

# MODULAÇÃO CODIFICADA COM MAPEAMENTO NÃO-LINEAR EM ESQUEMAS $\pi/4$ QPSK

Luiz Carlos Faray de Aquino e Renato Baldini Filho

Departamento de Comunicações

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Caixa Postal 6101

13.083-970 Campinas – SP – Brasil

e-mail: baldini@decom.fee.unicamp.br

## RESUMO

Este artigo apresenta um esquema de modulação codificada em treliça com mapeamento não-linear desenvolvido a partir da constelação 8-PSK e um codificador convolucional binário não-linear. A performance deste esquema, denominado de  $\pi/4$ -TCM, é mostrada de forma comparativa com a modulação 2-PSK não-codificada, apresentando melhor desempenho..

## 1. INTRODUÇÃO

É comprovado que esquemas de modulação codificada podem melhorar a performance da taxa de erro de bit sem expansão de banda e aumento de energia, quando comparado com um equivalente esquema de modulação não-codificada [3] [4].

As limitações no espectro disponível e a crescente demanda por serviços de telecomunicações motivam a pesquisa em busca de sistemas que melhorem o aproveitamento das faixas de frequência disponíveis.

Neste trabalho, um esquema de modulação codificada por treliça faz uso de um codificador convolucional não-linear para realizar o mapeamento dos sinais da constelação 8-PSK. Como resultado, uma seqüência de sinais com deslocamentos de fase de  $\pi/4$  entre duas constelações QPSK é gerada.

A determinação dos códigos convolucionais não-lineares foi realizada a partir de um processo de otimização tendo como figura de mérito a distância Euclidiana livre. A partir disso, uma nova classe de códigos com 4, 8, 16 e 32 estados foi determinada.

O novo esquema é simulado em canal AWGN onde traçamos as curvas de taxa de erro de bit versus a razão energia de bit por densidade espectral de potência de ruído.

## 2. CONCEITO $\pi/4$ -TCM

A introdução de interdependências e a expansão do conjunto de sinais são duas idéias básicas da Modulação Codificada por Treliça (TCM) [1]. A construção do esquema  $\pi/4$ -TCM parte da modulação 8-PSK com restrições nas transições, mostrada na Fig. 1, onde as características de mapeamento são realizadas por um codificador convolucional não-linear [1]

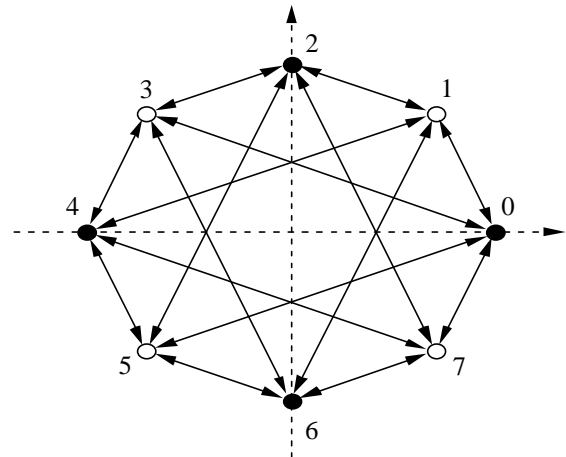


Fig. 1: Modulação 8-PSK com restrições nas transições.

Dessa forma, a cada período de símbolo, um dos subconjuntos de sinais, pares {0, 2, 4, 6}, representados por ●, ou ímpares {1, 3, 5, 7}, por ○, é selecionado para transmissão de forma alternada. O esquema  $\pi/4$ -TCM parte desse princípio e associa a cada ramo da treliça um dos sinais possíveis naquele intervalo de símbolo. A Fig. 2 mostra a filosofia  $\pi/4$ -TCM aplicada a uma treliça de 4 estados.

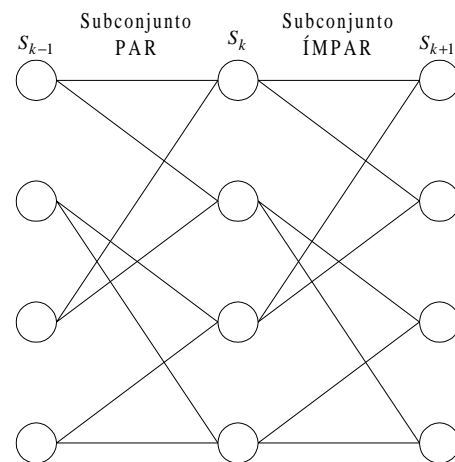


Fig. 2: Princípio de mapeamento  $\pi/4$ -TCM

O diagrama de blocos do esquema  $\pi/4$ -TCM é mostrado na Fig. 3.

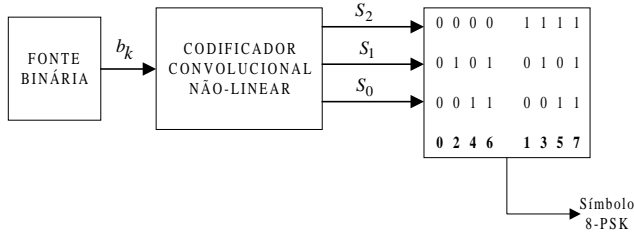


Fig. 3: Diagrama de bloco do esquema  $\pi/4$ -TCM.

Observe que o primeiro bit do codificador convolucional, ( $S_2$ ), é utilizado para selecionar um dos subconjuntos de sinais 4-PSK. Quando  $S_2 = 0$ , o subconjunto par  $\{0,2,4,6\}$  será o grupo de sinais selecionado para transmissão no ramo da treliça. Do mesmo modo, quando  $S_2 = 1$ , é selecionado o subconjunto ímpar  $\{1,3,5,7\}$ . É importante ressaltar que este bit se alterna entre 0 e 1 a cada saída do codificador independente do valor da entrada.

Os dois bits ( $S_0$  e  $S_1$ ) remanescentes da saída do codificador convolucional da Fig. 3 correspondem a informação e a redundância inerente da codificação. Os mesmos são utilizados para mapear o sinal dentro da constelação selecionada. A codificação convolucional é empregada para introduzir certa dependência entre os pontos sucessivos, de tal forma que somente certos padrões ou seqüências de pontos são permitidos. Essa restrição imposta ao mapeamento dos pontos das constelações é que garante um ganho de codificação. Esse chaveamento entre as constelações proporcionado pelo bit ( $S_2$ ), caracteriza a não-linearidade da codificação [1].

A seqüência formada por este mapeamento não-linear deve fazer com que a distância euclidiana livre ( $d_{free}$ ) obtida seja maximizada, o que proporciona um melhor desempenho deste sistema em canais AWGN.

A determinação dos sinais que rotulam os ramos da treliça e, conseqüentemente, do código convolucional não-linear foi realizado através de um processo de busca e otimização onde a figura de mérito é a distância Euclidiana mínima. Na Fig. 5 é mostrada a treliça  $\pi/4$ -TCM obtida para o codificador de 4 estados.

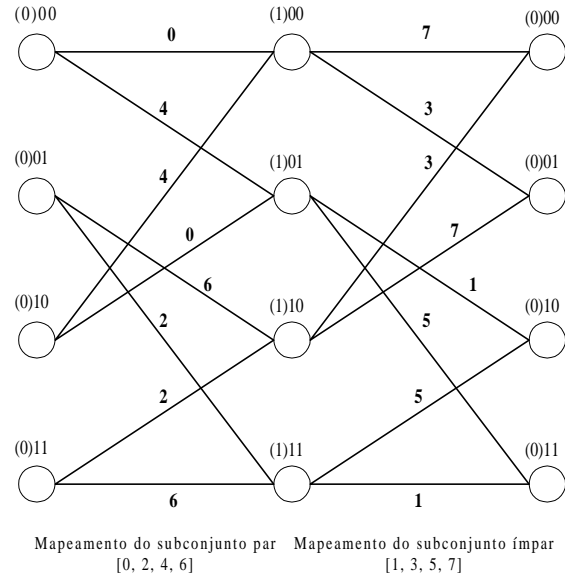


Fig. 5: Treliça de 4 estados com código ótimo obtido.

Para este código, a distância livre quadrática é dada por:

$$d_{free}^2 = d^2(0,4) + d^2(1,7) + d^2(4,0) = 10 \quad (1)$$

Em relação a uma modulação 2-PSK não-codificada, o ganho assintótico de codificação é, aproximadamente, 4 dB.

Com as expressões de entrada e saída obtidas a partir da treliça da Fig. 5, determinamos o diagrama representativo do codificador convolucional de 4 estados mostrado na Fig. 6.

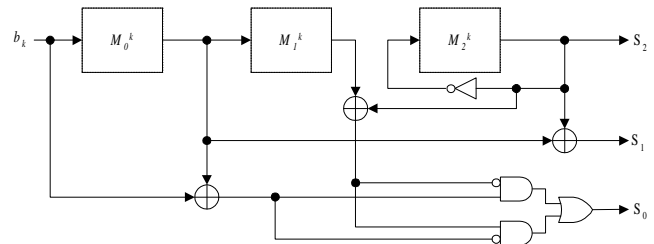


Fig. 6: Codificador convolucional não-linear de 4 estados.

Observa-se que o codificador apresenta três elementos de memória entretanto, o bloco identificado como  $M_2^k$  independe da entrada  $b_k$ . Além disso, este bloco é utilizado tão somente para provocar mudanças de um subconjunto de sinais da modulação para outro. Portanto, de fato, este codificador convolucional binário pode ser considerado como tendo somente 4 estados.

Para o caso do codificador convolucional de 4 estados, a determinação dos sinais que rotulam os ramos da treliça pode ser feita por tentativa até a obtenção de um código com maior distância Euclidiana mínima. Entretanto, para um número maior

de estados, o processo de maximização não é trivial sendo necessário o desenvolvimento de programas de otimização.

A treliça do codificador convolucional de 16 estados é mostrada na Fig.7. Utilizou-se um processo de otimização baseado em busca aleatória e portanto o código obtido não é garantido ser ótimo.

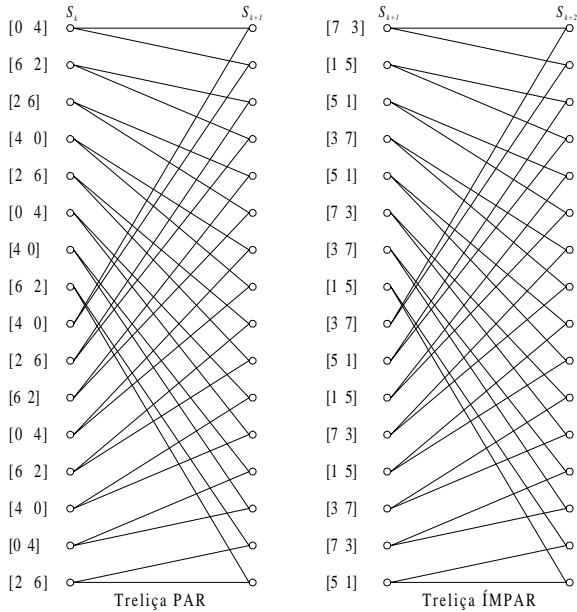


Fig. 7: Treliça do codificador sub-ótimo de 16 estados

### 3. RESULTADOS

O principal parâmetro para avaliar a performance assintótica de um esquema TCM é a sua distância Euclidiana mínima (também conhecida como mínima distância livre). O ganho assintótico de codificação é uma medida de performance para um dado sistema de modulação codificada relativo a um sistema de referência (geralmente um sistema de modulação não-codificado) quando a razão energia por bit de informação pela densidade espectral de ruído é feita infinito para ambos os sistemas. O ganho assintótico de codificação é, geralmente, avaliado levando-se em conta a distância Euclidiana mínima para ambos os sistemas.

Foram determinados, para o esquema  $\pi/4$ -TCM, códigos com 4, 8, 16 e 32 estados. Na Tabela 1, são apresentados os resultados obtidos sendo o ganho assintótico computado em relação a uma modulação 2-PSK não-codificada cuja distância Euclidiana mínima é 2 [5].

Código	Estados	$d_{free}^2$	$N_{free}$	$\gamma_a$ (dB)
I	4	10	1	3,98
II	8	12	1	4,77
III	16	14	3	5,44
IV	32	16	7	6,02

Tabela 1: Códigos para o esquema  $\pi/4$ -TCM.

Da Tabela 1 temos que  $d_{free}^2$  é a distância Euclidiana mínima quadrática,  $N_{free}$  é o número de palavras-código com distância igual a  $d_{free}^2$  e  $\gamma_a$  é o ganho assintótico de codificação.

Os códigos foram simulados em canal AWGN e os resultados são mostrados na Fig. 7 através da curva de BER pela razão energia de bit por densidade espectral de potência de ruído.

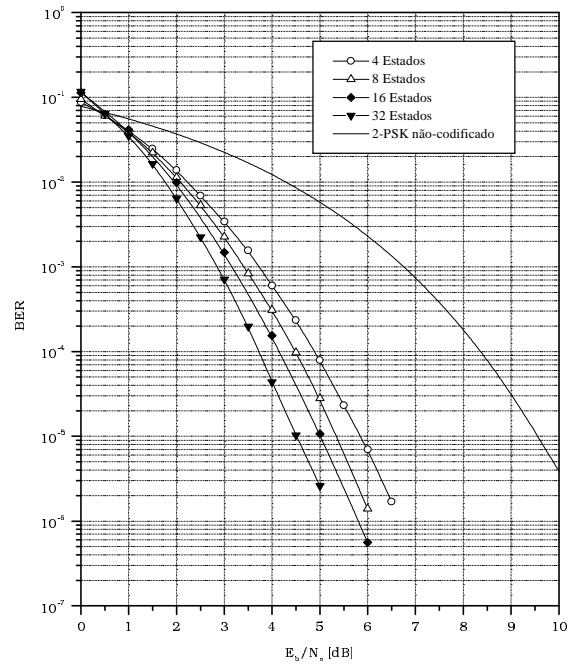


Fig. 8: Curvas de desempenho dos esquemas  $\pi/4$ -TCM.

### 4. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentamos uma nova classe de códigos convolucionais de característica não-linear implementando um esquema de modulação codificada denominado de  $\pi/4$ -TCM.

Tal esquema, associa os sinais de duas constelações QPSK deslocadas de  $\pi/4$ , de forma alternada, restringindo ainda mais o mapeamento dos sinais transmitidos. Este procedimento, proporciona a obtenção de distâncias Euclidianas livres maiores que a modulação codificada convencional [3].

Foram obtidos codificadores com 4, 8, 16 e 32 estados onde comparamos o desempenho dos mesmos em termos da distância Euclidiana obtida e através das curvas de taxa de erro de bit. O sistema de referência utilizado na comparação foi o 2-PSK não-codificado.

Os resultados mostraram que os códigos  $\pi/4$ -TCM apresentam um desempenho de cerca de 6 dB melhor que o 2-PSK quando simulamos em canal AWGN, para um código convolucional de 32 estados.

Constatamos também que o esquema  $\pi/4$ -TCM, mesmo partindo do mapeamento de sinais proposto na modulação  $\pi/4$ -DQPSK [6], trata-se de uma modulação coerente. Portanto, a informação é transmitida pelos pontos da constelação e não pelos deslocamentos de fase, como no esquema original [1].

Em casos onde a fase da portadora não pode ser estimada, a filosofia  $\pi/4$ -TCM ainda pode ser empregada desde que os códigos gerados sejam invariantes a rotação de fase.

## 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Aquino, Luiz Carlos F., *Modulação Codificada para Sistemas Móveis TDMA*, Tese de mestrado, Unicamp, fevereiro de 2001.
- [2] Biglieri, E., Divsalar D., McLane, P. J., Simon, M. K., *Introduction to Trellis-Coded Modulation with Applications*, Macmillan Publishing Company, 1991.
- [3] Ungerboeck, G., *Channel Coding with Multilevel/Phase Signals*, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 28, no. 1, pp. 55-67, January 1987.
- [4] Baldini F., Renato, *Contribuição ao Desenvolvimento de Sistemas de Modulação Codificada*, Tese de livre docência, Unicamp, 1998.
- [5] Shu, L., Costello Jr., D. J., *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, 1983.
- [6] Proakis, Jonh G., *Digital Communications*, McGraw Hill, Third Edition, 1995.