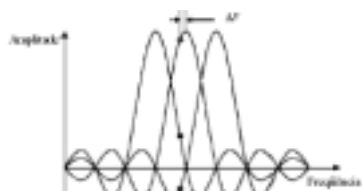


Fig. 42 - Recepção de sinal OFDM com ICI

**Desvio de frequência:** O desvio de frequência acarreta a perda de ortogonalidade entre as subportadoras OFDM e consequentemente aparece a ICI. Pode-se mostrar que para um canal Gaussiano a degradação na S/N causada por um desvio de frequência que seja pequeno em relação a  $\Delta f$  é expressa por

$$D_{freq} \cong \frac{10}{3 \ln 10} \left( \frac{\pi \delta f}{\Delta f} \right)^2 \frac{E_S}{N_o} \quad (8)$$

onde  $\delta f$  é o desvio de frequência. Conforme sugerido pela Eq. 8, essa degradação será proporcional ao quadrado da relação entre  $\delta f$  e  $\Delta f$ .

**Erro de temporização de símbolo:** A técnica OFDM tem muita robustez em se tratando de deslocamento do instante de recepção do símbolo, uma vez que esse instante pode variar por um valor igual ao intervalo de guarda sem causar ISI ou ICI. O erro de temporização na recepção do símbolo OFDM ( $\tau_{erro}$ ) implicará apenas em um deslocamento de fase  $\phi_i$ , que será proporcional à frequência de cada subportadora de acordo com a equação

$$\phi_i = 2\pi f_i \tau_{erro} \quad (9)$$

Este deslocamento de fase, acrescentado aos poucos desvios de fase produzidos pelo canal também podem ser estimados e reduzidos com a utilização de tons pilotos.

#### Referência Bibliográficas:

- 1- CHANG, R.W.e GIBBY, R.A. – A Theoretical Study of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme. *IEEE Trans. On. Communications*, **16** (4): 529-540, Aug., 1968.
- 2- U.S. PATENT 3,488,445 – Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Filed Nov. 14, 1966, issued Jan. 6, 1970.
- 3- CIMINI, L.J. – Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. *IEEE Trans. On. Communications*. **33**(7):665-675, Jul., 1985.
- 4- CARLSON, A. B – *Communication Systems*. 3<sup>rd</sup>. Ed., New York, McGraw-Hill, 1986.
- 5- PROAKIS, J. G. – *Digital Communications*. 3<sup>rd</sup>. Ed., Prentice-Hall, 1995.
- 6- PRASAD, R., e VAN NEE, R – *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Artech House, 2000.
- 7- ERNESTO LEITE PINTO e CLAUDI PENEDO DE ALBUQUERQUE – A Técnica de Transmissão OFDM, Revista Científica Periódica – Telecomunicações, Vol. 5, N° 01 Jun. 2002.

Apoio: EQE – Tecnologia.