

Eduardo Luis Arce Picasso

**Distorção Espectral de sinais
OFDM devida à não-linearidade do
canal de Transmissão**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
ELÉTRICA**

Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica

Rio de Janeiro
Dezembro de 2006

Eduardo Luis Arce Picasso

**Distorção Espectral de sinais OFDM devida à
não-linearidade do canal de Transmissão**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro
Dezembro de 2006



Eduardo Luis Arce Picasso

Distorção Espectral de sinais OFDM devida à não-linearidade do canal de Transmissão

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Mauro Pedro Fortes

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Ernesto Leite Pinto

IME

Prof. Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes

IME

Prof. Raimundo Sampaio Neto

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Weiler Alves Finamore

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 4 de Dezembro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Eduardo Luis Arce Picasso

Ficha Catalográfica

Arce Picasso, Eduardo Luis

Distorção Espectral de sinais OFDM devida à não-linearidade do canal de Transmissão/ Eduardo Luis Arce Picasso; orientador: José Mauro Pedro Fortes. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

95 f: il. ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Não Linearidade. 3. Série de Volterra. 4. OFDM. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Ao meu pai Alejandro e a minha mãe Carmen.

Agradecimentos

Ao Prof. José Mauro, que foi, sem dúvida alguma, peça importante na elaboração deste trabalho, principalmente pelo tempo a mim dispensado, pelo enorme interesse demonstrado por esta dissertação e acima de tudo por seus momentos de brilhante intuição, que certamente foram fundamentais para o desenvolvimento de determinados pontos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio, em especial a aqueles do CETUC, pela simpatia e disponibilidade para toda e qualquer ajuda.

Aos colegas do CETUC/PUC-Rio, em especial a José Antonio Seibnitz, atual aluno de doutorado, pela ajuda e conhecimento que foi muito importante no decorrer das implementações desta dissertação.

Ao meu pai Alejandro e a minha mãe Carmen, por terem me apoiado e incentivado sempre a fazer este curso. Vocês são muito importantes nesta conquista. Foi o amor de vocês que tornou fácil a superação de momentos que poderiam ter sido difíceis.

Por último, gostaria de agradecer os financiamentos concedidos pela CAPES e pela PUC-RJ, que facilitaram a realização tanto deste trabalho como do curso de mestrado em geral.

Resumo

Arce Picasso, Eduardo Luis; Fortes, José Mauro Pedro. **Distorção Espectral de sinais OFDM devida à não-linearidade do canal de Transmissão.** Rio de Janeiro, 2006. 95p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação apresenta um desenvolvimento analítico que permite caracterizar as distorções produzidas na densidade espectral de potência de sinais OFDM devido à sua passagem através de sistemas não lineares. O processo estocástico que caracteriza a envoltória complexa de um sinal OFDM foi modelado como um processo estocástico gaussiano complexo, próprio. A não linearidade do canal de transmissão foi caracterizada pela expansão, em série de potências, de suas características de conversão AM/AM e AM/PM. Utilizando-se o Teorema dos Momentos para processos gaussianos complexos chega-se a expressões analíticas fechadas para a função autocorrelação e para a densidade espectral de potência do sinal produzido na saída da não-linearidade. As expressões obtidas são aplicadas a situações particulares nas quais 1, 2 e 3 sinais OFDM compartilham a não-linearidade permitindo quantificar, nestas situações específicas, as distorções correspondentes aos produtos de intermodulação de diferentes ordens e o efeito, nestas distorções, de variações no valor do *back-off* de entrada do sinal.

Palavras-chave

Não-linearidade, Série de Volterra, OFDM

Abstract

Arce Picasso, Eduardo Luis; Fortes, José Mauro Pedro. **Spectral Distortion of OFDM signals due to channel non-linearity.** Rio de Janeiro, 2006. 95p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This MSc dissertation presents a theoretical analysis that evaluates the distortion experienced by the power spectrum density of OFDM signals when they are transmitted through a non-linear channel. The complex envelope of the OFDM signals are modeled as a complex proper gaussian random process and the channel non-linearity is characterized through a power series expansion of its AM/AM and AM/PM distortion curves. Using the Moment Theorem for complex gaussian random processes, closed form expressions for the autocorrelation function and the power spectrum density of the signal produced at the non-linear channel output are obtained. These expressions are applied to specific situations in which 1, 2 and 3 OFDM signals share the non-linear channel, producing results that quantify the distortions corresponding to intermodulation products of different orders and the effect of varying the signal input back-off value.

Keywords

Non-linearity, Volterra Series, OFDM

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Visão Geral	12
1.2	Descrição do Problema	14
2	Modelagem Matemática	16
2.1	Caracterização de portadoras Digitais	16
2.2	Caracterização do sinal OFDM	21
2.3	Caracterização da não linearidade	36
2.4	Caracterização do sinal na saída da Não Linearidade	38
3	Considerações de vários sinais OFDM	46
4	Resultados Numéricos	50
4.1	Pulsos	52
4.2	Efeito da não linearidade sobre um único sinal OFDM	63
4.3	Efeito da não linearidade sobre dois sinais OFDM	70
4.4	Efeito da não linearidade sobre três sinais OFDM	77
5	Conclusões	86
	Referências Bibliográficas	88
A	Resultados Relacionados ao Teorema dos Momentos para Processos Gaussianos Complexos	90
A.1	Determinação de $\xi_i(t)$	91
A.2	Determinação de $\alpha_{ij}(t_1, t_2)$	91
A.3	Expressão alternativa para $\beta_{ij\ell}$	93
A.4	Expressão alternativa para $\mathbf{g}^T \mathbf{A}_\ell \mathbf{g}^*$	94

Lista de figuras

1.1	Portadoras no domínio do tempo	13
2.1	Constelação de sinais para a modulação M-PSK	19
2.2	Constelação de sinais para a modulação M-QAM	20
2.3	Função Autocorrelação normalizada de $\tilde{m}_k(t)$ para $N = 16$	26
2.4	Função Autocorrelação normalizada de $\tilde{m}_k(t)$ para $N = 64$	26
2.5	Função Autocorrelação de $\tilde{m}_k(t)$ e $p(\tau)*p(-\tau)$, para sinais OFDM com pulso retangular e 16 portadoras.	30
2.6	Função Autocorrelação de $\tilde{m}(t)$ para $N = 16$	31
2.7	Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}_k(t)$	34
2.8	Diagrama de blocos do sinal passando por um dispositivo não-linear	37
2.9	Diagrama de blocos de um dispositivo não-linear com memória	37
2.10	Diagrama de blocos de um dispositivo não-linear sem memória	38
3.1	L sinais OFDM	46
4.1	Conversão AM/AM: curva do fabricante (linha contínua) e aproximação polinomial com $N = 3$ (linha tracejada).	51
4.2	Conversão AM/PM: curva do fabricante (linha contínua) e aproximação polinomial com $N = 3$ (linha tracejada).	51
4.3	Pulso retangular normalizado	52
4.4	Módulo ao quadrado da transformada de Fourier do pulso retangular	53
4.5	Função Autocorrelação de $\tilde{m}_k(t)$ e $p(\tau)*p(-\tau)$, para sinais OFDM com pulso retangular e 64 portadoras.	54
4.6	Função Autocorrelação de $\tilde{m}(t)$, para sinais OFDM com pulso retangular e 64 portadoras	54
4.7	Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$ para sinais OFDM com pulso retangular e 64 portadoras.	55
4.8	Pulso Nyquist normalizado	56
4.9	Módulo ao quadrado da transformada de Fourier do pulso Nyquist	57
4.10	Função Autocorrelação de $\tilde{m}_k(t)$ e $p(\tau)*p(-\tau)$, para sinais OFDM com pulso Nyquist, $(\alpha = 0, 4)$ e 64 portadoras.	58
4.11	Função Autocorrelação de $\tilde{m}(t)$ para sinais OFDM com pulso Nyquist, $(\alpha = 0, 4)$ e 64 portadoras.	58
4.12	Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$, para sinais OFDM com pulso Nyquist, $(\alpha = 0, 4)$ e 64 portadoras.	59
4.13	Pulso metade cosseno normalizado	60
4.14	Módulo ao quadrado da transformada de Fourier do pulso metade cosseno.	61
4.15	Função Autocorrelação de $\tilde{m}_k(t)$ e $p(\tau)*p(-\tau)$, para sinais OFDM com pulso metade cosseno e 64 portadoras.	61
4.16	Função Autocorrelação de $\tilde{m}(t)$, para sinais OFDM com pulso metade cosseno e 64 portadoras.	62
4.17	Densidade Espectral de Potência do sinal $\tilde{m}(t)$, para sinais OFDM com pulso metade cosseno e 64 portadoras.	62

4.18	Função Autocorrelação de $\tilde{y}(t)$ para o pulso retangular e $b_{in} = 0$ dB	64
4.19	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	64
4.20	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	65
4.21	Função Autocorrelação de $\tilde{y}(t)$ para o pulso Nyquist com $\alpha = 0,4$ e $b_{in} = 0$ dB	66
4.22	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	66
4.23	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	67
4.24	Função Autocorrelação de $\tilde{y}(t)$ para o pulso metade cosseno e $b_{in} = 0$ dB	68
4.25	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	69
4.26	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	69
4.27	Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso retangular e $b_{in} = 0$ dB	71
4.28	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	72
4.29	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	72
4.30	Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso Nyquist, $\alpha = 0,4$ e $b_{in} = 0$ dB	73
4.31	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	74
4.32	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	75
4.33	Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso metade cosseno e $b_{in} = 0$ dB	76
4.34	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	76
4.35	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	77
4.36	Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso retangular e $b_{in} = 0$ dB	79
4.37	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	79
4.38	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	80
4.39	Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso Nyquist, $\alpha = 0,4$ e $b_{in} = 0$ dB	81
4.40	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	82
4.41	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	82
4.42	Função Autocorrelação de $\tilde{r}(t)$ para o pulso metade cosseno e $b_{in} = 0$ dB	83

4.43	Densidades espectrais de potência normalizadas correspondentes ao sinal desejado e à intermodulação produzida.	84
4.44	Parcelas da densidade espectral de potência de $\tilde{y}(t)$ correspondentes aos produtos de intermodulação.	85
A.1	Diagrama de blocos de um dispositivo não-linear com memória	91