

Codificação Adaptada à Modulação em Sistemas Rádio Digitais

Karl J. Friederichs e R.M. Dauscha

Este artigo apresenta um método de codificação para correção de erro do tipo FEC (Forward Error Correction) com uma eficiente redundância para sistemas rádio digitais e analisa sua implementação e desempenho. Ganhos de codificação de até 6 dB podem ser alcançados aplicando-se códigos do tipo CSOC (Convolutional Self Orthogonal Code). Para alcançar a requerida redundância, necessita-se apenas de um pequeno aumento da taxa de transmissão. Mesmo em sistemas com grau de modulação elevado, como por exemplo 256 QAM, a implementação do decodificador resulta num moderado custo de hardware.

1. Introdução

Sistemas rádio digitais fazem uso de modulação em quadratura e amplitude de grau M (M-QAM, onde $M = 4, 16, 64$ e 256), visando atingir uma alta eficiência na largura de faixa de transmissão disponível [1]-[3].

Os sistemas 64 e 256 QAM, devido ao grande número de sinais distintos, necessitam de uma razão sinal/ruído muito mais alta, para uma transmissão confiável dos dados, do que os sistemas 4 e 16 QAM. Além disso, a modulação QAM de grau elevado é muito mais suscetível a imperfeições sistêmicas, como distorções não lineares ou recuperação não ideal da portadora.

A vulnerabilidade de sistemas rádio digitais com uma eficiente largura de faixa pode em grande parte ser reduzida utilizando-se uma codificação para correção de erro [4]. Toleram-se, porém, em muitas aplicações, apenas um pequeno acréscimo percentual na taxa de transmissão, visando a inclusão de redundância.

K.J. Friederichs é engenheiro da Siemens A.G., Transmission Systems.

R.M. Dauscha é engenheiro da Equitel S.A., Desenvolvimento - Transmissão.

Para uma utilização eficiente dessa redundância, deve-se ter como objetivo um bom casamento entre codificação e modulação. A aplicação clássica de códigos em blocos, onde a correção de erro é baseada simplesmente em propriedades algébricas e não em informação sobre os bits de decisão suave ou sobre o formato da modulação, é ineficiente. Um método eficaz é a modulação tipo TCM ("Trellis Coded Modulation") de Ungerboeck, na qual a redundância é transmitida com um alfabeto ampliado do sinal e onde se utiliza uma decodificação do tipo Viterbi [5] e [6]. Porém, a implementação prática de um rádio digital TCM transmitindo 8 bits de dados por janela de tempo ("time slot") com uma taxa de 30 MHz resulta em um custo de hardware muito grande, mesmo utilizando-se modernas tecnologias VLSI ("Very Large Scale Integration"). Adicionalmente, nessas aplicações o desempenho teórico esperado do TCM é degradado devido a imperfeições sistêmicas, como por exemplo, um desvio de fase da portadora [7]. Em outro estudo [8], Mecklenburg et al descrevem um esquema de correção de erro com uma eficiente redundância aplicável a sistemas QAM, onde os bits de dados são mapeados nos símbolos a serem transmitidos de acordo com o código Gray. Neste presente artigo, utiliza-se o mapeamento por partição de conjuntos introduzido por Ungerboeck [6] para a constelação convencional de 256 QAM. O resultado é um esquema de codificação com um reduzido acréscimo na taxa de transmissão. A esse tipo de modulação deu-se o nome de UC-QAM ("Underlying Coded" - QAM). Ao final deste artigo são apresentados resultados de cálculos e simulações de desempenho de alguns códigos.

2. UC - QAM

Na transmissão de sinais com modulação multi-nível, corrompida por ruído gaussiano, a probabilidade de erro de símbolo decresce exponencialmente com o acréscimo da distância Euclidiana entre os símbolos. Desta forma, erros de transmissão mais prováveis são os chamados erros de passo simples, ou seja, falsificações em símbolos adjacentes, enquanto erros de dois ou mais passos ocorrem com menor probabilidade. Então, uma codificação de erro eficiente deve levar em conta a probabilidade de todos os tipos possíveis de erro [9]. Seria um desperdício de redundância tentar corrigir todos os tipos de erros com o mesmo esforço. Pode-se afirmar que é interessante concentrar os esforços na correção de erros de um passo, em cada direção do plano complexo.

A seguir, consideramos um sistema 256 QAM que transmite 8 bits por "time slot". Como só se deseja corrigir erros de um passo, não se faz necessário codificar todos os bits, mas sim, apenas o bit menos significativo do símbolo transmitido no canal em fase (I) ou em quadratura (Q). A Fig. 1 mostra um diagrama em blocos do codificador. Inicialmente, o feixe de dados serial é paralelizado e a taxa de transmissão de símbolos é aumentada de tal forma a criar espaço livre para a inserção de redundância na seqüência de bits menos significativos nos canais I e Q. Os dois codificadores, um para cada canal, são inseridos apenas para os bits menos significativos e geram bits de verificação multiplexados nos momentos corretos da seqüência. A seguir, um modulador de quadratura realiza o mapeamento de 256 QAM. Desta maneira, os dois bits codificados entre os 8 bits dividem a constelação 256 QAM em quatro sub-campos com uma distância mínima aumentada, enquanto os bits não codificados determinam a posição do sinal no sub-campo. Uma descrição detalhada sobre essa divisão encontra-se em [6]. Qualquer erro de um passo ocasiona uma mudança de sub-campo que pode ser detectada pelo decodificador UC, a depender da capacidade de detecção e/ou correção do código utilizado.

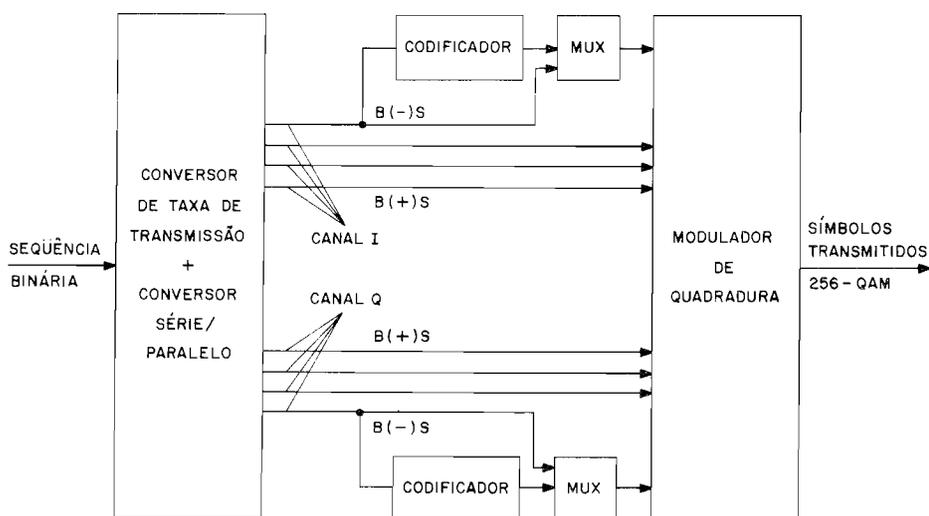


Figura 1. Diagrama em blocos do codificador UC.

O diagrama em blocos do decodificador é mostrado na **Fig. 3**. Como no codificador, existem dois ramos iguais, um para cada canal I e Q. Vamos considerar por simplicidade, apenas um ramo. Inicialmente, os símbolos recebidos são quantizados com uma resolução de três ou quatro bits de decisão suave. Os bits de decisão abrupta e o bit mais significativo dos bits suaves são atrasados de acordo com o tempo de processamento do decodificador e são aplicados à unidade de correção. Conforme o conceito de codificação UC, apenas o bit menos significativo dos bits de decisão abrupta é aplicado ao decodificador.

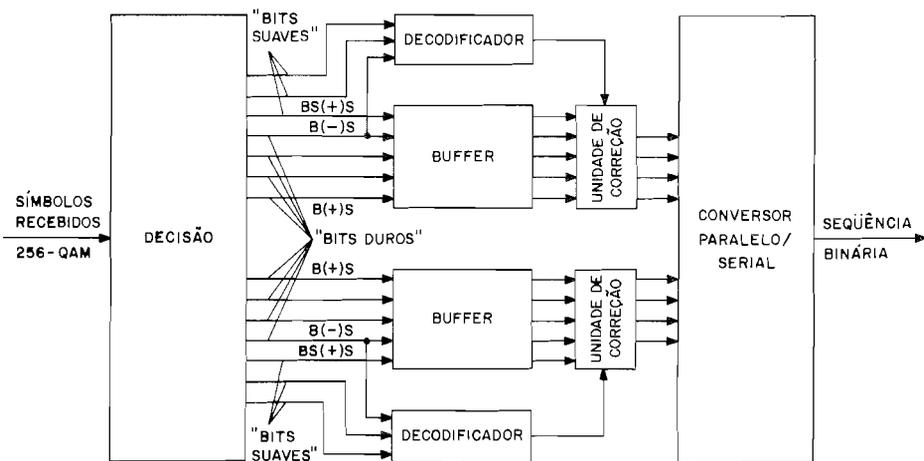


Figura 3. Diagrama em blocos do decodificador UC.

Além disso, o decodificador é alimentado com bits de decisão suave, contendo informação sobre a distância do símbolo recebido em relação ao limiar mais próximo. Caso o decodificador detecte um erro, a unidade de correção é ativada no instante em que o símbolo correspondente aparecer na saída do buffer. Dependendo do bit mais significativo da decisão suave a unidade de correção decide se o nível do símbolo supostamente errado deva ser

elevado ou decrescido de um passo. Ao final, os símbolos corrigidos são convertidos num feixe serial.

Na estrutura adotada, foram tratados dois ramos de codificação separados, um para cada canal, I e Q. A princípio, isso não é necessário porque a seqüência dos dois bits menos significativos pode ser processada conjuntamente, usando apenas um codificador e um decodificador. Razões para esse tratamento em separado dos canais I e Q são a velocidade de processamento mais lenta e a descorrelação que se obtém caso as amostras ruidosas dos canais I e Q sejam correlacionadas (distorções não-lineares).

3. Cálculo de Desempenho e Resultados de Simulação

A princípio, qualquer código corretor de erro e algoritmo decodificador pode ser usado em conjunto com o UC-QAM. Visando obter o melhor casamento possível com as características do canal, é necessário que o algoritmo decodificador possa utilizar informações de decisão suave. Critérios adicionais para a escolha de codificação UC são a taxa de codificação R_c , a complexidade do decodificador e a velocidade de processamento.

Se a redundância do sistema é limitada a valores extremamente pequenos (até 3%) a aplicação de um código tipo CSOC ("Convolutional Self Orthogonal Code") é de especial interesse, uma vez que o correspondente algoritmo permite o uso de decisão suave e implica num custo reduzido de hardware [10] e [11]. Caso o sistema permita mais redundância, códigos do tipo PCC ("Punctured Convolutional Codes") [12] e decodificação tipo Viterbi podem ser levados em consideração.

Na **Fig. 4** estão plotados os resultados de alguns cálculos e simulações, supondo-se o canal AWGN ("Additive White Gaussian Noise"), na qual são comparadas as taxas de erro de bit (TEB) dos seguintes esquemas:

- (i) 256-QAM sem codificação;
- (ii) 256-QAM utilizando CSOC com taxa de codificação $R_c = 8/9$ e distância $d = 5$, decodificado por um algoritmo decodificador de limiar simplificado;
- (iii) 512-TCM de Ungerboeck utilizando a taxa $R_c = 2/3$ e um código convolucional de 16 estados e decodificação por Viterbi.

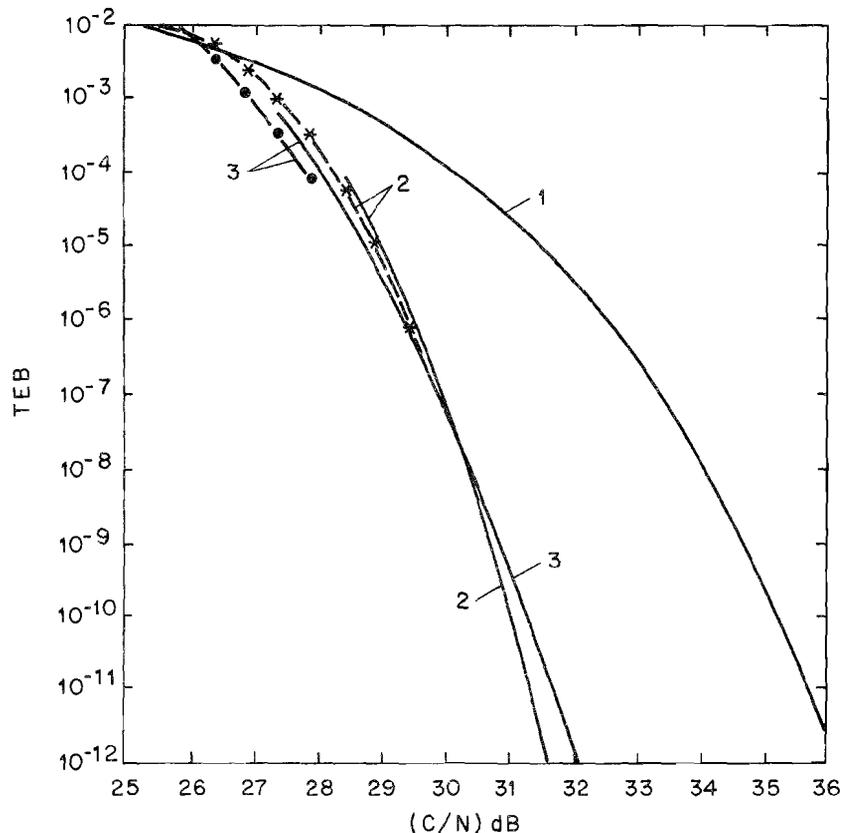


Figura 4. Resultados de cálculo e de simulação para taxa de erro de bit (TEB) versus razão portadora-ruído (C/N) : (1) 256-QAM sem codificação; (2) 256-UC-QAM, CSOC, $R_c = 8/9$, $R_g = 35/36$; (3) 512-TCM, $R_c = 2/3$, 16 estados (*, •: Simulação; Linha cheia: Cálculo).

Os símbolos (*) e (•) na **Fig. 4** indicam resultados de simulações enquanto as linhas cheias resultam de cálculos de acordo com [4]. Considerando os ganhos assintóticos, pode-se ver que dispondo apenas de uma redundância global menor que 3%, o UC-QAM é superior ao TCM. Um decodificador CSOC com taxa de 8/9 e com distância $d = 5$ pode ser implementado num circuito integrado "semicustom" (tecnologia $1,5 \mu$) necessitando menos que 10.000 portas equivalentes. Dessa maneira, o custo de hardware para a implementação do 256-UC-QAM com taxa 8/9 e CSOC é consideravelmente menor do que para o 512-TCM com decodificação de Viterbi de 16 estados.

Para taxas de erro elevadas o TCM é ligeiramente melhor que o UC-QAM usando CSOC. Isso se deve ao fato de que o algoritmo de decodificação de limiar não atinge a propriedade de "Maximum Likelihood Detection" enquanto o algoritmo de Viterbi o faz.

4. Conclusões

Foi apresentada uma técnica de codificação com redundância eficiente para sistemas rádio digitais com modulação QAM de grau elevado. Com essa técnica atinge-se ganhos de codificação de até 6 dB, necessitando-se para isso, apenas um pequeno aumento na largura de faixa. As tecnologias atualmente disponíveis permitem uma implementação a custo moderado.

Referências

- [1] T. Noguchi, Y. Daido e J.A. Nossek, "Modulation Techniques for Microwave Digital Radio", IEEE Communications Magazine, vol. 24, nº 10, Outubro 1986, pp. 21-30.
- [2] R. Steinhart e F. Ziss, "Neuere Entwicklungstendenzen und Markttendenzen in der Richtfunktechnik", NTZ, vol. 41, Novembro 1988, pp. 618-621.
- [3] J.A. Nossek Steinkamp, "Digitalrichtfunk, ein Technologieorientiertes wirtschaftliches-Uebertragungsmedium", NTZ, vol. 41, Novembro 1988, pp. 622-629.
- [4] G.C. Clark, Jr. e J.B. Cain, "Error-Correcting Codes for Digital Communications", New York, Plenum Press, 1982.
- [5] G. Ungerboeck, "Channel Coding with Multilevel/Phase Signals", IEEE Transactions on Information Theory, vol. IT-28, nº 1, Janeiro 1982, pp. 55-67.
- [6] G. Ungerboeck, "Trellis-Coded Modulation with Redundant Signal Sets, Parts I and II", IEEE Communications Magazine, vol. 25, nº 2, Fevereiro 1987, pp. 5-21.
- [7] J. Hagenauer e C-E. Sundberg, "On the Performance Evaluation of Trellis-Coded 8-PSK Systems with Carrier Phase Offset", AEU, vol. 42, Outubro 1988, pp. 274-284.

- [8] P. Mecklenburg, W.K. Pehlert, Jr. e D.D. Sullivan, "Correction of Errors in Multilevel Gray-Coded Data", IEEE Transactions on Information Theory, vol. IT-19, nº 3, Maio 1973, pp. 336-340.
- [9] A.J. Viterbi e J.K. Omura, "Principles of Digital Communications and Coding", New York, McGraw Hill, 1979.
- [10] J.L. Massey, "Threshold Decoding", Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 1963.
- [11] H. Tanaka, K. Furusawa e S. Kanebu, "A Novel Approach to Soft Decision Decoding of Threshold Decodable Codes", IEEE Transactions on Information Theory, vol. IT-26, nº 2, Março 1980, pp. 244-246.
- [12] Y. Yasuda, K. Kachiki e Y. Hirata, "High-Rate Punctured Codes for Soft Decision Viterbi Decoding", IEEE Transactions on Communications, vol. COM-32, nº 3, Março 1984, pp. 315-319.



KARL – JOSEF FRIEDERICHS nasceu em 1955. Ele recebeu o grau Ing. Grad. da Fachhochschule Aachen, Alemanha, em 1979 e os graus Dipl. Ing. e PhD da Universidade de Kaiserslautern, Alemanha, em 1982 e 1986, respectivamente. Desde 1987, ele está com o Departamento de Projeto de Sistemas Rádio da Siemens AG, Munich, onde chefia atualmente o grupo de desenvolvimento. Seus interesses de pesquisa incluem codificação, detecção, sincronização e técnicas rápidas de processamento digital de sinais para sistemas de comunicações. Dr. Friederichs é membro da IEEE Communications Society e da Informationstechnische Gesselschaft (ITG).



RONALD MARTIN DAUSCHA nasceu no Rio de Janeiro, em 14 de outubro de 1961. É formado em Engenharia Eletrônica (especialização Telecomunicações) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Desde 1984, atua na área de desenvolvimento de equipamentos de transmissão da Equitel S.A. De 1986 a 1989 participou do desenvolvimento de sistemas rádio digital de alta capacidade nos laboratórios da Siemens, Munich.