

Concatenação Serial de Códigos Polares e Códigos Turbo para Canais com Ruído Aditivo Gaussiano Branco

Cryslaine F. Rosal¹, Álvaro M. A. Garcia¹, Maria de Lourdes M. G. Alcoforado¹, Valdemar C. da Rocha Jr.²

Resumo—Este artigo investiga um esquema de concatenação serial de um código polar e um código turbo em presença de ruído aditivo gaussiano branco. São apresentadas curvas de desempenho com resultados de simulações computacionais. Verifica-se que, para os casos estudados com probabilidade de erro na ordem de 10^{-4} , há um ganho de mais de 1,5dB quando comparado à codificação polar.

Palavras-chave—Códigos polares, códigos turbo, ruído.

I. INTRODUÇÃO

OS Códigos turbo foram apresentados à comunidade de comunicações em 1993 por Berrou, Glavieux e Thitimajshima [1] e situam-se entre os melhores códigos corretores de erros da atualidade, sendo empregados em sistemas de comunicações móveis [2] e tendo excelente desempenho em baixa relação sinal ruído (SNR) [3].

Códigos polares (CPs) foram propostos em 2009 por Arikan [4], introduzindo o conceito de polarização de canal, os quais têm como característica a baixa complexidade de codificação e de decodificação. Quando usados com o algoritmo de decodificação por *Successive Cancellation* (SC), CPs podem alcançar a capacidade em canais discretos sem memória, a partir do aumento do comprimento de bloco n do código [5].

Apresentar um melhor desempenho com um baixo número de iterações são características extremamente desejáveis na área de comunicações móveis, onde há limitações de capacidade de processamento e de gastos com energia e potência. Nesse sentido, este artigo investiga um esquema de concatenação serial de códigos polares e códigos turbo, considerando o canal corrompido por ruído aditivo gaussiano branco (RAGB) [5], conforme ilustrado na Fig. 1.

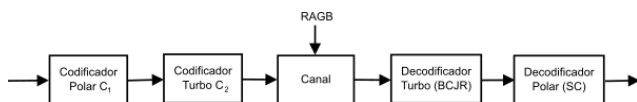


Figura 1. Esquema de concatenação serial usando código polar concatenado com código turbo.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II descreve fundamentos de CPs e da decodificação

¹ Departamento de Engenharia de Sistemas, Labetel, Gcom, Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 50720-001, E-mail: mlmga@poli.br.

² Grupo de Pesquisa em Comunicações, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, 50.740-550, Recife, PE, Email: vcr@ufpe.br.

SC, a Seção III refere-se a códigos turbo e ao decodificador proposto por Bahl, Cocke, Jelinek e Raviv (BCJR), a Seção IV apresenta o esquema de concatenação serial e resultados de simulação e, por fim, a Seção V apresenta as conclusões.

II. CÓDIGOS POLARES

O código polar é um código de bloco linear que utiliza a técnica 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 tornarem-se totalmente ruidosos ou sem ruído à medida que $n \rightarrow \infty$. Assim, pode-se ter uma taxa de transmissão equivalente à capacidade do canal escolhendo os canais sem ruído para transmitir a informação. No entanto, para um bloco de tamanho finito n é necessário escolher k canais polarizados, de um total de n canais para enviar informação enquanto os restantes $n - k$ canais são usados para enviar *bits* congelados ou fixos com valores igual a 0 [4], [5].

A construção básica de como é feita a polarização do canal W e usada neste artigo é mostrada na Fig. 2, na qual o valor inicial é $n = 2$, porém em geral n pode assumir qualquer valor da forma $n = 2^m$, para $m \geq 1$.

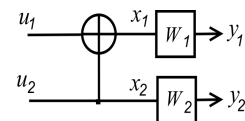


Figura 2. Construção inicial do código polar em que $n = 2$.

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

$$x = G \cdot u = F^{\otimes m} \cdot u. \quad (1)$$

Na decodificação SC a estimação do bit de mensagem u_i , com $1 \leq i \leq n$, segue uma ordem específica e é feita *bit a bit* através do logaritmo da razão de verossimilhança (LLR) da direita para a esquerda. Após a estimação por decisão suave ser feita, é realizada a propagação do *bit* estimado da esquerda para a direita seguindo o circuito para auxiliarem nos próximos *bits* e serem decodificados [6].

III. CÓDIGOS TURBO

Os códigos turbo são construídos a partir da concatenação paralela de dois ou mais codificadores convolucionais sistemáticos recursivos, separados por um entrelaçador. Os codificadores operam sobre os mesmos blocos de dígitos de informação de entrada [1], [3]. O decodificador turbo utiliza o princípio da decodificação iterativa e consiste de dois decodificadores concatenados em série, separados por um entrelaçador. Aqui é utilizado o algoritmo de decodificação BCJR [7]. São também usados outros entrelaçadores e desentrelaçadores no sistema, responsáveis por adequar a saída de um decodificador ao formato esperado do outro [1].

IV. ESQUEMA DE CONCATENAÇÃO SERIAL E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados resultados de simulações computacionais que utilizam o esquema de concatenação ilustrado na Fig. 1. Seja C_1 um código de bloco polar com taxa k/n e C_2 um código turbo com taxa assintótica igual a n/N , composto por codificadores convolucionais recursivos e sistemáticos. A concatenação serial é construída de forma que o remetente envia suas mensagens para o codificador de C_1 e as palavras-código geradas por C_1 são enviadas como mensagens para o codificador de C_2 . O canal é corrompido com o ruído RAGB. A saída do canal é alimentada como entrada do decodificador turbo, o qual executa um certo número de iterações e repassa o resultado para o decodificador polar, o qual faz uso do algoritmo de decodificação SC.

As Figs. 3 e 4 mostram as curvas de desempenho considerando $n = 2048$ e $n = 4096$, respectivamente. As simulações fazem uso esquema serial ilustrado na Fig. 1, com codificação polar e decodificação por SC, codificação turbo e decodificação iterativa com o algoritmo BCJR. Nas curvas apresentadas, o codificador turbo tem taxa $\frac{1}{3}$ e utiliza o esquema de concatenação paralela, em que os codificadores convolucionais componentes são idênticos, com matriz geradora polinomial $G(D) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1+D^2}{1+D+D^2} \end{bmatrix}$. É usado o entrelaçador aleatório com comprimento n e na decodificação iterativa são feitas 3 iterações. Os códigos polares utilizados têm taxa $\frac{1}{2}$.

V. CONCLUSÃO

As curvas obtidas nas simulações computacionais relacionam probabilidade de erro por bit (P_e) versus relação sinal ruído (E_b/N_0). O sistema proposto alcança $P_e \approx 10^{-4}$ a partir de $E_b/N_0 = 0.5\text{dB}$, i.e, uma melhoria de desempenho comparada com o código polar da ordem de 2.5dB para $n = 2048$ e de 2dB para $n = 4096$. Para $n = 4096$ os três códigos simulados indicam um desempenho semelhante para $E_b/N_0 \geq 3\text{dB}$, o que de certo modo seria esperado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu apoio parcial da FACEPE, projeto No. IBPG-0640-3.04/14, e do CNPq, projeto No. 307467/2015-5.

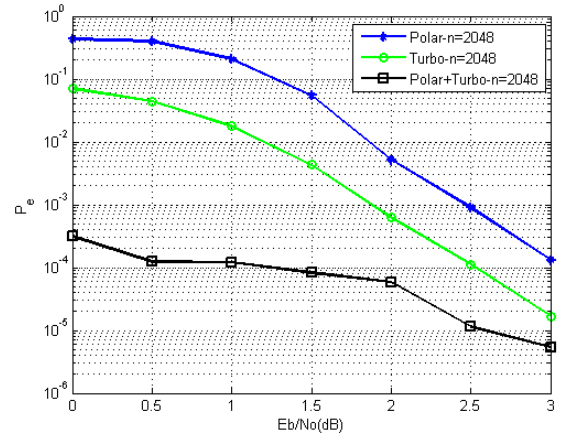


Figura 3. Curvas de desempenho para a codificação polar, a codificação turbo e o esquema de concatenação serial proposto, com $n = 2048$.

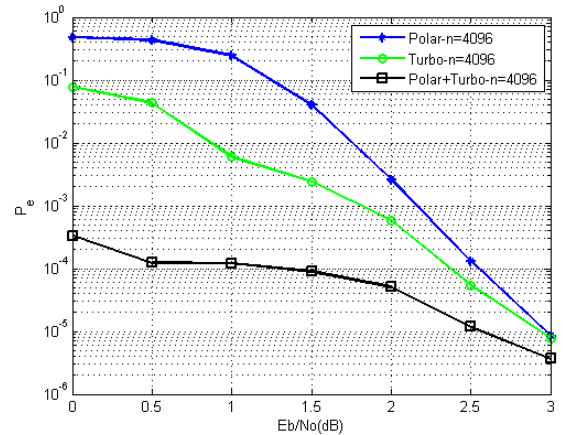


Figura 4. Curvas de desempenho para a codificação polar, a codificação turbo e o esquema de concatenação serial proposto, com $n = 4096$.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, "Near Shannon Limit Error-Correcting Coding and Decoding: Turbo-codes", *IEEE International Conference on Communications*, Geneva, Switzerland, pp. 1064–1070, 1993.
- [2] G. Oletu, and P. Rapajic, "The Performance of Turbo Codes for Wireless Communication Systems", *IEEE Conference on Computer Research and Development (ICCRD)*, vol. 4, pp. 346–349, 2011.
- [3] B. Vucetic, and J. Yuan, "Turbo Codes Principles and Applications", Boston, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 74, 231.
- [4] 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.
- [5] E. Abbe, and A. Barron, "Polar Coding Schemes for the AWGN Channel", *IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, pp. 194–198, 2011.
- [6] H. Vangala, E. Viterbo, and Y. Hong, "Permuted Successive Cancellation Decoder for Polar Codes", *International Symposium on Information Theory and Its Applications (ISITA)*, pp. 438–442, 2014.
- [7] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek, and J. Raviv, "Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate", *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 20, no 2, pp. 284–287, 1974.