

Efeitos da amplificação não-linear de potência sobre o desempenho de um enlace de TV digital usando o padrão DVB-T

Vagner Vale do Nascimento e José Ewerton P. de Farias

Resumo—Uma investigação sobre o desempenho de um enlace de TV digital usando o padrão DVB-T é apresentada. Os efeitos da amplificação não-linear de potência são considerados. Resultados de simulações para taxa de erro de bit, diagramas de constelação e densidades espectrais de potência para o sinal recebido são incluídos.

Palavras-Chave—Radiodifusão digital, TV Digital, DVB-T, amplificação não-linear de potência, COFDM.

Abstract—An investigation on the performance of a DVB-T digital TV link is presented. The nonlinear power amplification effects are examined. Simulation results for bit error rate, signal constellations, and power spectral densities for the received signal are included.

Keywords—Digital broadcasting, Digital TV, DVB-T, nonlinear power amplification, COFDM.

I. INTRODUÇÃO

A radiodifusão de televisão através de redes terrestres está entrando em uma nova era. Sinais de vídeo, áudio e dados serão transmitidos usando técnicas de modulação digital. O sistema DVB-T regulamentado pelo padrão [1] ETSI EN 300 744 v1.4.1 (2001) é um sistema de radiodifusão de televisão digital em redes terrestres que envolve codificação e multiplexação MPEG-2, moduladores específicos, transmissores de RF e receptores/decodificadores integrados (IRDs). A qualidade de recepção dos serviços (vídeo, áudio e dados) depende altamente da degradação introduzida por erros residuais de transmissão.

A transmissão digital do sistema DVB-T é baseada em um princípio de modulação com multi-portadoras chamado COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). As principais características que fazem com que a técnica COFDM tenha um bom desempenho são: a ortogonalidade entre as subportadoras que integram o sinal, a adição de um intervalo de guarda a cada período de símbolo e o uso de codificação de canal.

O sinal OFDM (equivalente ao COFDM sem a codificação), que é resistente ao desvanecimento causado pelo multipercurso, e é robusto com relação a ruído impulsivo, possui um comportamento semelhante àquele de um processo aleatório Gaussiano. Isto faz com que sinais OFDM apresentem faixas dinâmicas muito grandes, tornando-os bastante sensíveis a distorções não-lineares.

Vagner Vale do Nascimento e José Ewerton P. de Farias, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, E-mails: vagnervale@dee.ufcg.edu.br, ewerton@dee.ufcg.edu.br.

Distorções não-lineares são provocadas principalmente pelo amplificador de potência no transmissor, o qual precisa ser operado próximo do seu ponto de saturação, com a finalidade de torná-lo eficiente com relação ao uso de energia.

Alguns dos efeitos não-lineares sobre o sinal OFDM transmitido são:

- Espalhamento do espectro do sinal OFDM;
- Efeitos de intermodulação sobre as subportadoras;
- Distorção da constelação do sinal em cada subcanal;
- Aumento da taxa de erro de bit em cada subcanal.

A seção 2 contém uma breve descrição da técnica COFDM. Na seção 3, é apresentado o modelo do amplificador de potência não-linear utilizado nas simulações. O modelo de simulação utilizado para o enlace do sistema DVB-T é introduzido na seção 4. Na seção 5, são mostrados os resultados de simulação obtidos. Finalmente, na seção 6, alguns comentários sobre os resultados obtidos são apresentados.

II. COFDM

COFDM é um sistema de modulação bem adequado para a radiodifusão terrestre nas bandas VHF e UHF em um ambiente de propagação com resposta seletiva em frequência. Ele usa uma grande quantidade de subportadoras, cada uma carregando uma pequena parte da taxa de dados codificada. O espaçamento em frequência é cuidadosamente definido para garantir a ortogonalidade entre as subportadoras, de forma que elas não se sobreponham no domínio da frequência.

A baixa taxa de dados por subportadora reduz a susceptibilidade ao multipercurso, porque o período do símbolo é bastante longo comparado com o provável atraso do sinal. A adição de um intervalo de guarda entre os símbolos é utilizada para incrementar a robustez do sinal COFDM ao multipercurso. Assim, a duração de cada símbolo transmitido é maior do que o período em que o receptor o processa. A inserção de codificação de canal, bem como de entrelaçamento, são fatores essenciais que contribuem para o bom desempenho desta técnica.

A. O sinal OFDM

Dado que o sinal possui N_s subportadoras espaçadas por um intervalo $\Delta f (= 1/T)$ e iniciando em $t = t_s$, temos que:

$$s_i(t) = \text{Re}\{d_i \cdot \exp[j2\pi \cdot \frac{i}{T} \cdot (t - t_s)]\}, \quad t_s \leq t \leq t_s + T$$

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

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

onde T é a duração do símbolo e d_i é o símbolo complexo transmitido pela subportadora de ordem i .

O sinal OFDM é composto pelo somatório das N_s subportadoras dada pela equação (1), assim, ele pode ser representado por:

$$s_l(t) = \text{Re}\{\sum_{i=0}^{N_s-1} d_i \cdot \exp[j2\pi \cdot (i/T) \cdot (t - t_s)]\},$$

$$t_s \leq t \leq t_s + T$$

$$s_l(t) = 0, \quad t_s + T < t < t_s$$
(2)

Observando a equação (2) pode-se notar que o sinal OFDM é dado pelo cálculo da transformada inversa de Fourier discreta do símbolo a ser transmitido. Com isso, usa-se algoritmos de transformada inversa rápida de Fourier para eliminar a necessidade de osciladores na geração do sinal OFDM. A síntese de milhares de subportadoras ao longo de um canal para TV digital, através de métodos convencionais, acarretaria em aumento de complexidade e de custo para o sistema. A recuperação do sinal OFDM pode ser realizada de maneira análoga à geração utilizando a transformada rápida de Fourier.

III. MODELO DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

Usando representações em banda básica (envelope complexo apenas) para todos os sinais envolvidos ([11], Cap. 4), a relação entre a entrada $c_e(t)$ e a saída $c_s(t)$ do amplificador é:

$$c_s(t) = c_e(t)G[|c_e(t)|] \quad (3)$$

onde

$$G[|c_e(t)|] \triangleq \frac{\mathcal{A}[|c_e(t)|] \exp\{i\Phi[|c_e(t)|]\}}{|c_e(t)|} \quad (4)$$

As funções $\mathcal{A}[\cdot]$ e $\Phi[\cdot]$ representam conversões AM/AM e AM/PM [12], respectivamente.

Para um amplificador a válvula de onda viajante (TWTA), de acordo com o modelo de Saleh [9], as funções $\mathcal{A}[r]$ e $\Phi[r]$ são:

$$\mathcal{A}[r] = \frac{\nu r}{(1 + \beta_\alpha r^2)} \quad (5)$$

e

$$\Phi[r] = \frac{\alpha_\phi r^2}{(1 + \beta_\phi r^2)} \quad (6)$$

onde ν é o ganho de pequeno sinal, e $\mathcal{A}_{sat} = 1/\sqrt{\beta_\alpha}$ é a tensão de entrada de saturação. A amplitude máxima na saída é $\mathcal{A}_0 = \max\{\mathcal{A}[r]\} = \nu \mathcal{A}_{sat}/2$. Além disso, $\phi_\infty = \alpha_\phi/\beta_\phi$ é o maior deslocamento de fase que o sinal amplificado pode sofrer. Um conjunto de valores para os parâmetros acima é o seguinte:

$$\nu = 2,00 \quad \beta_\alpha = 1,00 \quad \alpha_\phi = \frac{\pi}{3} \quad \beta_\phi = 1,00. \quad (7)$$

Distorções não-lineares dependem do *recuo de entrada* [12], RDE, ou do *recuo de saída*, RDS, definidos por:

$$RDE \triangleq 10 \log_{10} \frac{\mathcal{A}_s^2}{\langle P_{entr.} \rangle} \quad (8)$$

e

$$RDS \triangleq 10 \log_{10} \frac{\mathcal{A}_0^2}{\langle P_{saída} \rangle}. \quad (9)$$

onde $P_{entr.}$ = potência de entrada, e $P_{saída}$ = potência de saída.

IV. MODELO DO SISTEMA

Na Figura (1) é ilustrado o diagrama de blocos para o sistema de transmissão utilizado nas simulações realizadas. Este modelo faz parte do padrão EN 300 744 da ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), conforme descrito na referência [1] e encontra-se parcialmente implementado nas versões 6.1 e acima do MATLAB®. O bloco do amplificador não-linear aparece tracejado para indicar tratar-se de um componente removível durante as simulações. A abreviação R/S refere-se a Reed/Solomon, enquanto que a abreviação l=12 refere-se ao comprimento de bloco usado pelo entrelaçador. O transmissor opera no modo "2k", indicando que 1705 subportadoras são utilizadas. O receptor consiste de um demapeador 64-QAM que realiza decisões suaves, produzindo um conjunto de seis números reais para cada número complexo na sua entrada. Estes seis números representam decisões suaves sobre as componentes real e imaginária dos primeiro, segundo e terceiro bits. O decodificador de Viterbi opera em conjunto com um codificador convolucional com extração de bit (*punctured convolutional coder*) com taxa 3/4, importante em aplicações onde há limitação de largura de faixa, como é o caso da transmissão digital de televisão [13].

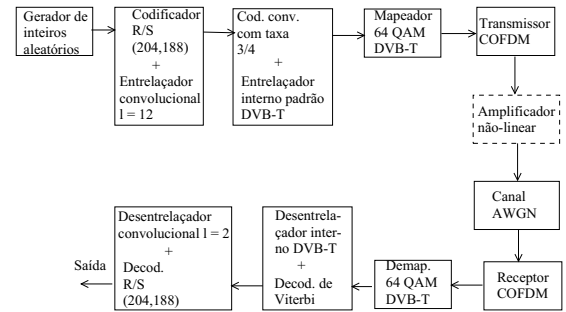


Fig. 1. Transmissão DVB-T: Modelo em banda básica.

V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Conforme ilustrado na Figura 1, o sistema DVB-T possui uma primeira estrutura de codificação e entrelaçamento que é conhecida como camada externa onde é realizada uma codificação de Reed-Solomon e um entrelaçamento convolucional. Em seguida, o sinal em banda básica é submetido a uma segunda estrutura chamada de camada interna onde é realizada uma codificação convolucional com extração de bits (*punctured*) e um outro entrelaçamento.

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos. A necessidade da concatenação de duas camadas de codificação e entrelaçamento é examinada. Para isso, foi desenvolvido um programa em MATLAB© para interagir com o simulador do sistema DVB-T da Figura 1. O programa executa o simulador 28 vezes, nas quais, cada interação fornece um valor diferente de E_b/N_o para o canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) e registra seus respectivos valores de taxa de erro de bit, tanto no fim do enlace quanto na região entre as camadas internas e externas de codificação. Os resultados numéricos são apresentados na Figura 2.

Há uma grande diferença de desempenho entre as duas situações. Para o caso de codificação simples, o enlace apenas atinge uma taxa de erro de bit razoável para uma relação $E_b/N_o = 16 \text{ dB}$. Analisando o caso de codificação concatenada, pode-se afirmar que o enlace para o sistema DVB-T realiza uma transmissão quase livre de erros a partir de uma relação E_b/N_o aproximadamente igual a $13,5 \text{ dB}$, pois a curva tende a uma inclinação de 90° .

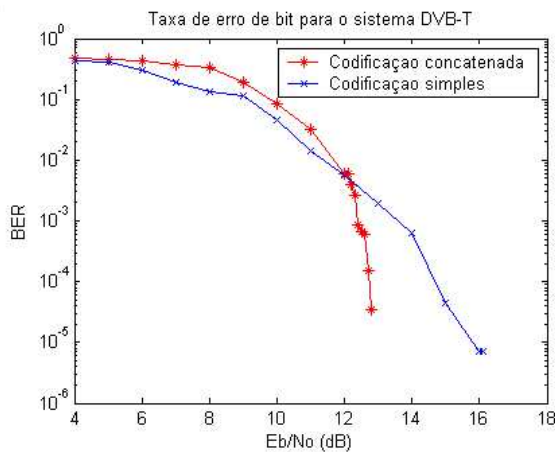


Fig. 2. Taxa de erro de bit versus E_b/N_o para o sistema DVB-T com uma e duas camadas de codificação e entrelaçamento em um canal AWGN.

A segunda parte da análise dos resultados das simulações refere-se à observação dos efeitos causados pelo uso de amplificação não-linear de potência na saída do transmissor DVB-T. Para esta análise, foi utilizado um canal ideal. Fez-se esta escolha para a observação apenas dos efeitos do amplificador de potência. Com a inserção do modelo do amplificador descrito na seção 3, pôde-se constatar uma grande distorção na amplitude e na fase do sinal COFDM após sua passagem pelo amplificador (veja o diagrama de constelação nas Figuras 3 e 4), provocando uma taxa de erro de bit de 10^{-1} , algumas ordens de grandeza acima do máximo tolerável [4] em termos práticos. Trabalhando em um ponto de operação mais próximo do ponto de saturação do amplificador, ou seja, utilizando um valor de $RDS = 6,2 \text{ dB}$ (Figura 4) ao invés de $RDS = 6,8 \text{ dB}$ (Figura 3), verifica-se uma maior distorção no sinal detectado. Assim, é necessário relacionar a distorção sofrida pelo sinal com a eficiência no uso de potência pelo amplificador.

Em relação ao espectro do sinal COFDM, pôde-se observar que com o amplificador de potência há uma amplificação

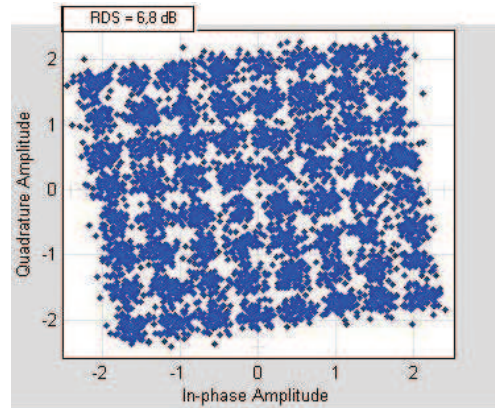


Fig. 3. Diagrama de constelação do sinal detectado 64-QAM para um valor de RDS do amplificador igual a $6,8 \text{ dB}$ em um canal ideal.

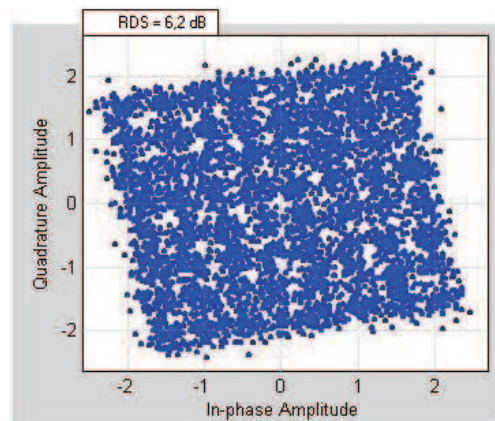


Fig. 4. Diagrama de constelação do sinal detectado 64-QAM para um valor de RDS do amplificador igual a $6,2 \text{ dB}$ em um canal ideal.

da banda de rejeição como qualquer outro amplificador real. Na Figura 5 são apresentados os espectros obtidos para dois valores de recuo de saída do amplificador ($RDS = 6,8 \text{ dB}$ e $RDS = 6,2 \text{ dB}$). Esta amplificação indesejada é preocupante, pois, para $RDS = 6,8 \text{ dB}$ e $RDS = 6,2 \text{ dB}$, a diferença aproximada entre o nível espectral da banda passante e o da banda de rejeição é, respectivamente, de 23 dB e 20 dB .

VI. CONCLUSÕES

Uma investigação sobre o desempenho de um enlace de televisão digital usando o padrão DVB-T foi realizada. A necessidade da codificação de canal concatenada e os efeitos causados por amplificação de potência não-linear foram enfocados.

Na primeira análise, foi constatada a superioridade do uso de uma codificação concatenada em relação à codificação simples conforme observado na Figura 2, onde é mostrada a taxa de erro de bit em função da relação E_b/N_o . Pode-se observar (Figura 2) que a qualidade da transmissão ou é alta (transmissão quase livre de erro para E_b/N_o acima de aproximadamente $13,5 \text{ dB}$) ou é baixíssima (alta taxa de erro de bit para E_b/N_o abaixo de aproximadamente $12,5 \text{ dB}$).

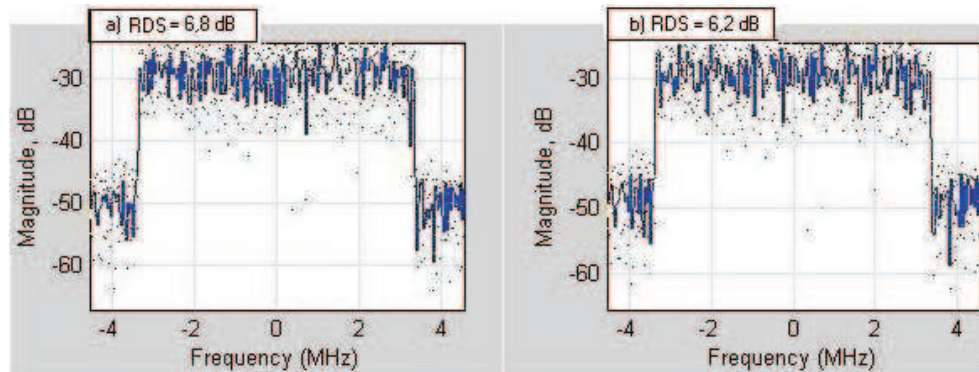


Fig. 5. Espectro de potência do sinal COFDM para valores de RDS do amplificador iguais a a) 6,8 dB e b) 6,2 dB em um canal ideal.

Os efeitos causados pelo uso de amplificadores não-lineares são agora discutidos. Foi observada uma distorção de amplitude e de fase considerável no sinal COFDM recebido. O uso de uma estratégia de linearização do processo de amplificação parece ser uma solução recomendável. Um estudo neste sentido está sendo realizado pelos autores no presente momento. Os espectros de saída obtidos indicam a necessidade de uma filtragem em RF na saída do amplificador para amenizar a interferência em canais adjacentes.

REFERÊNCIAS

- [1] ETSI EN 300 744 V1.4.1, Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, Sophia Antipolis, França, 2001.
- [2] A. N. D'Andrea, V. Lottici e R. Reggiannini, "Nonlinear Predistortion of OFDM Signals over Frequency-Selective Fading Channels", IEEE Trans. on Communications, vol. 49, No 5, Maio de 2001, pp. 837-843.
- [3] A. N. D'Andrea, V. Lottici e R. Reggiannini, "RF Power Amplifier Linearization Through Amplitude and Phase Distortion", IEEE Trans. on Communications, vol. 44, No 11, Novembro de 1996, pp. 1477-1484.
- [4] Gerald W. Collins, Fundamentals of Digital Television Transmission, Wiley, 2000.
- [5] D. Hanselman e B. Littlefield, Mastering MATLAB 5, Prentice Hall, 1998.
- [6] E. Costa e S. Pupolin, "M-QAM-OFDM System Performance in a Presence Nonlinear Amplifier and Phase Noise", IEEE Trans. on Communications, vol. 50, No 3, Março de 2002, pp. 462-472.
- [7] P. Banelli e S. Cacopardi, "Theoretical Analysis of OFDM Signals Nonlinear AWGN Channels", IEEE Trans. on Communications, vol. 48, No 3, Março de 2000, pp. 430-441.
- [8] E. Costa, M. Midrio e S. Pupolin, "Impact of Amplifiers Nonlinearities on OFDM Transmission System Performance", IEEE Communications Letters, vol. 3, No 2, Fevereiro de 1999, pp. 37-39.
- [9] A. A. M. Saleh, "Frequency-Independent and Frequency-Dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers", IEEE Trans. on Communications, vol. COM-29, No 11, Novembro de 1981, pp. 1715-1720.
- [10] E. L. Pinto e C. P. Albuquerque, "A Técnica de Transmissão OFDM", Revista Científica Periódica - Telecomunicações, vol. 05, No 01, Junho de 2002, pp. 1-10.
- [11] J. G. Proakis, Digital Communications, 4ed., McGraw-Hill, 2000.
- [12] R. M. Gagliardi, Satellite Communications, Van Nostrand Reinhold, 2a ed., 1991.
- [13] G. Begin e D. Haccoun, "High-rate punctured convolutional codes: structure properties and construction technique", IEEE Trans. on Communications, vol. 37, no. 12, Dezembro 1989, pp. 1381-1385.