

Esquema de Codificação Turbo Quaternária aplicada em Comunicação Cooperativa

Zelmann Strobel Penze e Renato Baldini Filho

Resumo—Este artigo apresenta um estudo preliminar sobre a viabilidade de utilização de esquemas turbo quaternários em comunicação cooperativa. O objetivo é fazer uso de algumas características peculiares dos códigos turbo definidos sobre anel de inteiros módulo-4 em sistemas que utilizam a codificação cooperativa. Além disso, pretende-se avaliar esquemas de codificação que permitem a possibilidade de fracionar o processo de codificação no percurso cooperativo de modo a economizar banda no dispositivo retransmissor que colabora com a transmissão entre a fonte e o destino.

Palavras-Chave—Código Turbo, Comunicação Cooperativa, Codificação Turbo, Decodificação iterativa.

Abstract—This article analyses the feasibility of quaternary turbo codes in cooperative communication. The aim of this work is to exploit some characteristics of turbo codes defined over ring of integers modulo-4 in coded cooperation schemes. Moreover, it is intended to evaluate fractionary coding processes applied to the cooperative path in order to save band at the relay.

Keywords—Turbo Code, Cooperative Communication, Turbo Coding, iterative decoding.

I. INTRODUÇÃO

A ideia básica da comunicação cooperativa é permitir que dispositivos móveis compartilhem suas antenas de modo a criar um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO – *Multiple Input Multiple Output*). O canal de comunicações sem fio produz desvanecimento no sinal transmitido por um dispositivo móvel. Assim, se for possível a transmissão de cópias do mesmo sinal produzindo diversidade, os efeitos do desvanecimento podem ser minimizados. Em particular, a comunicação cooperativa gera diversidade espacial, fazendo uso da transmissão de um sinal por canais distintos para ligar a fonte da informação ao destinatário, obtendo-se assim diferentes versões desvanecidas independentes deste sinal no receptor.

A Fig. 1 mostra um esquema simplificado de comunicação cooperativa utilizando um único retransmissor (relay). Neste sistema, cada usuário transmite sua informação e pode também atuar como retransmissor gerando assim diversidade espacial. A cooperação faz com que a eficiência espectral de cada usuário aumente devido à diversidade produzida e ao aumento da taxa de codificação de canal [1], [2], [3], [4], [6].

Os métodos de cooperação mais conhecidos entre usuários são: o método de detecção e retransmissão, o método de amplificação e retransmissão e o método de cooperação codificada. No método de amplificação e retransmissão o

usuário intermediário recebe uma versão ruidosa do sinal enviado pela fonte, que é amplificado e retransmitido para o destinatário, sem nenhum tipo de tratamento do sinal. O destinatário, por sua vez, combina o sinal recebido direto da fonte com o sinal retransmitido pelo usuário intermediário e faz a detecção da informação transmitida.

No método de detecção e retransmissão, o usuário intermediário recebe o sinal da fonte, detecta-o removendo o ruído e as interferências e reenviando-o para o destinatário. O destinatário então combina o sinal recebido direto da fonte com o sinal retransmitido pelo usuário intermediário e faz a detecção da informação transmitida.

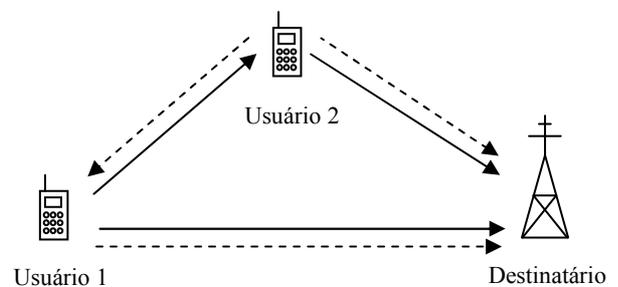


Fig. 1 Modelo de comunicação cooperativa

O método de codificação integra a cooperação com a codificação de canal. Na cooperação codificada, porções diferentes da palavra código de cada usuário são enviadas via distintos canais com desvanecimento. A ideia básica deste método é cada usuário transmitir redundância incremental que serão combinadas no destinatário para realização da decodificação da informação transmitida. Este método é o foco deste trabalho.

Para realização de análise de desempenho, o esquema da Fig. 1 pode ser simplificado sem perda da generalidade como na Fig. 2 a seguir. A fonte (F) transmite seus dados para o retransmissor (R) e para o destinatário (D) por radiodifusão. O retransmissor (relay) recebe os dados e realiza um processo de decodificação e codificação retransmitindo-os para o destinatário. No destino, os dados provenientes da fonte e do retransmissor são utilizados de forma a se obter a melhor estimativa da informação transmitida.

A transmissão de dados da fonte e retransmissor são baseadas em quadros de tamanho igual a n símbolos. Cada quadro é dividido em 2 subquadros de tamanho igual a n_1 e n_2

símbolos respectivamente. Se um usuário (retransmissor) cooperar, ele pode ceder ao outro usuário (fonte) um subquadro ou todo o quadro, dependendo da estratégia de cooperação adotada. Portanto, a codificação cooperativa é bastante flexível e pode ser utilizada virtualmente com qualquer tipo de codificação. Note que a o processo de codificação no retransmissor não necessita ser o mesmo da fonte. O destinatário recebe ambas palavras código corrompidas pelo ruído e interferências e as utiliza para melhor estimar a informação transmitida.

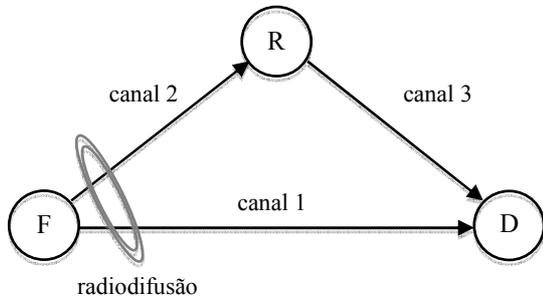


Fig. 2 Modelo simplificado de codificação cooperativa

Neste trabalho é apresentada uma estratégia de codificação turbo e decodificação iterativa baseada no anel Z_4 de inteiros módulo-4. A fonte transmite dados utilizando um codificador turbo sobre Z_4 que são radiodifundidos para ambos retransmissor e destinatário. No retransmissor a palavra código é decodificada e novamente codificada utilizando o mesmo codificador turbo do transmissor mas, dependendo da disponibilidade de espaço no quadro para a retransmissão, pode ser enviada toda ou parte da palavra código produzida.

II. CODIFICAÇÃO E DECODIFICAÇÃO TURBO QUATERNÁRIA

O esquema de codificação turbo quaternário, como apresentado em [7], é constituído por dois codificadores convolucionais sistemáticos recursivos (RSC) idênticos, definidos sobre o anel Z_4 finito de inteiros modulo-4, separados por um entrelaçador de símbolos, juntamente com um mecanismo opcional de puncionamento, conforme mostrado na Fig. 3.

A sequência de informação que entra no codificador RSC pode ser representada na forma polinomial $u(D) = u_0 + u_1D + u_2D^2 + \dots + u_{k-1}D^{k-1}$, onde os coeficientes $u_i \in \{0, 1, 2, 3\}$. Na saída do codificador RSC temos a sequência codificada $x(D) = u(D)G(D)$, sendo $G(D) = [I_k \ P_{k \times n-k}]$ a matriz geradora sistemática cujos elementos também pertencem a Z_4 e onde I_k é uma matriz identidade $k \times k$ e P é uma matriz de verificação de paridade $k \times (n-k)$ representada por razões polinomiais $g_i(D) = a_i(D)/b_i(D)$, cujos coeficientes dos polinômios $a_i(D)$ e $b_i(D)$ são definidos sobre sobre Z_4 . Os polinômios $a_i(D)$ e $b_i(D)$ definem respectivamente os fatores multiplicativos, com seus devidos atrasos, para as ligações diretas e realimentadas do codificador. Os códigos convolucionais utilizados neste trabalho possuem taxa de codificação igual a 1/2.

O entrelaçador usado na concatenação paralela dos dois codificadores RSC é do tipo *s-random interleaver* [8] e evita que o erro ocorrido em uma dada posição do símbolo associado ao codificador RSC-1, ocorra na mesma posição do

símbolo associado ao codificador RSC-2, produzindo uma maior eficiência no processo de decodificação iterativa.

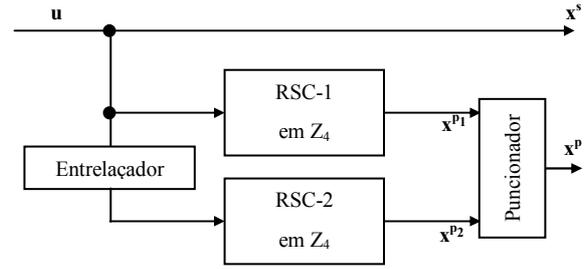


Fig. 3 Codificador turbo quaternário

O punccionador apaga de modo seletivo símbolos de redundância produzidos pelos codificadores convolucionais recursivos de modo a aumentar a taxa de codificação.

O diagrama de bloco do decodificador iterativo quaternário é apresentado na Fig. 4. O decodificador DEC-1 calcula a informação extrínseca que é usada como informação a priori relacionada com o símbolo sistemático na decodificador DEC-2. O decodificador DEC-2 por sua vez calcula a informação extrínseca relacionada ao símbolo de paridade que é usada pelo decodificador DEC-1 como informação a priori do seu símbolo sistemático.

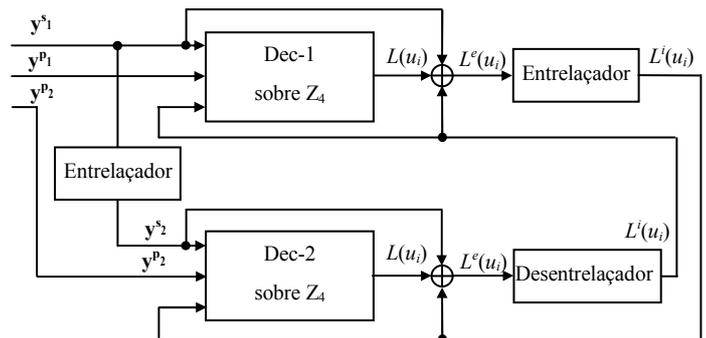


Fig. 4 Decodificador iterativo quaternário

O decodificador DEC-1 recebe a sequência $y^1 = (y^{s1}, y^{p1})$ e realiza uma estimativa da informação a posteriori $L_{11}(u_i)$ do símbolo de informação u_i , onde $i \in \{1, \dots, N\}$ e N é o comprimento da sequência de informação. O segundo decodificador DEC-2 recebe a sequência do canal $y^2 = (y^{s2}, y^{p2})$ junto com a informação extrínseca entrelaçada do primeiro decodificador e fornece uma estimativa da informação a posteriori $L_{12}(u_i)$ do símbolo de informação u_i .

Na segunda iteração, o decodificador DEC-1 processa novamente sua sequência recebida de canal y^1 , considerando nesta iteração a informação a priori $L^i(u_i)$ do segundo decodificador, que é formada pela porção extrínseca $L^e(u_i)$ da informação entrelaçada e $L_{12}(u_i)$, calculada pelo segundo decodificador na primeira iteração.

Ainda na segunda iteração, o segundo decodificador utiliza a informação a posteriori $L_{21}(u_i)$, fornecida na segunda interação pelo primeiro decodificador, para obter a informação

a priori $L^i(u_i)$. Esta informação a priori é utilizada junto com a sequência recebida no canal y^2 para calcular a informação a posteriori $L_{22}(u_i)$.

Este processo iterativo continua, sendo que a cada iteração, na média a taxa de erro de bit diminui para uma mesma relação sinal-ruído SNR.

III. ESQUEMA DE CODIFICAÇÃO COOPERATIVA

O esquema de codificação cooperativa proposto é apresentado na Fig. 5. Na fonte é utilizado um codificador turbo quaternário formado por dois codificadores sistemáticos recursivos de taxa 1/2. A sequência de símbolos codificada é radiodifundida para o relay (retransmissor) e o destino. No relay esta sequência é detectada e decodificada utilizando um decodificador iterativo. Após a obtenção da sequência de informação transmitida pela fonte ao relay, esta informação é novamente codificada por um codificador turbo idêntico ao da fonte, mas apenas a porção da paridade gerada pelo RS-2 é enviada pelo relay ao destino.

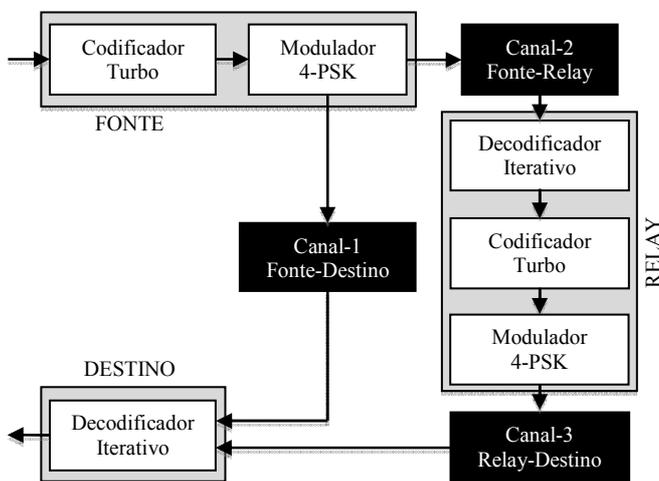


Fig. 5 Modelo do esquema codificação turbo cooperativa

No destino a sequência codificada transmitida pela fonte é associada a sequência de paridade enviada pelo relay e decodificada de forma iterativa. Este procedimento de codificação cooperativa, utilizando dois canais distintos para enviar os dados ao destino, tira proveito dos erros produzidos nos canais serem descorrelacionados. Além disso, não sobrecarrega o nó intermediário (relay) no armazenamento e processamento da informação proveniente da fonte e no reenvio para o destino. O uso de códigos definidos sobre anéis de inteiros permite o uso de sequências mais curtas que códigos binários para o mesmo desempenho, além do perfeito casamento entre símbolos e a modulação e a maior facilidade de obter códigos invariantes a rotação de fase da portadora.

IV. RESULTADOS

Neste trabalho foi utilizado na fonte e no relay codificadores turbo compostos de dois codificadores convolucionais sistemáticos recursivos (RSC) idênticos com taxa de codificação 1/2 e matriz geradora definida sobre Z_4 dada por

$$g(D) = \left[1 \frac{2+D+2D^3}{1+D+3D^2} \right] \quad (1)$$

O comprimento da sequência de informação utilizado é de $k = 512$ símbolos quaternários. No processo de decodificação iterativa no destino e relay foram consideradas 3 iterações. Os três canais foram modelados como canais com ruído aditivo gaussiano branco (AWGN) e com desvanecimento Rayleigh plano. Para efeito de análise não foi realizado punçãoamento nos símbolos de paridade na saída dos dois codificadores convolucionais RSC-1 e RSC-2. Portanto, a taxa total de codificação turbo é 1/3.

Na Fig. 6 é apresentado o desempenho do esquema de codificação cooperativa através de curvas de taxa de erro de bit (BER) versus E_b/N_0 [dB]. Para efeito de comparação foi traçada a curva de desempenho do sistema sem cooperação utilizando o mesmo codificador turbo. Todos os três canais apresentam o mesmo padrão de desvanecimento.

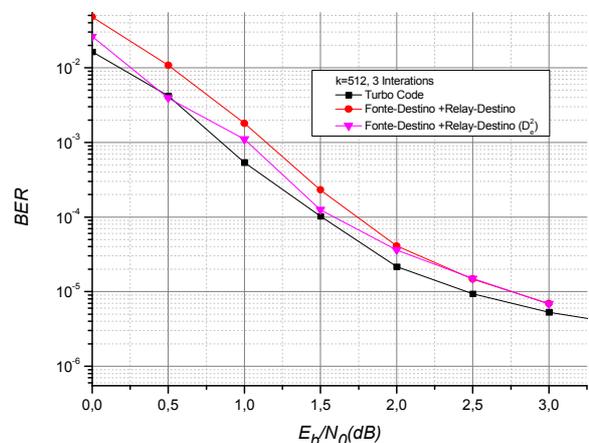


Fig. 6 Desempenho do esquema de codificação cooperativa, os 3 canais apresentam mesmo padrão de desvanecimento

A curva com marcadores redondos representa o desempenho do sistema onde os dados recebidos no destino são ordenados de forma que o primeiro decodificador DEC-1 receba a sequência codificada $y^1 = (y^{s1}, y^{p1})$ proveniente do canal fonte-destino. A sequência de paridade y^{p2} proveniente do relay entra no segundo decodificador DEC-2 junto com a sequência y^{s1} entrelaçada no decodificador iterativo do destino. Na curva com marcadores triângulo invertido, a sequência y^{p2} , usada na decodificação, é montada a partir das sequências y^{p2r} e y^{p2s} recebidas do relay e da fonte, respectivamente, através de uma seleção símbolo a símbolo baseada na menor distância euclidiana. Note que ambas as curvas de codificação cooperativa estão a menos de 0,25 dB do sistema sem cooperação, para uma taxa de erro de bit (BER) de 10^{-4} .

A Fig. 7 apresenta o desempenho do esquema de codificação cooperativa considerando três diferentes cenários de desvanecimentos nos três canais envolvidos:

- Cenário-1
 Canal Fonte-Destino = 3 dB de atenuação
 Canal Fonte-Relay = 0 dB de atenuação
 Canal Relay-Destino = 3 dB de atenuação

- Cenário-2
Canal Fonte-Destino = 3 dB de atenuação
Canal Fonte-Relay = 3 dB de atenuação
Canal Relay-Destino = 0 dB de atenuação
- Cenário-3
Canal Fonte-Destino = 3 dB de atenuação
Canal Fonte-Relay = 0 dB de atenuação
Canal Relay-Destino = 0 dB de atenuação

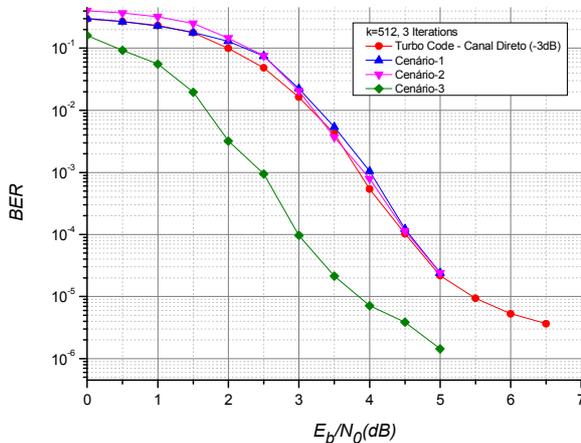


Fig. 7 Curvas de desempenho do esquema de codificação cooperativa para os 3 diferentes cenários.

As curvas de desempenho da Fig. 7 foram obtidas de modo que os dados recebidos no destino são ordenados de forma que o primeiro decodificador DEC-1 receba a sequência codificada $\mathbf{y}^1 = (\mathbf{y}^{s1}, \mathbf{y}^{p1})$ proveniente do canal fonte-destino e a sequência de paridade \mathbf{y}^{p2} proveniente do relay entra no segundo decodificador DEC-2 junto com a sequência \mathbf{y}^{s1} entrelaçada no decodificador iterativo do destino.

Note que, quando um dos dois canais da transmissão via relay sofre mesma atenuação que o canal fonte-destino, o esquema de codificação cooperativa possui desempenho similar ao da transmissão direta sem cooperação, isto é utilizando codificação turbo apenas no canal 1. Entretanto, quando os canais via relay são menos atenuados pelo desvanecimento que o canal fonte-destino, o desempenho do esquema de codificação cooperativa mostra um ganho de aproximadamente 1,5 dB sobre o sistema sem cooperação, para uma taxa de erro de bit de 10^{-4} .

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentado dois esquemas de codificação cooperativa baseados em codificação turbo definida sobre o anel de inteiros Z_4 . Os resultados preliminares mostram que é possível utilizar os códigos turbo de forma

fracionada nos dois percursos de modo a não sobrecarregar o retransmissor (relay), em termos de processamento dos dados e de quantidade de símbolos enviados, nos momentos de cooperação. Além disso, embora se perca informação útil para uma decodificação iterativa mais efetiva neste processo de fracionamento, ainda assim se obtém ganhos significativos de desempenho quando o canal direto encontra-se comprometido pelo desvanecimento.

O esquemas de cooperação descritos neste trabalho podem ser implementados com codificação turbo binária, entretanto sem as vantagens adicionais que os sistemas quaternários possuem como o perfeito casamento dos símbolos de Z_4 com os sinais da modulação 4-PSK e a possibilidade de se obter facilmente códigos invariantes à rotação de fase da portadora.

VI. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPESP através do processo nº 2012/01789-4.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] Norastinia A., Hunter T. E. and Hedayat A., Cooperative Communication in Wireless Networks, IEEE Communications Magazine, Oct. 2004, 74 – 80.
- [2] Hunter, T. and Nosratinia, A., “Cooperation diversity through coding”, ISIT 2002, Lausanne, Switzerland, June 30 – July 5, 2002.
- [3] Hunter, T. and Nosratinia, A., “Diversity through coded cooperation”, IEEE Transaction on Wireless Communications Vol. 5, No. 2, February 2006.
- [4] Sendonaris A., Erkip, E. and Aazhang B., “User cooperation diversity, Part I and Part II,” IEEE Trans. Commun., vol. 51, no. 11, pp. 1927–1948, Nov. 2003.
- [5] Berrou C., Glavieux A. and Thitimajshima P., “Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo-Codes”, Proceedings of the 1993 Communication Conference, ICC’93, Geneva, Switzerland, p. 1064-1070, May 1993.
- [6] Laneman J. N., Wornell G. W., and Tse D. N. C., “An Efficient Protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks”, Proc. IEEE ISIT, Washington, DC, June 2001, p. 294.
- [7] Barros J., Baldini Filho R., “Códigos Turbo M-ários com Modulação M-PSK”, anais do XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Set. 2007.
- [8] S. Dolinar and D. Divsalar, “Weight Distributions for Turbo Codes Using Random and Nonrandom Permutations”, TDA Progress Report 42-122, August 1995.