Modulação Codificada para Comunicações Ópticas

Cristiano M. Gallep, Jaime Portugheis, Leonardo L. Bravo-Roger, Marcos S. Gonçalves,
Rangel Arthur e Felipe K. G. Hoshino

***Resumo* — Modulação codificada é uma ferramenta básica para simultaneamente melhorar o desempenho e aumentar a eficiência espectral de um sistema de transmissão digital. Nos últimos anos vários esquemas de modulação codificada foram propostos como candidatos a serem utilizados em sistemas de transmissão óptica que operam com eficiências espectrais altas. O objetivo deste artigo é discutir estes esquemas e comentar sobre desafios peculiares de projeto e implementação dos mesmos.**

Palavras-Chave* — *Sistemas de transmissão óptica, alta eficiência spectral, modulação codificada.

***Abstract*— Coded modulation is a basic tool to simultaneously improve performance and increase the spectral efficiency of a digital transmission system. In recent years various coded modulation schemes have been proposed as candidates for use in optical transmission systems that operate with high spectral efficiency. The aim of this paper is to discuss and comment on unique challenges of designing and implementing these schemes.**

Keywords* — *Optical transmission systems, high spectral efficiency, coded modulation.

I. INTRODUÇÃO

Um projetista de um sistema de transmissão digital utiliza o plano de eficiência espectral [1] para visualizar da melhor maneira o compromisso entre diferentes objetivos de projeto. A região do plano em que a eficiência espectral (em bits por segundo por Hz) é maior que a unidade é caracterizada como uma região de sistemas limitados em faixa. Um exemplo de tais sistemas é o sistema de telefonia fixa que utiliza o par trançado como canal físico de comunicação.

No final da década de 1970, a indústria de telecomunicações se viu pressionada a aumentar a taxa de transmissão de informação utilizada nestes canais telefônicos. A resposta a esta pressão foi o aparecimento da ferramenta de projeto de um sistema de transmissão digital conhecida como modulação codificada [2], [3]. O projeto conjunto da modulação e da codificação de canal permitiu um aumento da eficiência espectral dos sistemas de telefonia fixa e simultaneamente uma melhora de desempenho dos mesmos. Assim, em 2000 modems foram desenvolvidos operando com eficiências espectrais altas que se aproximavam da capacidade prevista por Shannon em 1948 [4].

O tráfego de informação pela Internet vem aumentando vertiginosamente de ano a ano [5] e consequentemente pressionando a indústria de telecomunicações a aumentar a taxa de informação dos sistemas de transmissão em redes de fibra óptica. Para isto seria possível aumentar a largura de faixa utilizada (considerando que a fibra não é um sistema de faixa limitada). Ou seria possível aumentar a eficiência espectral do sistema ou mesmo combinar um pouco de ambos. Considerando que estes sistemas de transmissão óptica utilizam multiplexação por divisão no comprimento de onda (WDM, do inglês Wavelength Division Multiplexing), em geral a solução mais econômica é o aumento da eficiência espectral [6].

É evidente que antes de se imaginar em projetar um sistema de modulação codificada com alta eficiência espectral, um grande esforço de pesquisa e desenvolvimento de transmissores para modulações não binárias teve que ser realizado [7], [8], [9], [10],[11]. Neste esforço foram consideradas modulações com detecção coerente como também com codificação e decodificação diferencial. A título de exemplo, as Figuras 1 e 2 mostram um transmissor e um receptor ópticos, respectivamente. A Figura 1 mostra um transmissor para a constelação 16- QAM mas a configuração pode ser considerada para outras modulações bi-dimensionais. A portadora óptica é dividida entre os dois moduladores Mach Zehnder (MZM). Em cada modulador o sinal óptico é dividido, e então é modulado de acordo com os sinais vindo do codificador 16-QAM. Um sinal óptico de modulação multi-nível pode ser detectado por um receptor I-Q homódino, cuja configuração geral é representada na Figura 2.

II. CODIFICAÇÃO DE CANAL

Codificação de canal em transmissão óptica impõe um desafio ao projetista do sistema. Ele deve garantir simultaneamente: a) uma taxa de transmissão de informação alta (atualmente além de 100 Gb/s por comprimento de onda); b) uma taxa de codificação alta (vazão do sistema deve ser alta); c) e também trabalhar com probabilidade de erro muito baixa numa razão sinal-ruído baixa [12].

Dadas as características b) e c), a escolha natural está na utilização de códigos de bloco pois eles possuem melhor desempenho que os códigos convolucionais. Assim, códigos de bloco Reed-Solomon (que utilizam alfabeto não-binário) foram os primeiros a serem utilizados. Num segundo momento, concatenação de códigos de bloco, como por exemplo Reed-Solomon e BCH, foi utilizada.

No início da década de 1990 ocorreu o aparecimento da concatenação paralela de códigos convolucionais recursivos e de um algoritmo de decodificação iterativa denominado de decodificação turbo [13]. Esta concatenação de códigos foi denominada de códigos turbo e o desempenho de sua decodificação iterativa demonstrou se aproximar da capacidade de um canal com ruído aditivo Gaussiano. No final da década de 1990, códigos de bloco turbo construídos com a concatenação de códigos produto (TPC, do inglês Turbo Product Code) foram propostos e logo considerados para

Os autores são filiados à Faculdade de Tecnologia da Unicamp, Limeira, SP. Emails:<gallep,jaime,leobravo,marcos,rangel>@ft.unicamp.br,felipekojihoshino@gmail.com

utilização em transmissão óptica DWDM de longo percurso [14], [15].

Com a redescoberta de códigos de bloco com matriz de paridade de densidade baixa (LDPC, do inglês Low Density Parity Check) [16] e a possibilidade de decodificação iterativa dos mesmos, as pesquisas se voltaram para sua utilização em transmissão óptica [17]. Códigos LDPC demonstraram possuírem patamares de erro (do inglês, "error floor") mais baixos do que os TPCs o que os torna bons candidatos para a característica c) descrita acima. Além disso, eles também demonstraram serem mais imunes a efeitos de quantização das saídas dos demoduladores.

A característica a) descrita acima favorece o uso de decisão abrupta nas saídas dos demoduladores. Recentemente um esquema prático de modulação codificada com decisão abrupta foi proposto em [18].

III. MODULAÇÃO CODIFICADA

A consideração do processo de codificação de canal e modulação como uma entidade única foi proposta para um codificador convolucional binário em [3]. Anteriormente, um esquema de modulação codificada multinível havia sido proposto em [2]. Neste esquema vários codificadores binários (convolucionais ou de bloco) são utilizados no transmissor: um para cada bit do rotulamento binário de um sinal da modulação. No receptor, uma decodificação multi-estágio, em que os níveis são decodificados sequencialmente, possui baixa complexidade de implementação e desempenho muito próximo ao de uma decodificação em que todos os códigos componentes binários seriam decodificados conjuntamente [19]. Uma desvantagem da decodificação multi-estágio reside no fato de que o atraso introduzido por ela pode ser proibitivo. Uma solução que pode diminuir significativamente este atraso foi proposta em [20],[21]. A Figura 3 é uma representação esquemática da decodificação multi-estágio, onde cada código componente é decodificado com 3 iterações. A Figura 4 é uma representação esquemática do algoritmo proposto em [21]. A paralelização das iterações permitiu uma redução do atraso de decodificação (de 9D para 5D).

Uma abordagem pragmática da modulação codificada foi proposta em [22]. Ela utiliza apenas um codificador binário e separa o processo de codificação e de modulação através de uma permutação obtida por entrelaçamento. Esta separação induz uma pequena perda em desempenho. Entretanto, esta perda pode ser compensada através da aplicação no receptor de um processo iterativo de demodulação e decodificação [23].

Além de permitir o projeto de um sistema de transmissão digital operando com eficiência espectral alta, modulação codificada possui uma vantagem adicional: por permitir aumentar a duração do tempo de um símbolo da modulação, simplifica o controle de algumas distorções existentes na transmissão de informação em altas taxas [24].

IV. OFDM ÓPTICO

A Multiplexação por Divisão em Frequência Ortogonal (OFDM, do inglês Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), é uma técnica de transmissão multiportadora, na qual a informação é transmitida através de várias subportadoras de menor taxa de transmissão [25],[26],[27]. Com o avanço das tecnologias de processadores digitais de sinais, OFDM tem sido aplicada em vários padrões de redes sem fio e rádio-difusão de áudio e vídeo digitais. O modem OFDM pode ser implementado sem o uso real de subportadoras através da Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT, do inglês Inverse Discrete Fourier Transform) e da Transformada Discreta de Fourier (DFT, do inglês Discrete Fourier Transform), que por sua vez podem ser realizadas através de algoritmos rápidos. OFDM é utilizado não só em comunicação óptica coerente mas também em sistemas de detecção direta que envolve a modulação por intensidade [25].

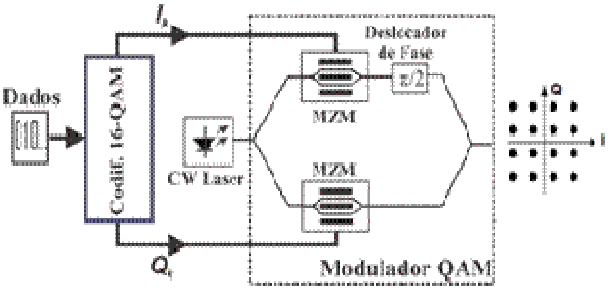

Fig. 1. Transmissor óptico para modulação QAM.

A extensão da técnica OFDM para MIMO-OFDM (do inglês, Multiple Input Multiple Output) não foi ainda proposta para fibras multimodo mas foi aplicada com sucesso em fibras monomodo, utilizando ambas as polarizações da fibra. Nesse contexto, MIMO-OFDM é também chamada de multiplexação de polarização [25].

Em relação à modulação por intensidade, este formato de modulação oferece uma tolerância melhor aos efeitos da dispersão, mais canais por fibra óptica em um sistema DWDM e menor demanda de banda para os circuitos eletrônicos e ópticos. Porém, OFDM apresenta algumas desvantagens como a alta razão de potência de pico por potência média (PAPR, do inglês Peak to Average Power Ratio) e sensibilidade a ruído de fase e de freqüência [28].

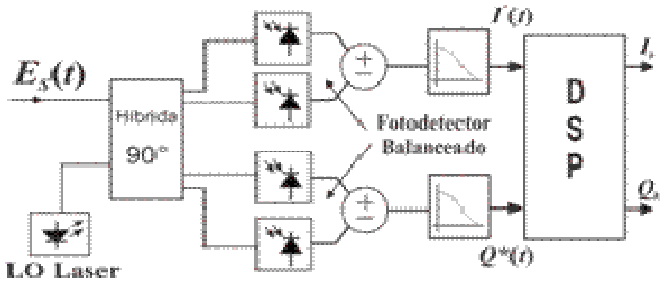

Fig. 2. Receptor I-Q heteródino.

Num sistema de transmissão óptico e na presença da PAPR, os efeitos não lineares que podem deteriorar a eficiência do OFDM são a auto-modulação de fase (SPM, do inglês Self-Phase Modulation) e a mistura de quatro ondas (FWM, do inglês Four-Wave Mixing). A SPM e a FWM são não linearidades geradas nas fibras ópticas devido ao efeito Kerr. No caso da SPM, as variações temporais do índice de refração em função da intensidade óptica causam um deslocamento na fase instantânea do pulso, provocando um deslocamento na frequência do sinal óptico. Enquanto que a FWM ocorre quando pelo menos duas subportadoras de diferentes frequências criam outras duas adicionais componentes de frequência [29].

A fim de minimizar os efeitos provocados pela SPM e a FWM, diversos métodos foram criados para a redução da PAPR. Estes métodos podem se classificados em dois grupos [30]. No primeiro grupo, o sinal é manipulado de forma que os picos de potências são removidos. Esquemas que adicionam redundância no sinal, criando assim um grau de liberdade para remodelar o sinal ou para substituir símbolos do OFDM que apresentam a PAPR, formam o segundo grupo [30], [31].

Além das fibras ópticas, o outro meio que recentemente tem se destacado em comunicações ópticas é o espaço livre. Embora os efeitos não lineares provocados pelo efeito Kerr são desprezados, o espaço livre pode sofrer outros efeitos. Para comunicações em ambientes externos em longas distâncias deve ser considerado as variações temporais do índice de refração da atmosfera, conhecido como turbulência atmosférica [32].

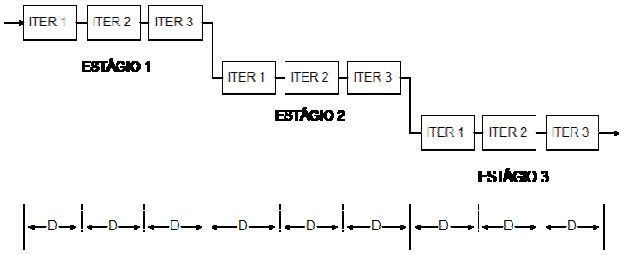

Fig. 3. Decodificação multi-estágio cujos códigos componentes são decodificados iterativamente.

Em particular a troposfera, é o meio no qual se propaga o feixe de laser. Trata-se de um meio dinâmico, onde a composição química, a temperatura, a umidade e a pressão do ar sofrem mudanças contínuas no tempo, ao longo do caminho do feixe de propagação. Chuva, nevoeiro, neblina, neve, e outras condições tem um efeito adverso sobre o feixe óptico e consequentemente sobre o sinal de comunicação. As turbulências atmosféricas causam flutuações de irradiância, conhecidas como cintilação, sobre os sinais recebidos de propagação ao longo de um percurso horizontal perto do solo.

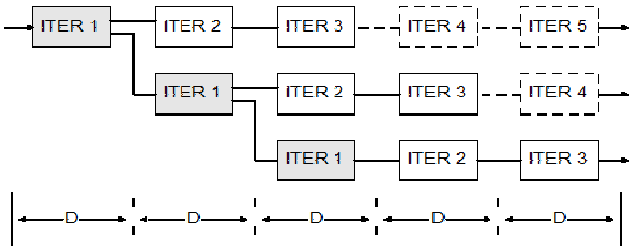

Fig. 4. Algoritmo de decodificação multi-estágio proposto em [20],[21].

Por outro lado a presença de multipercursos é inerente a propagação por espaço livre. No estágio atual da tecnologia, a aplicação do OFDM nos sistemas ópticos por espaço livre, tem se mostrado eficiente por ser um método de múltiplas portadoras que reduz as interferências dos múltiplos percursos e pode ser otimizado para operar com sucesso em canais turbulentos.

V. CONCLUSÕES

Nas seções anteriores descrevemos sucintamente alguns aspectos do projeto de sistemas de transmissão óptica utilizando modulação codificada. Iremos discutir sobre os mesmos na sessão especial de "posters" deste simpósio.

REFERÊNCIAS

[1] B. Sklar, Digital Communications: Fundamentals and Applications, Prentice-Hall, 1988.

[2] H. Imai and S. Hirakawa, "A new multilevel coding method using errorcorrecting codes," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 23, pp. 371–377, May 1977.

[3] G. Ungerboeck, "Channel Coding With Multilevel/Phase Signals.," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 28, no. 1, pp. 55–66, 1982.

[4] T. M. Cover and J. A. Thomas, Elements of information theory. Wiley New York, 2nd ed., 2006.

[5] I. Djordjevic, W. Ryan, B. Vasic, Coding for Optical Channels, Springer, 2010.

[6] J. Kahn and K.-P. Ho, "Spectral Efficiency Limits and Modulation/Detection Techniques for DWDM Systems," IEEE JSTQE, VOL. 10, NO. 2, pp. 259-272, March/April 2004.

[7] P. J.Winzer e R. Essiambre, "Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks", J. Lightwave Technol, vol. 24, no 12, pp. 4711-4728, 2006.

[8] R. A. Griffin, "Integrated DQPSK Transmitters", Optical Fiber Communications Conference (OFC/NFOEC), vol. 3, 2005.

[9] K. P. Ho, "Phase Modulated Optical Communication Systems", Springer, New York, EUA, 2005.

[10] P. Rocha, C. M. Gallep e E. Conforti, Evaluation of NRZ-DQPSK Signals Amplified by Semiconductor Optical Amplifier, SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2011, Natal, 2011.

[11] P. Rocha, C. M. Gallep e E. Conforti, Degradação do Sinal NRZ-DQPSK em Amplificadores Ópticos a Semicondutor, MOMAG 2012, João Pessoa, 2012, aceito.

[12] S. Benedetto and G. Bosco, Channel Coding for Optical Communications, pp. 64-78, Springer, 2005.

[13] C. Berrou and A. Glavieux, "Near optimum error correcting coding and decoding: Turbocodes," IEEE Trans. Commun., vol. 44, pp. 1261–1271, Oct. 1996.

[14] R. Pyndiah, "Near-optimum decoding of product codes: block turbo codes," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 46, no. 8, pp. 1003–1010, Aug. 1998.

[15] O. AitSab and V. Lemaire, "Block turbo code performance for long-haul DWDM optical transmission systems," in Proc. OFC 2000, pp. ThS5-1–TuS5-4, Mar. 2000.

[16] D. Mackay, Information Theory, Inference and Learning Algorithms, Cambridge, 2003.

[17] B. Vasic and I. B. Djordjevic, "Low-density parity check codes for long haul optical communications systems," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 14, no. 8, pp. 1208–1210, Aug.2002.

[18] B. P. Smith, F. R. Kschischang, A Pragmatic Coded Modulation Scheme for High-Spectral-Efficiency Fiber-Optic Communications, ArXiv, 2012.

[19] J. Portugheis, Generalised Concatenated Codes for M-PSK Modulation, Tese de Doutorado, Technical University of Darmstad, Germany, 1992.

[20] M. E. Pellenz, Esquemas de Modulação Codificada com Proteção Desigual de Erros, Tese de Doutorado, Unicamp, Brasil, 2000.

[21] M. E. Pellenz and J. Portugheis, Multistage Turbo Decoding for Multilevel Superposition Coded Modulation Schemes, IEEE Int. Symp. on Inf. Theory, p. 221, 2000.

[22] E. Zehavi, "8-PSK trellis codes for a Rayleigh channel," IEEE Trans. Commun., vol. 40, no. 5, pp. 873–884, 1992.

[23] A. G. i F., A. Martinez and G. Caire, Bit-Interleaved Coded Modulation, Now Publishers.

[24] M. Arabaci, I. B. Djordjevic, R. Saunders, and R. M. Marcoccia, Nonbinary Quasi-Cyclic LDPC-Based Coded Modulation for Beyond 100-Gb/s Transmission, IEEE Photonics Letters, vol. 22, n. 6, pp. 434-436, March, 2010.

[25] J. Armstrong. OFDM for Optical Communications, Lightwave Technology, Journal of, 27(3):189 –204, Feb.1, 2009.

[26] R. Arthur, Novas propostas para otimização de receptores de TV Digital baseados em OFDM em ambientes de redes de frequência única regionais, Tese de Doutorado, Unicamp, 2007.

[27] R. Arthur, Y. Iano, R. F. Larico, L. H. Bonani, D. C. Gara, Nova técnica para sincronismo em tempo e frequência de sinais OFDM baseada em reconhecimento de padrões, XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Rio de Janeiro, 2008.

[28] Y. London and D. Sadot, "Nonlinear effects mitigation in coherent optical OFDM system in presence of high peak power", IEEE/OSA J. Lightwave Technol., vol. 29, no. 21, pp. 3275-3281, 2011.

[29] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, 4th ed., Netherlands: Elsevier, 2008.

[30] B. Goebel, S. Hellerbrand, N. Haufe, and N. Hanik, "PAPR reduction techniques for coherent optical OFDM transmission," in Proc. ICTON 2009, Jul. 2009.

[31] S. H. Han and J. H. Lee, "An overview of peak to average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission,"Wireless Commun., pp. 56–65, Apr. 2005.

[32] A. Bekkali et al., "Transmission Analysis of OFDM-Based Wireless Services Over Turbulent Radio-on-FSO Links Modeled by Gamma–Gamma Distribution", IEEE Photonics Journal, vol. 2, no. 3, pp. 510-20, 2010.