

Perspectivas de Códigos Polares para Sistemas de Comunicações Celulares de Quinta Geração

Valdemar C. da Rocha Jr.¹ e Maria de Lourdes M. G. Alcoforado²

¹ Grupo de Pesquisa em Comunicações - CODEC, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 50740-550

² Grupo de Comunicações (GCOM), Laboratório de Telecomunicações (LABTEL), Universidade de Pernambuco, Recife, PE, 50750-470

E-mail: vcr@ufpe.br, mlmga@poli.br

Resumo—Este artigo apresenta uma narrativa de natureza essencialmente histórica e tutorial sobre códigos polares e sua aplicação nos sistemas de telefonia celular de quinta geração.

Palavras-chave—Códigos polares, telefonia celular, sistemas 5G, códigos LDPC.

I. INTRODUÇÃO

HÁ mais de vinte anos que os códigos corretores de erros são os principais responsáveis pelo progresso da comunicação sem fio, em especial na tecnologia da camada denominada *link layer* [1]. A codificação para controle de erros representa a parte mais complexa do processamento em banda básica e também aquela que mais consome energia em um telefone celular. Pode-se dizer que foram os códigos turbo os responsáveis por tornar realidade a terceira geração de redes celulares (3G) [1]. Já a quarta geração (4G) beneficiou-se também dos códigos LDPC (Low Density Parity Check) [1] tornando possível aquilo que atualmente é referido como a experiência multimídia.

Códigos corretores de erros, modulação e esquemas de multiplexação são pontos importantes na negociação para estabelecer padrões tecnológicos a cada nova geração. Por razões históricas, os códigos turbo sempre foram associados a uma tecnologia europeia e foi onde muitas das companhias europeias apostaram suas fichas, incluindo a empresa Orange, detentora atual de várias das patentes de códigos turbo, e outras empresas como a Ericsson e a Nokia. De um modo análogo, códigos LDPC têm sido vistos como uma tecnologia prioritariamente norte-americana, tendo grande apoio de grandes empresas dos EUA, inclusive da Qualcomm. Já os códigos polares destoam um pouco desta forma de visão geográfica.

Códigos polares foram inventados na Turquia em 2008, pelo Professor Erdal Arikan, um ex-aluno do Professor Gallager, criador dos códigos LDPC. No que diz respeito à empresa Huawei, códigos polares indicam terem sido adotados como uma tecnologia asiática, visto que a Turquia é um país localizado em parte no continente europeu e em parte no continente asiático. Já há bastante tempo que a Huawei vem

promovendo os códigos polares, tendo recentemente reivindicado a implementação prática de códigos polares com baixa complexidade, tendo atingido em testes de campo a velocidade de *downlink* de 27 gigabytes por segundo em um ambiente específico para aparelhos celulares [2]. A Huawei é uma das muitas empresas chinesas a mostrar suas ambições na quinta geração de redes celulares (5G). As operadoras de telecomunicações na China também estão se preparando para o lançamento da próxima geração de rede móvel, prevista para 2020, através da criação de centros de inovação em Qingdao, província de Shandong, no leste da China.

Assim sendo, é possível que a decisão por 5G sinalize um desvio de novos padrões tecnológicos para o lado da Ásia, sem se perder de vista o fato de que códigos LDPC serão usados no canal de dados. Este é um caso clássico de compromisso de padronização. Não parece natural a colocação de duas técnicas de codificação distintas em um mesmo *chip* caso não fossem essenciais, porém este caso ilustra muito bem como são costurados os acordos de padronização internacional.

O restante deste artigo está organizado do seguinte modo. A Seção II trata de códigos corretores de erros, com ênfase nos códigos turbo, códigos LDPC e códigos polares. A Seção III e a Seção IV tratam da luta das empresas chinesas pelo padrão 5G. A Seção V comenta sobre a perspectiva dos Estados Unidos da América (EUA) e da União Europeia (EU) frente à China, na disputa tecnológica da telefonia celular. A Seção V discorre sobre um possível futuro para os códigos polares e este artigo se encerra na Seção VI com algumas conclusões.

II. CÓDIGOS CORRETORES DE ERROS

Na atualidade, em função da grande demanda por maiores taxas de transmissão em equipamentos móveis, em especial telefones celulares, existe um foco centrado em códigos corretores de erros de alto desempenho que considera os códigos LDPC, os códigos turbo e os códigos polares. Estes três grupos de códigos são os grandes competidores no estabelecimento do padrão 5G.

Os códigos LDPC foram propostos por R. G. Gallager em 1962 [3] e ficaram quase duas décadas no esquecimento. Em 1981 R. M. Tanner [4] introduziu uma representação gráfica de códigos de bloco lineares por meio de grafos biparticionados

que possibilitou a redescoberta dos códigos LDPC em 1996 [5].

Os códigos turbo foram apresentados à comunidade de comunicações em 1993 por Berrou, Glavieux e Thitimajshima [6] e situam-se entre os melhores códigos corretores de erros conhecidos na atualidade, sendo empregados em sistemas de comunicações móveis [7], com excelente desempenho para uma baixa relação sinal ruído [8].

Códigos polares foram propostos em 2008 por Erdal Arikan e publicados em 2009 [9], introduzindo o conceito de polarização de canal. Estes códigos têm como característica importante a complexidade linear tanto de codificação como de decodificação e, quando usados com o algoritmo de decodificação por cancelamentos sucessivos, podem alcançar a capacidade em canais discretos sem memória a partir do aumento do comprimento de bloco n do código [9], [10].

Em aplicações práticas, por exemplo em comunicações móveis, onde há limitação de capacidade de processamento e de gastos com energia e potência, apresentar um melhor desempenho com um baixo número de iterações é uma característica extremamente desejável para um código corretor de erros.

A. Códigos LDPC

Passados 15 anos da publicação do trabalho de Gallager [3], quando já haviam sido introduzidos os códigos turbo [6], Mackay e Neal [5] demonstraram que é possível atingir uma probabilidade de erro muita próxima do limite de Shannon com códigos LDPC longos e decodificados usando o algoritmo Soma-Produto [3] para canais com ruído aditivo Gaussiano branco. Avanços tecnológicos vieram com simplificações do algoritmo Soma-Produto e o surgimento de novas técnicas de construção dos códigos LDPC, fazendo uso de métodos algébricos e geométricos [11] - [14].

B. Códigos Turbo

Os códigos turbo são construídos a partir da concatenação paralela de dois ou mais codificadores sistemáticos, separados por um entrelaçador. Os codificadores operam sobre os mesmos blocos de dígitos de informação de entrada [6], [8]. O decodificador turbo utiliza o princípio da decodificação iterativa e consiste de dois decodificadores concatenados em série, separados por um entrelaçador. São também possíveis de uso vários outros tipos de entrelaçadores e desentrelaçadores, responsáveis por adequar a saída de um decodificador ao formato esperado do outro [6].

C. Códigos Polares

O código polar é um código de bloco linear que utiliza a técnica denominada de *polarização de canal*, a qual consiste em construir n canais polarizados a partir de n cópias independentes e idênticas, formadas por n canais com entrada binária, discretos e sem memória, em que n denota o comprimento da palavra código. Os canais são polarizados de modo a convergirem para canais totalmente ruidosos ou canais sem ruído, à medida que é aumentado o comprimento das palavras-código. Assim, pode-se ter uma taxa de transmissão que

se aproxima da capacidade do canal, escolhendo apenas os canais sem ruído para transmitir a informação. Para um bloco de comprimento finito n , isto implica em escolher k canais polarizados (virtualmente sem ruído) para enviar informação, de um total de n canais, enquanto os $n-k$ canais restantes são usados para enviar *bits* com valores fixos quaisquer, podendo ser todos com valor igual a 0 [9], [10]. A forma de como e quais são os canais selecionados para transmitir informação define o código polar [9].

O modelo básico para construção da polarização de canal é ilustrado na Fig. 1, na qual o valor inicial é $n = 2$, porém em geral n pode assumir qualquer valor da forma $n = 2^m$, para $m \geq 1$.

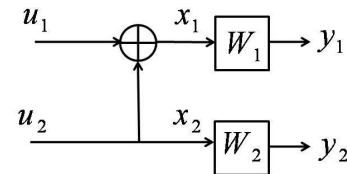


Figura 1. Bloco empregado para construção do código polar em que $n = 2$.

Uma palavra código \mathbf{x} é gerada através de

$$\mathbf{x} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F}^{\otimes m} \cdot \mathbf{u},$$

em que \mathbf{u} denota um vetor mensagem com k dígitos e \mathbf{G} denota a matriz geradora $k \times n$ do código e é representada pelo produto de Kronecker $\mathbf{F}^{\otimes m}$, em que $\mathbf{F}^{\otimes} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$.

Na decodificação por cancelamentos sucessivos a estimação do bit de mensagem u_i , $1 \leq i \leq n$, segue uma ordem específica e é feita *bit a bit* através do logaritmo da razão de verossimilhança (LLR), da direita para a esquerda no circuito correspondente. Após a estimação por decisão suave ser feita, é realizada a propagação da esquerda para a direita do *bit* estimado, seguindo o circuito, para que auxilie nos próximos *bits* a serem decodificados [15].

Resumindo, o núcleo da estrutura de códigos polares consiste no processamento de polarização do canal, no lado da codificação. O método de codificação para cada sub-canal apresenta confiabilidades diferentes. Quando o comprimento do código continua a aumentar, cada sub-canal, que faz parte do conjunto de sub-canais sem erros, atinge uma capacidade próxima a um, e os demais sub-canais tendem cada um deles a um canal de ruído puro com uma capacidade próxima a zero. Escolhe-se transmitir a informação diretamente nos sub-canais com capacidade próxima de 1, aproximando-se assim da capacidade de canal. No lado da decodificação, os dados no canal após a polarização podem ser recuperados por um simples método de decodificação por cancelamento sucessivo de interferência, com baixa complexidade de implementação e com desempenho próximo ao de um decodificador ideal.

III. AS EMPRESAS CHINESAS NA BATALHA DO 5G

As firmas chinesas apostaram sua reivindicação na construção de padrões globais para os sistemas 5G, após os códigos polares ganharem maior status ao serem promovidos

por empresas chinesas. Especialistas disseram [2] ser esta a primeira vez que as empresas chinesas conseguiram influenciar em padrões globais de telecomunicações a partir de tecnologia desenvolvida em casa.

Durante o encontro No.87 RAN1 promovido pelo grupo do 3rd Generation Partnership Project (3GPP), que é uma organização internacional de padronização, no estado de Nevada, EUA, os códigos polares foram definidos por participantes do mundo inteiro como o esquema de codificação para o canal de controle para aplicação de 5G no cenário da banda larga móvel melhorada (eMBB), de acordo com matéria divulgada pelo grupo de promoção do 5G com base na China, denominado IMT-2020. Com esta decisão é possível que firmas chinesas venham ter alguma vantagem competitiva no âmbito da eMBB, a qual cobre o acesso à Internet com altas taxas de dados, envolvendo armazenamento em nuvem, aplicações de mídia e de realidade aumentada para entretenimento.

As partes concorrentes dos EUA e da UE têm comumente sido as líderes na definição de padrões de redes, fato este que tornou quase impossível para as empresas chinesas obterem uma maior participação no mercado da Internet móvel em gerações anteriores, conforme afirmou recentemente Xiang Ligang, diretor executivo do portal da indústria de telecomunicações chinesa (cctime.com) [2].

IV. A CORRIDA DA CHINA PARA O 5G

O *IMT-2020 5G Promotion Group*, fundado pelo governo chinês em 2013, deverá realizar algumas mudanças no “campo de batalha” do padrão global de redes. Este grupo é formado por algumas dezenas de instituições e empresas como, por exemplo, a Huawei Technologies Co, ZTE, Xiaomi Inc e as três operadoras pertencentes ao governo, com o objetivo de tornar uma realidade o padrão 5G para os consumidores chineses pelo ano de 2020.

O sucesso da adoção dos códigos polares em um padrão internacional é sem dúvida um marco para as normas de telecomunicações apoiadas pela China, como afirmou Wang Yanhui [2], diretor da Mobile China Alliances, com base em Shanghai. Meios de comunicação, incluindo o China News Service, relataram em novembro de 2016 que os códigos polares, apoiados pela China, haviam sido escolhidos ao invés de códigos LDPC, com o apoio da empresa norte-americana Qualcomm e da empresa francesa Turbo 2.0.

Além da correção de erros em redes móveis, os códigos polares são esperados demonstrar uma eficiência espectral três vezes maior que as tecnologias atuais de codificação de rede de acesso por rádio.

V. EUA E EU AINDA LIDERAM AS TECNOLOGIAS

Graças aos esforços da China, os códigos polares são agora uma parte crucial do desenvolvimento dos sistemas 5G, mas isso não significa que as empresas chinesas venham a ultrapassar colegas dos EUA e da UE e dominar a definição de padrões para sistemas 5G. Os códigos LDPC propostos pelos EUA, que já são amplamente utilizados para o Wi-Fi,

foram escolhidos para o esquema de codificação do canal de dados eMBB pelo grupo de trabalho 3GPP [2].

Qualcomm, atualmente o maior fornecedor mundial de chips móveis, anunciou em meados de outubro de 2016 que planeja entregar o primeiro chip para redes 5G até 2018. O fornecedor sueco da rede sem fio, Ericsson AB, que lidera os projetos de padronização 5G da UE, disse que fornecerá componentes da rede de telefonia móvel 5G ainda em 2017. A empresa de pesquisa de mercado ReportsnReports.com estimou em março de 2016 que as redes de 5G gerariam US\$ 250 bilhões em receita anual de serviços até 2025.

Recentemente, o grupo de trabalho 3GPP selecionou os códigos polares como o método de codificação oficial para as funções do canal de controle no caso de uso de banda larga móvel melhorado 5G (um dos três principais casos de uso em desenvolvimento) e a técnica LDPC foi coroada para ser o código de canal para os canais de dados. Os códigos turbo ainda não estão no jogo, pelo menos nesta rodada.

Desde o início da padronização 5G tem-se observado uma situação contenciosa entre códigos LDPC e códigos turbo, ambos lutando pela posição de principal código do canal de dados. Não faltaram porém outros competidores, como novas classes dos conhecidos códigos convolucionais e alguns novatos e inexperientes como os códigos polares, considerados para alguns como menosprezados pelo menos para sistemas 5G.

Como em toda disputa, as partes interessadas, incluindo desde adeptos de cada campo aos profissionais da tecnologia apenas assistindo esta corrida, acompanharam de perto o progresso e assumiram suas posições em ambos os lados. Tal corrida transformou-se em história em outubro de 2016.

VI. O FUTURO DOS CÓDIGOS POLARES

Antes de adentrar este assunto, aqui vão algumas considerações. Os códigos polares são verdadeiramente os primeiros códigos explicitamente comprovados com complexidade amena que podem atingir a capacidade de Shannon. Isso foi graças ao trabalho de pesquisa do Professor Erdal Arikan, cuja realização representa a resolução de um quebra-cabeça mental que já durava 60 anos e que muitos passaram toda a carreira tentando resolver. O avanço alcançado pelo professor Arikan em 2008 trouxe junto também um grande interesse pela parte acadêmica.

Porém, quando se tratou de implementação prática e candidatura como um participante em potencial no jogo de tecnologia 5G em futuro próximo, alguns desafios na implementação prática de códigos polares foram vistos por muitos como um pesado obstáculo. Grandes obstáculos aparentes podem às vezes no entanto desaparecer como que por milagre quando a política entra em jogo. Este parece ser o caso ocorrido em 13 de outubro de 2016, na reunião do grupo de trabalho 3GPP, na qual os códigos polares foram selecionados, após um forte empurrão, principalmente de representantes da tecnologia asiática liderados pela empresa Huawei.

Não é demais ressaltar que os códigos polares foram selecionados para uma tarefa talvez menos exigente, qual seja a de proteger o canal de controle, enquanto que aos códigos LDPC

coube a tarefa de proteger o canal de dados de alta velocidade. Independente da importância que seja dada a qualquer uma destas duas aplicações de códigos corretores de erros, códigos polares vieram para ficar e possivelmente todo telefone celular com certificação 5G irá operar com um módulo de código polar presente em um *chipset* interno.

Agora que há um novo participante no jogo da padronização, que claramente não é um mais um competidor menosprezado, os próximos meses deverão manter esta corrida por padronização do 5G muito interessante. Não esquecendo que este foi apenas o primeiro *round* de uma luta. Há dois outros casos de uso de códigos corretores de erros em 5G: 1) ultra-confiável e baixa latência (URLLC) e 2) comunicações-com-máquinas (MTC); e ainda não houve nenhuma decisão sobre a codificação de canais nestes dois casos. O URLLC é particularmente interessante em relação aos códigos polares porque compartilha muitos requisitos semelhantes ao caso de uso do eMBB. Possivelmente ainda haverá muito trabalho a ser feito nos códigos polares a fim de extrair todo o seu potencial na prática.

VII. CONCLUSÕES

Atualmente na indústria de telecomunicações a disputa pelo padrão 5G é o ponto mais forte. Uma vez estabelecido o padrão 5G, a indústria de telecomunicações global terá um papel preponderante no desenvolvimento desta área. O analista de telecomunicações independente Fu Liang [16] disse que os dois anos de investimento em pesquisa e desenvolvimento das empresas Huawei e ZTE indicam que no futuro a tecnologia 5G terá sempre a sombra da Huawei e da ZTE. Uma expectativa do setor industrial é de que o padrão 5G será concluído em 2018 e sistemas 5G começarão a operar comercialmente em 2020 em escala mundial.

O LDPC é liderado pela Qualcomm, bancada pela Intel, Samsung, Nokia e Verizon Telecom (Verizon) e outros gigantes. O programa Huawei Polar está mais por trás dos fabricantes chineses como, por exemplo, ZTE, Spreadtrum, milheto, OPPO, vivo, Alibaba, China Mobile, China Telecom e China Unicom. Até agora, a Huawei tem se mantido em silêncio com relação aos resultados obtidos com o esquema de código curto para o 5G.

AGRADECIMENTO

Este trabalho recebeu apoio parcial do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, Projeto No. 07467/2015-5.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Carlton, "5G and future mobile", in Networkworld, <http://www.networkworld.com/article/3151866/mobile-wireless/surprise-polar-codes-are-coming-in-from-the-cold.htm>. Consultado em março de 2017.
- [2] <http://www.globaltimes.cn/content/1019126.shtml>. Consultado em março de 2017.
- [3] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes", *IRE Transactions on Information Theory*, vol. 8, pp. 21–28, 1962.
- [4] R. Tanner, "A recursive approach to low complexity codes", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 27, no. 5, pp. 533–547, 1981.
- [5] D. Mackay and R. Neal, "Near Shannon limit performance of low density parity check codes", *Electronics Letters*, vol. 32, no. 18, p. 1645, 1996.
- [6] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-codes", in *IEEE International Conference on Communications*, Geneva, Switzerland, 1993, pp. 1064–1070.
- [7] G. Oletu, and P. Rapajic, "The performance of turbo codes for wireless communication systems", in *IEEE Conference on Computer Research and Development (ICCRD)*, Shanghai, China, 2011, vol. 4, pp. 346–349.
- [8] B. Vucetic, and J. Yuan, *Turbo Codes Principles and Applications*, Boston, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 74–231.
- [9] E. Arıkan, "Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051–3073, 2009.
- [10] E. Abbe, and A. Barron, "Polar coding schemes for the AWGN channel", in *IEEE International Symposium on Information Theory*, St. Petersburg, Russia, 2011, pp. 194–198.
- [11] A. Prabhakar and K. Narayanan, "Pseudorandom construction of LDPC codes using linear congruential sequences", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 50, no. 9, pp. 1389–1396, 2002.
- [12] Y. Kou, S. Lin and M. P. C. Fossorier, "Low-density parity-check codes based on finite geometries: A rediscovery and new results", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 7, pp. 2711–2736, 2001.
- [13] S. Johnson and S. R. Weller, "A family of irregular LDPC codes with low encoding complexity", *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 79–81, 2003.
- [14] P. R. Freitas, V. C. da Rocha Jr, and J. S. Lemos-Neto, "On the iterative decoding of binary product codes over the binary erasure channel", *Proceedings of the 8th International Symposium on Wireless Communication Systems*, Aachen, Germany, 2011, pp. 126–130.
- [15] H. Vangala, E. Viterbo, and Y. Hong, "Permuted successive cancellation decoder for polar codes", *International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA)*, Melbourne, Australia, 2014, pp. 438–442.
- [16] "China program selected 5G standard: Huawei polarization code wins control channel coding scheme", in *Vvcat it news*, <http://www.fonow.com/view/182963.html>. Consultado em março de 2017.