

NOTAS SOBRE O ENSINO DE TRANSMISSÃO DE DADOS: MODEMS - DA HISTÓRIA AO ESTADO DA ARTE

Por H. Magalhães de Oliveira e M. Menezes de Carvalho

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA & SISTEMAS
CODEC- Grupo de Comunicações
C. P. 7800, 50.711-970 Recife - PE

RESUMO

Na época dos computadores e da teleinformática, o estudo das comunicações de dados assume grande relevância. Um dos aspectos importantes na transmissão digital refere-se aos MODEMS (abreviatura para **MOD**uladores **DEM**oduladores) e CODECS (**COD**ificadores **DEC**odificadores). Ainda que existam vastas referências atualizadas, algumas de boa qualidade, tem havido algumas dificuldades no ensino do assunto haja vista a complexidade das técnicas atualmente empregadas. Isto freqüentemente aumenta a deficiência na transmissão do conhecimento, pois os estudantes não percebem claramente *o por quê* de certas saídas tecnológicas, sem um conhecimento adequado das revoluções que se processaram desde os primeiros MODEMS a 300 bps introduzidos pelo Bell Labs para o canal telefônico.

Esta retrospectiva serve como material complementar aos cursos envolvendo transmissão de dados. **Procura-se, através deste enfoque, auxiliar na compreensão e aumentar o estímulo, apreciando a evolução das técnicas empregadas.** A descrição da história até o estado da arte dos Modems analógicos auxilia fortemente à compreensão das técnicas empregadas atualmente, bem como a fixação de conceitos (embaralhadores, codificadores de canal, modulações digitais sofisticadas, equalização automática, canceladores de eco *etc.*). Dá-se ênfase à necessidade e o sucesso da aplicação da codificação de canal para transmissão em altas taxas. Mesmo professores de renome às vezes têm certa dificuldade em perceber o nível real de proximidade entre as taxas de transmissão alcançadas atualmente e a capacidade do canal. Procura-se esclarecer a limitação na taxa em redes privadas/comutadas, estabelecendo-a em termos da eficiência espectral. A apresentação é dividida em duas grandes famílias: MODEMS a baixa e média velocidade (sem codificação de canal) e MODEMS a alta e ultra-alta velocidade (com codificação de canal).

1. INTRODUÇÃO: A EVOLUÇÃO DOS MODEMS

De forma bastante evidente, a evolução da teleinformática tem manifestado uma demanda crescente por taxas de transmissão cada vez mais elevadas. A importância da transmissão de dados em vias telefônicas aumenta dia à dia, e a necessidade do emprego da codificação de canal (GAL 68) se faz sentir quanto maior for a taxa de transmissão. São comuns taxas de transmissão de 300, 600, 1.200, 2.400, 4.800, 7.200, 9.600, 12.000, 14.400, 16.800 e 19.200 bps.

As técnicas de codificação referidas como "**Modulações Codificadas**" tornaram-se fundamentais no domínio da transmissão digital (UNG 82), e mostraram-se bastante superiores à codificação clássica. O canal telefônico apresenta uma largura de banda grosseiramente compreendida entre 300 e 3.300 Hz, suportando uma relação portadora-a-ruído da ordem de 20 a 30 dB (tipicamente 26 dB em linhas comutadas e 28 dB em linhas especialmente condicionadas). Obviamente, um aumento na taxa de transmissão pode permitir uma economia substancial no número de linhas alugadas, bem como a criação de novas aplicações.

Os primeiros MODEMS foram concebidos na *BELL Labs* entre a metade e o final dos anos 50 (MILL 84). Eles suportavam taxas de 300 e 600 bps, e a modulação digital empregada era 2-FSK, i.e., modulação binária por chaveamento de frequência. Durante a década de 60, novos MODEMS com taxas de transmissão médias (1.200, 2.400 e 4.400 bps) foram desenvolvidos usando a modulação de fase M-PSK. O sucesso de MODEMS comerciais com taxas de transmissão elevadas (9.600 bps) surgiu em 1970 com o CODEX, usando modulação com portadoras em quadratura QAM (CAM&GLA 62, PRO 89). Os pesquisadores concentraram esforços para desenvolver novas técnicas visando aumentar a taxa, porém mantendo a confiabilidade da transmissão. Várias empresas tentaram, sem nenhum sucesso, incorporar técnicas clássicas dos Códigos Corretores de Erros no projeto de MODEMS, objetivando corrigir a degradação excessiva no desempenho introduzida pelo crescimento da taxa de informação. Acreditava-se até o final desta década que taxas de transmissão mais elevadas não seriam viáveis em sistemas comerciais. A este propósito, Holsinger (HOL 77) escrevia "*Sad but true for engineers of the world, the days of dramatic speed and performance breakthroughs were over almost as soon as they began*" (Sic). Os discussos dos <<experts>> resumia-se em "*Obviamente, o canal telefônico impõe severas limitações no desempenho dos MODEMS; na prática, uma velocidade de 9.600 bps aparece como um limite para uma transmissão confiável nas vias disponíveis*" (HOL 77 e NYM *et al.* 82). No início dos anos 80, a primeira geração de MODEMS com altíssimas taxas, 14.400 bits/s, surgia: A PARADYNE concebia um MODEM a partir da modulação 64-QAM não-codificada sob linhas especializadas (Condicionadas). Imediatamente, ela foi seguida

pelo CODEX com uma constelação bidimensional hexagonal (FOR *et al.* 84). Independente destes fatos, os desempenhos atingidos em canais telefônicos ainda não eram suficientemente bons para justificar a idéia que taxas superiores à 9.600 bits/s seriam largamente adotadas no mercado comercial de MODEMs.

Um resumo bastante lúcido sobre a introdução da codificação nos MODEMs para canais telefônicos foi apresentado por Ungerboeck (UNG 87a,b). Os primeiros Modems comerciais com QAM codificada em treliça apareceram em 1984, funcionando com taxas de 14.400 bits/s. Atualmente, um código não linear em treliça com oito estados (WEI 84), com ganho nominal de 4 dB, foi adotado pelas normas do antigo CCITT para MODEMs com 9.600 bps sobre a rede telefônica pública em 2 fios e 14,4 kbps sobre linhas especializadas em 4 fios. A não linearidade é introduzida visando uma proteção contra ambigüidades de fase de 90^0 (norma V.32 CCITT 89). Entretanto, a aplicação da modulação codificada aos canais telefônicos não se resume a códigos do tipo Ungerboeck. Em 1986, um MODEM com 14,4 kbps sobre linhas especializadas foi comercializado pela MOTOROLA, usando a idéia da codificação em retículos - com o reticulado de Gosset E_8 (CON&SLO 88). Os primeiros MODEMs comerciais a ultra-altas taxas, ou seja, 16,8 ou 19,2 kbps, só apareceram após o desenvolvimento da técnica de modulação multidimensional codificada em treliça por Wei (WEI 87).

A história do desenvolvimento dos MODEMs para canais telefônicos é bem esboçada por Pahlavan e Holsinger (PAH&HOL 88, FOR *et al.* 84). Primeiramente, uma etapa que vai dos anos 20 à metade dos anos 50; uma segunda que começa nos meados dos anos 50 e termina no início dos anos 70; a seguir uma terceira etapa que corresponde aos anos 70; e finalmente uma quarta que vai do início dos anos 80 até o presente.

2. MODEMs SEM CODIFICAÇÃO

1ª etapa Este período é profundamente marcado por estudos fundamentais sobre as limitações na taxas de transmissão devidas às degradações do sinal introduzidas pelas distorções do canal. Essencialmente, encontram-se as idéias de Carson, Hartley e Nyquist (HAR 28, NYQ 24, NYQ 28).

2ª etapa. Os primeiros MODEMs comerciais surgiram com taxas inicialmente 300 bps e depois até 1.200 bps, criados pela Bell. A modulação FSK era adotada. Novas técnicas de modulação apresentando rendimento espectral superior foram introduzidas para responder ao aumento de demanda (e.g. QAM), além de novas técnicas para sincronização da portadora e do ritmo. A equalização, primeiramente manual, após

adaptativa, foi introduzida logo a seguir. Tudo isto permitiu aumentar a banda de frequências usadas de 1.200 Hz para 1.600 Hz, e posteriormente até 2.400 Hz.

3ª etapa. Esta etapa é marcada sobretudo pela aparição da equalização fracionada, os anuladores de eco e a utilização de processadores no tratamento de sinais (STE 87, BIN 88). Os desenvolvimentos tecnológicos resultaram numa redução considerável nas dimensões dos equipamentos. Ao longo da década de 70, várias empresas tentaram, sem sucesso, incorporar técnicas clássicas de controle de erros no projeto de novos MODEMs mais potentes. Vários deles com 9.600 bps foram desenvolvidos contendo equalizadores auto-adaptativos e anuladores de eco potentes. O MODEM transformou-se então numa ferramenta banal na transmissão de dados, tendo como alguns dos principais fabricantes: INTERTEL, IBM, GENERAL DATACOMM, CODEX COORP., PARADYNE, BELL SYSTEMS, MOTOROLA etc. A transição deste período para o seguinte é marcada pela PARADYNE; tendo a qualidade das linhas telefônicas sido sensivelmente melhorada, iniciou-se a transmissão a 14.400 bps via 64-QAM, embora sem sucesso amplo devido à baixa confiabilidade da transmissão.

3. MODEMs CODIFICADOS

4ª etapa. Em 1985, um MODEM a 19.200 bps foi introduzido pela NEC (HIR 85). A idéia utilizada consistia essencialmente em usar em paralelo vários subcanais ortogonais dentro dos 3 kHz de banda passante disponíveis no canal telefônico, um sistema chamado de MULTIPORTADORAS (HIR 81). Para um grande número de tais subcanais, as distorções de amplitude e fase dentro de cada subcanal tornam-se aproximadamente lineares. Estes Modems, no entanto, exigem circuitos de sincronização e técnicas de recuperação de fase bastante elaboradas e usam um elevado número de portadoras piloto para compor o sinal de sincronismo. Esta alternativa, não obteve sucesso prático.

MODEMs a 19.200 bps de pleno sucesso comercial foram fabricados somente após a publicação do sensacional artigo de Wei sobre a TCM multidimensional, que permitiu a implementação de códigos do tipo Ungerboeck com uma pequena expansão no alfabeto (WEI 87). Uma descrição sumária de alguns detalhes técnicos de tal MODEM para linhas a 4 fios é apresentada a seguir (WEI 87, TAN *et al.* 87, BAU&MIT 89). O sistema usa uma modulação QAM de uma portadora única em 1.850 Hz e um equalizador fracionário automático 3T/4 (também desenvolvido por G. Ungerboeck) para compensar as distorções nos bordos da banda. A modulação, chamada QAM Generalizada, emprega uma constelação em "cruz" com 160 pontos. A filtragem é realizada por um filtro "*Coseno elevado*" com um coeficiente de rolamento (*roll-off*)

muito pequeno, da ordem de 0,09375. A frequência da modulação não assume o valor tradicional de 2.400 Hz; ela vale 2.742,86 Hz ($=2.400 \times 8/7$). O sinal codificado é obtido usando, seja um codificador convolucional de taxa 3/4 tendo 64 estados (WEI 84), seja um codificador em treliça de 16 estados (UNG 87). O codificador trabalha numa cadência de 685,71 Hz, ou seja, um quarto do ritmo da modulação. A decodificação suave (ponderada) é feita pelo algoritmo de Viterbi (PRO 89). O ganho assintótico com relação a 128-QAM não codificada é 5,27 dB, e o ganho efetivo é de 4,49 dB.

Recentemente, a MOTOROLA lançou um Modem a 19,2 kbps com uma codificação em 24 dimensões através de um código de retículo - o retículo de Leech (LAN&LON 89). Blocos sucessivos de 96 bits de dados são codificados em pontos do espaço de sinais - um bloco sendo representado por um ponto no espaço euclidiano com 24 dimensões \mathfrak{R}^{24} . Os símbolos associados a um ponto de sinal pertencem a um repertório de $1.024=2^{10}$ pontos/ 2-dimensões. O número total de sinais possíveis no espaço \mathfrak{R}^{24} é $(2^{10})^{12}$ ou $2^{120} \cong 10^{36}$ entre os quais "somente" $2^{96} \cong 8.10^{28}$ pertencem ao código. A taxa de informação útil é portanto de 96 bits/ 24 dimensões, equivalente a 8 bits/ 2-dimensões. O ritmo da modulação sendo 2.400 bauds, um símbolo QAM é emitido a cada $T_s=1/2.400$ seg e um sinal codificado (ponto a 24-dimensões no espaço onde está imerso o retículo de Leech) é transmitido cada $T_A=N/2 T_s=12.T_s=1/200$ seg.

Para dar uma idéia da complexidade inerente a um número de dimensões tão elevado, seriam precisos 10^{19} anos para transmitir a lista exaustiva das palavras código (dicionário), correspondentes a cada ponto do retículo, sem repetição!

Constata-se que a utilização de uma banda de apenas 2.400 Hz exige uma eficiência espectral de 8 bits/s/Hz para atingir a taxa proposta. Na maioria dos MODEMs de ultra-alta velocidade atualmente disponíveis, adota-se uma banda de 2.742,86 Hz e neste caso, a modulação bidimensional constituinte QAM para construir o retículo de Leech deveria possuir 512 pontos. Isto parece indicar que tais modems são menos atrativos para canais reais que àqueles construídos segundo a modulação multidimensional, haja vista sua necessidade de expansão do alfabeto.

4. COMO SINTETIZAR (DIDATICAMENTE) A EVOLUÇÃO DOS MODEMs?

As tabelas seguintes apresentam um sumário dos principais melhoramentos e desenvolvimentos técnicos introduzidos em Modems sobre canais telefônicos, inicialmente sem codificação de canal, e posteriormente empregando diferentes técnicas de modulação codificada. Os comentários sobre a evolução dos MODEMs descritos na seção anterior podem ser feitos durante a apresentação das tabelas.

Por quê a codificação de canal? Quando usá-la? Estas perguntas básicas são feitas com frequência pelos estudantes. Ainda que pareça óbvio que a sua aplicação

esteja ligada ao controle de erros, quase sempre não é clara a sua ligação ainda mais importante com a taxa de transmissão, um resultado fundamental na teoria de Shannon.

TABELA I. Evolução dos MODEMS. Primórdios: Modulação Digital não codificada.

Modulação Digital	Eficiência Espectral	Banda passante	Velocidade de tx	Modem	Comentários adicionais
2-FSK	1 bits/s/Hz	300 Hz	300 bps	Bell 103	anos 50
2-PSK	1 bits/s/Hz	1.200 Hz	1.200 bps	Bell 202	fins anos 50
4-PSK	2 bits/s/Hz	1.200 Hz	2.400 bps	Bell 201	1962
8-PSK	3 bits/s/Hz	1.600 Hz	4.800 bps	Milgo	1967 eq. manual
16-QAM	4 bits/s/Hz	2.400 Hz	9.600 bps	Codex	1971 eq. adaptativa
64-QAM	6 bits/s/Hz	2.400 Hz	14.400 bps	Paradyne	1980 (sem sucesso)

TABELA II. Evolução dos MODEMS. Ultra-alta velocidades: Modulação Codificada.

Modulação Constituinte	Eficiência Espectral	Banda Passante	Velocidade de tx	MODEM (ano)	Codificação
32-QAM	4 bits/s/Hz	2.400 Hz	9.600 bps	AT&T 1984	TCM a 4 estados
128-QAM	6 bits/s/Hz	2.400 Hz	14.400 bps	diversos 1984	TCM a 8 estados
128-QAM	6 bits/s/Hz	2.400 Hz	14.400 bps	MOTOROLA 1986	Reticulado E_8
256-QAM	7 bits/s/Hz	2.400 Hz	16.800 bps	CODEX 1984	TCM a 8 estados
O-QAM (200Hz)	7 bits/s/Hz	2.800 Hz	19.200 bps	NEC 1985	Multiportadora 14 subcanais
160-QAM a 8 dim.	7 bits/s/Hz	2.743,86 Hz	19.200 bps	CODEX 1987	M - TCM 64 estados
512-QAM	7 bits/s/Hz	2.783,86 Hz	19.200 bps	MOTOROLA 1988	Reticulado Λ_{24}

5. INTERPRETANDO A CAPACIDADE DO CANAL.

A necessidade da codificação faz-se sentir quando a taxa de transmissão cresce, aproximando-se da capacidade do canal. Qualquer que seja o canal, sistemas de transmissão funcionando com taxas muito inferiores à capacidade apresentam bom desempenho e não requerem codificação de canal. A este respeito, deve ficar bem entendida a divisão da história dos MODEMS em duas partes, conforme tabelas I e II. Como compreender esta ligação? A maneira mais simples é observando uma Curva do Expoente $E(R)$ típica para o canal telefônico (de O&BAT 90). Vê-se que a medida que a taxa aproxima-se da capacidade, o valor de $E(R)$ diminui, requerendo, portanto, assumir uma dimensão N substancialmente maior para limitar a Probabilidade de Erro P_e a níveis aceitáveis: $P_e < \exp -NE(R)$. Isto implica em usar códigos definidos em espaços de dimensões cada vez mais elevadas, e de complexidade cada vez mais maior (vide e.g., dados do Modem com estrutura em 24-dimensões!).

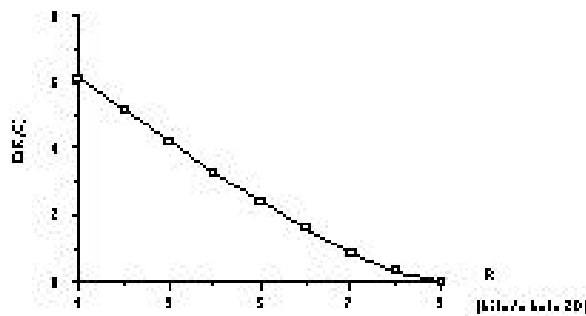


Figura 1. Função $E(R)$ para Reticulados em canal telefônico.

A capacidade de um canal com ruído aditivo branco gaussiano de acordo com a expressão clássica de Shannon pode ser dividida em duas partes, uma função somente da relação sinal-a-ruído e a outra dependente apenas da banda passante. A codificação está ligada apenas à primeira parte (GAL 68): $C_N = 1/2 \log_2 (1+S/N)$ bits/dim. Por outro lado, a limitação na Banda Passante impõe também uma limitação na taxa de transmissão (na verdade, na velocidade da modulação) (WYN 65, JER 77) expressa por $C_B = 2B$ dim/s. A capacidade do canal gaussiano é portanto dada por $C = C_B \cdot C_N = B \cdot \log_2(1+S/N)$ bits/s. Para abordar a codificação, parece razoável exprimir a capacidade normalizada à duas dimensões: $C_N^* = \log_2(1+S/N)$ bits/símbolo 2D ou que equivale a bits/s/Hz. A este propósito, interpreta-se com bastante frequência a limitação imposta devido à Banda Passante como sendo $C_B^* = B$ símbolos 2D/s = B bauds (a capacidade pode também ser expressa em bits/s/bauds). Curiosamente, a largura de faixa impõe uma cota superior na taxa de transmissão, que não decorre da Teoria da Informação.

É necessária atenção à proximidade das taxas de transmissão já atingidas na prática com relação à capacidade. Os sistemas implementados até aqui ainda não atingiram taxas tão próximas à capacidade quanto alguns poderiam crer, (e.g. o mau exemplo 10.3.1, COV&THO 91). A comparação deve sempre ser realizada levando em consideração a banda de frequências utilizadas. Por exemplo, o valor 19,200 bits/s só corresponde à taxa de corte do canal quando a banda considerada é 2.400 Hz. A taxa crítica proposta por (FOR *et al.* 84) escreve-se mais claramente como uma eficiência espectral de 8 bits/s/Hz. Se uma banda mais larga for usada (como nos MODEMs com 2.743,86 Hz), a taxa de 19.200 bps equivale a uma eficiência espectral 7 bits/s/Hz; o que não corresponde nem mesmo à taxa de corte do canal. Entretanto, o sucesso decorrente da Modulação Codificada representa sem sombra de dúvidas um desenvolvimento formidável nas comunicações digitais. Nos anos 70, ninguém poderia acreditar que tais taxas seriam possíveis em vias telefônicas. Para evitar confusões na avaliação da proximidade da taxa com a capacidade para diferentes bandas passantes, sugere-se exprimi-la em função da eficiência espectral. Aparentemente, a obtenção de taxas de transmissão acima da taxa de corte do canal só estão sendo obtidas recentemente através do emprego de uma nova ferramenta: Os Códigos Turbinados (*Turbo Codes*), recém-introduzidos (BER *et al.* 93).

6. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Uma das dificuldades encontradas para compreender os limites sobre a taxa de transmissão decorre de avaliá-la sempre em bps, o que leva em conta a velocidade de sinalização (banda passante). No ensino, a capacidade é melhor expressa em termos da eficiência espectral em **bits/s/Hz**, o que raramente é feito. Fixar a banda em 2.400 Hz e uma SNR típica de 28 dB, donde $T_s=1/2.400$ bauds, uma eficiência de 8 bits/s/Hz corresponde a 19.200 bits/s. Os Modems atuais operando em 19,2 kbits/s operam com eficiência espectral de 7 bits/s/Hz e taxa de sinalização cerca de 2.700 bauds (correspondente à 2.742,86 Hz de banda passante ao invés dos 2.400 Hz usuais). Neste caso, a capacidade do canal/taxa de corte deveriam ser reavaliadas. A medida que a taxa de transmissão aumenta progressivamente (na direção da capacidade de Shannon), a probabilidade de erro cresce e com a diminuição do expoente $E(R)$, faz-se necessário a codificação em dimensões N cada vez maiores. Na prática, sistemas a partir de 4 bits/s/Hz já exigem o emprego de códigos (TCM ou retículos). Aparentemente, a melhor solução prática atual é a **modulação multidimensional codificada em treliça**, que exige menor expansão da constelação com relação ao sistema não codificado de mesma taxa.

Recentemente, alguns fabricantes vêm anunciando MODEMs analógicos com velocidade de 28.800 bps para o canal telefônico (TEL 95). "Onde foi parar a capacidade do canal, segundo Shannon?" Admitindo que seria possível atingir a capacidade do canal (o que é apenas teórico), obtém-se uma eficiência espectral de 9 bits/s/Hz, o que implicaria em usar uma constelação em cruz com mais de 512 pontos e menos que 1.024 pontos (!), dependendo do fator de expansão. Isto torna-se absolutamente inviável, pois mesmo as distorções não seriam controladas. A banda passante requerida neste caso seria cerca de 3.200 Hz! Mantendo uma eficiência espectral de 7 bits/s/Hz com constelações de 160 pontos (tipo Wei) e codificação TCM multidimensional, a banda passante (equalizada) exigida para atingir esta velocidade seria 4.114,29 Hz, novamente absolutamente inviável em um canal telefônico. Supondo que emprega-se um esquema de modulação codificada para atingir a taxa de corte do canal, 8 bits/s/Hz (o que implica trabalhar com constelações expandidas com relação a 256-QAM), a banda passante requerida para atingir esta taxa ainda seria de 3.600 Hz, excessivamente alta para canais telefônicos, mesmo em linhas especialmente condicionadas. Recomenda-se muita cautela na aquisição de novos Modems propondo suportar taxas superiores à 20 kbps. Por outro lado, devido as dificuldades em aumentar a eficiência espectral nas proximidades da capacidade, é bem possível que os novos sistemas tendam a adotar sistemas com eficiência espectral fracionária (e.g., 7,5 bits/s/Hz, etc) (deO&BAT 92).

Um outro aspecto importante a alertar aos engenheiros diz respeito a freqüente confusão feita entre a taxa de transmissão (efetiva) no canal e a eficiência da transmissão (*throughput*). Por exemplo, um *throughput* de 57.600 bps no canal telefônico pode ser obtido empregando um MODEM com apenas 14.400 bps (norma V.32bis CCITT). Isto não significa que o número de bits por segundo que transita no canal é superior à capacidade: O uso de técnicas de codificação de fonte (Compressão de dados) permite aumentar a taxa na entrada do Modem. A velocidade da transmissão continua exatamente 14,4 kbps. Entretanto, para o usuário, tudo se passa como se a transmissão fosse numa taxa bem mais elevada, de até 57.600 bps, dependendo dos dados. Com relação a implementação, recomenda-se comentar e distribuir dados técnicos sobre MODEMs em único *chip* (MOTO 93) e em mais alto nível, (KATO *et al.* 91, WOE *et al.* 94).

BIBLIOGRAFIA E REFERÊNCIAS SELECIONADAS

[GAL 68] R.G. Gallager, "*Information Theory and Reliable Communication*", NY:Wiley, 1968.

[UNG 82] G. Ungerboeck (1984 Info. Theory Society Paper Award), "Channel Coding with Multilevel/phase Signals", *IEEE Trans. Info. Theory*, **IT 28**, n.1, Jan., 1982, pp.55-67.

[MILL 84] S. Millman (Ed.), "*A History of Engineering and Science in the Bell Systems: Communications Science (1925-1980)*", Indianapolis: AT&T Tech., 1984.

- [CAM&GLA 62] C.N. Campopiano and B.G. Glazer, "A Coherent Digital Amplitude and Phase Modulation Scheme", *IRE Trans. Commun. Syst.*, **CS 10**, n.1, Mar., 1962, pp.90-95.
- [PRO 89] J.G. Proakis, "*Digital Communications*", NY: McGraw-Hill, 2nd Ed., 1989.
- [HOL 77] J.L. Holsinger, "Where are Modems Going?", *IEEE Commun. Mag.*, Sept., 1977, pp.3-5, 10.
- [NYM *et al.* 82] H. Nyman, F. Salcedo, J.T.L. Sharpe and C.W. Tarry, "Evolution des Modems pour la Transmission de Données", *Révue des Télécomm.*, **57**, n.3, 1982, pp.187-194.
- [FOR *et al.* 84] G.D. Forney Jr, R.G. Gallager, G.R. Lang, F.M. Longstaff and S.Q. Qureshi, "Efficient Modulation for Band-Limited Channels", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, **SAC 2**, n.5, Sept., 1984, pp.632-646.
- [UNG 87a,b] G. Ungerboeck, "Trellis-Coded Modulation with Redundant Signal Sets". Part I: Introduction, *IEEE Commun. Mag.*, **25**, n.2, Feb., 1987, pp.5-11. Part II: State of the Art, pp.12-21.
- [WEI 84] L-F. Wei, "Rotational Invariant Convolutional Channel Coding with Expanded Signal Space", *IEEE Select. Areas Commun.*, **SAC 2**, n.5, Sept., 1984, pp.659-686.
- [CON&SLO 88] J.H. Conway and N.J.A. Sloane, "*Sphere Packings, Lattices and Groups*", NY: Springer-Verlag, 1988
- [WEI 87] L-F. Wei (1989 Info. Theory Society Paper Award), "Trellis-Coded Modulation with Multidimensional Constellations", *IEEE Trans. Info. Theory*, **IT 33**, n.4, July, 1987, pp.483-501.
- [PAH&HOL 88] K. Pahlavan and J.L. Holsinger, "Voice-Band Data Modems- A Historical Review 1919-1988", *IEEE Comm. Mag.*, pp. 16-27, 1988.
- [HAR 28] R.V.L. Hartley, "Transmission of Information", *Bell Syst. Tech. J.*, **7**, 1928, pp.535-563.
- [NYQ 24] H. Nyquist, "Certain Factors Affecting Telegraph Speed", *B.S.T.J.*, Apr., 1924, pp.324-346.
- [NYQ 28] H. Nyquist, "Certain Topics in Telegraph Transmission Theory", *Trans. of the A.I.E.E.*, **47**, 1928, pp.617-644.
- [STE 87] M. Stein, "*Les MODEMS pour Transmission de Données*", Paris: Masson et CNET-ENST, 1987.
- [BIN 1988] J.A.C. Bingham, "*The Theory and Practice of MODEM design*", NY: Wiley, 1988.
- [HIR 1985] B. Hirosaki, "A 19.2 kbps Voice-Band data Modem Based on Orthogonally Multiplexed QAM Techniques", *Proc. Int. Conf. Commun.*, ICC'85, Jun. Chicago, 1985, pp. 21.1.1-21.1.4.
- [HIR 1981] B. Hirosaki, "An Orthogonal Multiplexed QAM System Using Discrete Fourier Transform", *IEEE Trans. Commun.*, **29**, n.7, July, 1981, pp.982-989.
- [TAN *et al.* 87] Y. Tanaka, S. Unagami, T. Kinoshita, T. Kaku and Y. Arai, "A 19.2 kB/S High-Speed Voiceband Data Modem based on Eight-Dimensional Trellis Coding", *IEEE Global Telecomm. Conf., GLOBECOM 87 Proc.*, vol **2**, Tokyo, pp. 36.1.1-36.1.5, 1987.
- [BAU&MIT 89] G. Baudoin et M.S. Mitrani, "TELSAT 19250: MODEM à 19200 bits/s sur Circuit Téléphonique", *Commutation & Transmission*, **2**, 1989, pp.73-84.
- [LAN&LON 89] G.R. Lang and F.M. Longstaff, "A Leech Lattice MODEM", *IEEE J. Select. Areas Commun.*, **SAC 7**, n.6, Aug., 1989, pp.968-973.
- [deO&BAT 90] H.M. de Oliveira and G. Battail, "A Capacity Theorem for Lattice Codes on Gaussian Channels", *Proc. IEEE/SBT Int. Telecommun. Symp.*, ITS'90, Sept., Rio de Janeiro, Brazil, 1990, pp. 1.2.1-1.2.5.

- [JER 77] A.J. Jerry, "The Shannon Sampling Theorem- its various extensions and Applications: A Tutorial Review", *Proc. IEEE*, **65**,n.11,1977,pp.1565-1596.
- [WYN 65] A.D. Wyner, "The Capacity of the Band-Limited Gaussian Channel", *Bell Syst. Tech. J.*, **45**,Mar.,1965,pp.359-371 also Key Papers in "The Develop. of Info. Theory", NY:IEEE Press,1973.
- [COV&THO 91] T. Cover and J. Thomas, "*Elements of Information Theory*", Wiley,1991,p.250.
- [BER *et al.* 93] C. Berrou, A. Glavieux and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo Codes", *proc. Int. Commun. Conf.*, ICC'93, Geneve, May, 1993, pp.1064-1070.
- [TEL 95] TELECOM, *Jornal de Telecomunicações*, Ano 8, jun.1995, p.25
- [deO&BAT 92] H.M. de Oliveira and G. Battail, "On Generalized Constellations and the Opportunistic Secondary Channel", *Ann. Télécomm.*, **47**,n.5-6,1992,pp.202-213.
- [MOTO 93] Motorola Databook, Commun. Device data, Motorola Inc., 1993.
- [KATO *et al.* 91] S. Kato, M. Morikura and S. Kubota, "Implementation of Coded Modems", *IEEE Comm. Mag.*, Dec. , pp.88-97, 1991.
- [WOE *et al.* 94] B.D. Woerner, J.H. Reed and T.S. Rappaport, "Simulation Issues for Future Wireless Modems", *IEEE Comm. Mag.*, July, pp. 42-53,1994.
- [HELD 92] G. Held, "*MODEM: O guia de Referência Completo*", SP: Ed. Campus, 1992.