

Diversidade em Modulação Aplicada a Canais de Comunicações Móveis: Efeito dos Erros de Estimação de Canal na Transmissão de Imagens

Waslon Terllizzie A. Lopes, Francisco Madeiro, Juraci F. Galdino, Benedito G. Aguiar Neto e Marcelo S. Alencar

Resumo—No presente artigo a técnica de diversidade em modulação (DM) é aplicada à transmissão de imagens (baseada em quantização vetorial) por um canal com desvanecimento Rayleigh. Os benefícios da DM são apresentados e discutidos. A combinação da DM com a técnica de atribuição de índices (quantização vetorial robusta) é avaliada. O trabalho apresenta, ainda, uma avaliação dos efeitos dos erros de estimação no desempenho do sistema de comunicação que utiliza DM, em termos de probabilidade de erro de bit e da qualidade das imagens reconstruídas.

Palavras-Chave—Diversidade em modulação, comunicações móveis, desvanecimento Rayleigh, transmissão de imagens, erros de estimação, quantização vetorial.

Abstract—In this paper the modulation diversity (MD) technique is applied to the transmission of vector-quantized images over a Rayleigh fading channel. The performance gains of MD are presented and discussed. The combination of MD with an index assignment technique (robust vector quantization) is evaluated. The work also presents an analysis of the effect of the channel estimation errors on the performance of the communication system in terms of the bit error probability and the quality of the reconstructed images.

Keywords—Modulation diversity, mobile communications, Rayleigh fading, image transmission, estimation errors, vector quantization.

I. INTRODUÇÃO

O objetivo das técnicas de compressão de imagem é reduzir o número de bits necessários para representar uma imagem (mantendo um nível de qualidade adequado para uma dada aplicação), visando reduzir os requisitos de memória e/ou largura de faixa.

A quantização vetorial (QV) desempenha um papel importante em vários sistemas de codificação de imagens, permitindo a obtenção de taxas de compressão elevadas. O desempenho da QV, entretanto, pode ser muito prejudicado em decorrência de erros de canal: as imagens reconstruídas, obtidas após transmissão por um canal ruidoso, podem apresentar bloqueamentos espúrios incômodos.

Em trabalhos recentes, a diversidade em modulação (DM) [1]–[3] tem sido utilizada satisfatoriamente para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio. Em um artigo recente [4], referente à transmissão de imagem

Waslon Terllizzie Araújo Lopes, Benedito G. Aguiar Neto e Marcelo Sampaio de Alencar, Laboratório de Comunicações, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, E-mails: {waslon, bganeto, malencar}@dee.ufcg.edu.br.

Francisco Madeiro, Departamento de Estatística e Informática, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, E-mail: madeiro@dei.unicap.br.

Juraci Ferreira Galdino, Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, E-mail: galdino@epq.ime.br.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

(baseada em QV) por um canal com desvanecimento Rayleigh, mostrou-se que a DM leva a imagens reconstruídas com qualidade superior à apresentada pelas imagens obtidas sem uso de DM. Mostrou-se também que um ganho adicional de desempenho (em termos de qualidade de imagem) pode ser obtido com a aplicação de uma atribuição de índices (AI) adequada aos vetores-código. Em [4], AI foi obtida por meio do algoritmo *simulated annealing* [5], [6]. Em [4] não foram considerados erros de estimação de canal. No presente artigo, o desempenho da DM aplicada à transmissão de imagens por um canal com desvanecimento Rayleigh é avaliado levando em consideração a ocorrência de erros de estimação do canal de comunicações. Mais especificamente, considera-se a aplicação do algoritmo LMS (*least mean square*) e a utilização de um PLL (*phase-lock loop*) de 1ª ordem, respectivamente, para o acompanhamento do módulo e da fase do canal de comunicação.

II. QUANTIZAÇÃO VETORIAL

A quantização vetorial [7], [8] pode ser definida como um mapeamento Q de um vetor x pertencente ao espaço euclidiano K -dimensional, \mathbb{R}^K , em um vetor pertencente a um subconjunto finito W de \mathbb{R}^K , ou seja,

$$Q : \mathbb{R}^K \rightarrow W. \quad (1)$$

O dicionário $W = \{w_i; i = 1, 2, \dots, N\}$ é o conjunto de vetores-código K -dimensionais, também denominados vetores de reconstrução. O índice associado ao vetor-código w_i será denotado por i . Assim, cada índice $i \in \{0, 1\}^b$ representa uma palavra-binária de b bits. A taxa de codificação do quantizador vetorial, que mede o número de bits por componente do vetor, é $R = \frac{1}{K} \log_2 N = \frac{b}{K}$. Em codificação de imagens, R é expressa em bpp (bits por pixel).

Em um sistema de codificação de sinais baseado em quantização vetorial, o codificador e o decodificador funcionam como descrito a seguir. Dado um vetor $x \in \mathbb{R}^K$ do sinal a ser codificado, o codificador determina a distorção $d(x, w_i)$ entre esse vetor e cada vetor-código w_i , $i = 1, 2, \dots, N$ do dicionário W . A regra ótima de codificação é a regra do vizinho mais próximo, pela qual a palavra-binária i é transmitida ao decodificador se o vetor-código w_i corresponder à distorção mínima, isto é, se w_i for o vetor que apresenta a maior similaridade com x dentre todos os vetores-código do dicionário. Em outras palavras, o codificador QV usa a regra de codificação $C(x) = i$ se $d(x, w_i) < d(x, w_j)$, $\forall j \neq i$. A tarefa do decodificador é muito simples: ao receber o índice i de b bits, o decodificador QV simplesmente procura o vetor w_i em sua cópia do dicionário W e produz w_i como a reprodução (reconstrução) de x . Ele segue, portanto, a regra

de decodificação $D(i) = w_i$. O mapeamento de x em w_i é geralmente expresso como $w_i = Q(x)$.

A. QV em Canais Ruidosos

O problema da quantização vetorial (QV) em canais ruidosos tem sido objeto de interesse de diversas pesquisas. De forma geral, as abordagens dedicadas à minimização dos efeitos dos erros de canal no desempenho dos sistemas de comunicação baseados em QV podem ser classificadas em duas categorias. Na primeira, denominada quantização vetorial robusta (QVR), o dicionário é treinado (projetado) admitindo-se um canal sem erro. Posteriormente, por meio de um algoritmo de atribuição de índices (AI), faz-se com que o dicionário torne-se robusto a erros de canal [9]–[11]. É importante mencionar que AI é um processo por meio do qual os vetores de reconstrução são adequadamente rotulados (indexados) de modo a reduzir o impacto dos erros de canal na qualidade do sinal reconstruído. Na segunda categoria, denominada quantização vetorial otimizada para canal, o quantizador vetorial é treinado para um canal específico, ou seja, levando-se em consideração a distorção de canal [9], [12], [13]. O presente trabalho utiliza QVR – a AI é obtida por meio do algoritmo *simulated annealing* [5].

Considere o sistema de comunicação apresentado na Fig. 1. O objetivo do sistema é transmitir uma seqüência de vetores $\mathbf{X} = \{x\} \subset \mathbb{R}^K$ por um canal ruidoso usando QV dos vetores de entrada (vetores da fonte) x . Considere a transmissão da palavra-binária $i \in \{0, 1\}^b$, com $b = \log_2 N$ bits, enviada pelo codificador.

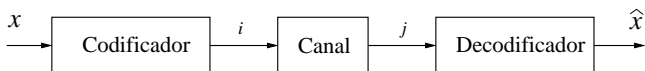


Fig. 1. QV em canais ruidosos.

Se o canal introduzir um erro na palavra-binária i , o decodificador QV receberá uma palavra-binária j que difere de i . Dessa forma, o decodificador não mais representará o vetor de entrada $x \in \mathbb{R}^K$ pelo vetor-código que obedece a regra do vizinho mais próximo (vetor w_i , correspondente à palavra-binária i). O decodificador QV representará x pelo vetor-código correspondente à palavra-binária j . A saída, portanto, será o vetor reconstruído $\hat{x} = w_j$. Como $d(x, w_j) > d(x, w_i)$, observa-se que o canal prejudicará a qualidade da reconstrução de x .

Em se tratando da transmissão de imagens (submetidas à QV) por canais ruidosos, quando uma palavra-binária correspondente a um vetor-código é corrompida por ruído, um bloco de $K = K_1 \times K_2$ pixels é afetado. Considerando a transmissão da seqüência completa de vetores (blocos de pixels) que compõem a imagem, cada palavra-binária incorretamente recebida pelo decodificador comprometerá a qualidade da reconstrução do vetor (bloco de pixels) correspondente. Conseqüentemente, em QV de imagem por canais ruidosos, bloqueamentos espúrios típicos, incômodos, de $K_1 \times K_2$ pixels são introduzidos na imagem reconstruída.

As técnicas de AI têm como objetivo organizar o dicionário de tal maneira que os erros de canal (que introduzem degradação nas palavras-binárias enviadas pelo codificador) façam com que os vetores de reconstrução decodificados incorretamente (correspondentes a palavras-binárias erroneamente recebidas) se aproximem, em média, dos vetores de

reconstrução concernentes a uma transmissão sem erro. O dicionário reorganizado (reordenado) por meio de AI apresenta os mesmos vetores-código do dicionário original (sem uso de AI), entretanto, com uma atribuição diferente de palavras-binárias.

III. DIVERSIDADE EM MODULAÇÃO

O efeito do desvanecimento, provocado pelos múltiplos percursos de propagação dos sinais transmitidos em canais de comunicações móveis, pode degradar significativamente o desempenho de sistemas de comunicações digitais. Em razão disto, várias técnicas vêm sendo propostas para melhoria de desempenho desses sistemas. Dentre elas, podem ser citadas técnicas de diversidade [14]–[16], esquemas de modulação codificada [17], e uso da transformada *wavelet* na codificação [18].

Em particular, as técnicas de diversidade consistem, basicamente, em gerar redundância (réplicas) do sinal transmitido no receptor. Exemplos típicos de técnicas de diversidade são: diversidade temporal, diversidade em frequência e diversidade espacial [15]. Outra técnica proposta recentemente é a técnica de *diversidade em modulação* (DM) que consiste basicamente em introduzir redundância por meio de uma escolha criteriosa do ângulo de referência de uma constelação MPSK combinada com o entrelaçamento independente das componentes dos símbolos a serem transmitidos [2], [3].

Considere a modulação QPSK, que pode ser vista como duas modulações PSK binárias em paralelo – uma em fase (I) e outra em quadratura (Q). Os dois sinais correspondentes são ortogonais e podem ser separados no receptor. Neste esquema, o sinal transmitido é dado por

$$s(t) = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n p(t - nT_S) \cos(\omega_c t) + A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n p(t - nT_S) \sin(\omega_c t), \quad (2)$$

sendo

$$a_n, b_n = \pm 1 \quad \text{com mesma probabilidade,}$$

$$p(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T_S \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

em que ω_c e A são a frequência e a amplitude da portadora respectivamente.

Pode ser observado, a partir da Equação 2, que a informação transmitida em uma componente é independente da informação transmitida na outra. Além do mais, a transmissão destes sinais em canais com desvanecimento independente pode introduzir um ganho de diversidade se houver redundância entre as duas componentes.

Na técnica de DM a introdução de redundância entre essas componentes é realizada combinando-se a rotação dos sinais da constelação QPSK por uma fase constante θ , como mostrado na Fig. 2, com o entrelaçamento independente das componentes [1]. Para essa constelação girada, o sinal trans-

mitido pode ser escrito como

$$s(t) = A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_n p(t - nT_S) \cos(\omega_c t) + A \sum_{n=-\infty}^{+\infty} y_{n-k} p(t - nT_S) \sin(\omega_c t), \quad (3)$$

sendo k um inteiro representando o atraso (expresso em número de símbolos) introduzido pelo entrelaçamento entre as componentes I e Q . Além disso,

$$x_n = a_n \cos \theta - b_n \sin \theta \quad (4a)$$

e

$$y_n = a_n \sin \theta + b_n \cos \theta \quad (4b)$$

são os novos símbolos QPSK¹. O diagrama de blocos do transmissor que implementa este procedimento é apresentado na Fig. 3.

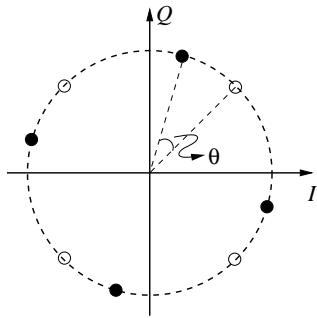


Fig. 2. Constelação QPSK: referência (o) e girada por um ângulo θ (●).

O ganho de desempenho desta técnica fundamenta-se no seguinte raciocínio. Como os picos de desvanecimentos são profundos, mas de curta duração, eles podem degradar toda informação (componentes em fase e em quadratura de um símbolo) numa transmissão convencional. Isto dificilmente ocorrerá no esquema proposto, pois as componentes de um símbolo são transmitidas em instantes de tempo distintos e existe redundância entre as componentes em fase e quadratura.

Uma característica interessante desse esquema é que o valor de θ não influencia o desempenho do sistema quando os sinais transmitidos são afetados apenas pelo ruído gaussiano branco (canal AWGN, *additive white Gaussian noise*), pois a distância Euclidiana entre os símbolos da constelação não depende do ângulo θ . Observa-se também que a eficiência espectral do sistema é mantida porque a cada intervalo de sinalização 2 bits são transmitidos independentemente do valor de θ . Além do mais, a complexidade deste esquema é relativamente baixa, pois requer apenas a adição de entrelaçadores ao transmissor, uma vez que os bits de entrada podem ser mapeados diretamente na constelação desejada.

Assumindo que o canal de comunicações móveis é caracterizado por desvanecimento rápido e plano, o sinal recebido, aqui denotado por $r(t)$, é dado por

$$r(t) = \alpha(t)s(t) + \eta(t), \quad (5)$$

¹É importante observar que, na prática, os bits de entrada podem ser mapeados diretamente na constelação girada, sem a necessidade de implementar as expressões da Equação 4.

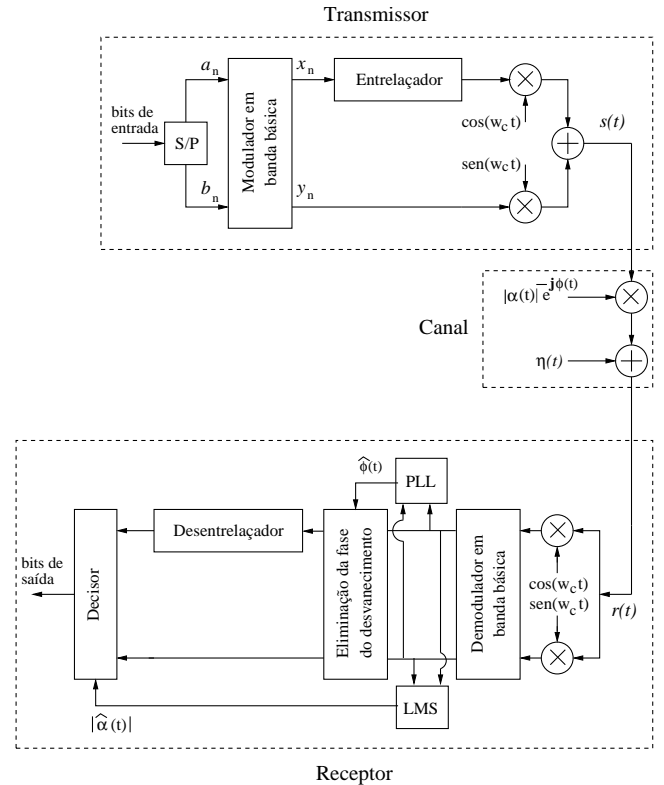


Fig. 3. Diagrama de blocos do sistema simulado.

em que $\eta(t)$ representa o ruído aditivo modelado por um processo gaussiano branco, complexo, com média nula e variância $N_0/2$ por dimensão. Além disso, o fator multiplicativo $\alpha(t)$ é modelado por um processo gaussiano estacionário em sentido amplo com densidade espectral de potência dada por

$$G(f) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{f}{f_D})^2}}, & \text{se } |f| < f_D \\ 0, & \text{se } |f| \geq f_D, \end{cases} \quad (6)$$

em que f_D é o máximo desvio Doppler [19].

No receptor (Fig. 3), $r(t)$ é inicialmente convertido para banda básica. O sinal obtido $r_n(t)$ (equivalente passa-baixas) em um intervalo de sinalização é

$$r_n(t) = |\alpha_n(t)|e^{-j\phi_n(t)}s_n(t) + \eta_n(t), \quad nT_s \leq t \leq (n+1)T_s, \quad (7)$$

em que $\eta_n(t)$ representa o ruído gaussiano branco complexo, $|\alpha_n(t)|$ denota a amplitude da resposta impulsional (RI) do canal no instante de tempo t , $\phi_n(t)$ representa o deslocamento de fase provocado pelo canal e $s_n(t)$ denota o equivalente passa-baixas do sinal transmitido $s(t)$.

Após a eliminação da fase do desvanecimento (multiplicação de $r_n(t)$ por $e^{j\phi_n(t)}$), o vetor recebido, no n -ésimo intervalo de sinalização, aqui denotado por \tilde{r}_n , é expresso como

$$\tilde{r}_n = \alpha_n s_n + \eta_n, \quad (8)$$

sendo s_n a representação vetorial do sinal transmitido no intervalo de sinalização nT_s , dada por

$$s_n = x_n + jy_{n-k}. \quad (9)$$

Além disso, os elementos do vetor complexo η_n são variáveis aleatórias gaussianas independentes e identicamente distribuídas (i.i.d.) com média nula e variância $N_0/2$.

No receptor, depois do desentrelaçamento (Fig. 3) o vetor recebido torna-se

$$\mathbf{r}_n = [\alpha_n x_n + \text{Re}\{\eta_n\}] + j[\alpha_{n+k} y_n + \text{Im}\{\eta_{n+k}\}], \quad (10)$$

em que $\text{Re}\{\eta_n\}$ e $\text{Im}\{\eta_{n+k}\}$ indicam as partes real e imaginária do ruído complexo η nos intervalos de sinalização nT_s e $(n+k)T_s$, respectivamente.

Admitindo-se a transmissão de símbolos equiprováveis, o decisor ótimo, de posse das estimativas de $|\alpha_n|$, calcula a distância Euclidiana quadrática entre o sinal recebido \mathbf{r}_n e cada um dos quatro vetores da constelação QPSK (multiplicados pelas estimativas $|\alpha_n|$ e $|\alpha_{n+k}|$), decidindo em favor do mais próximo a \mathbf{r}_n .

Considerando que o receptor seja capaz de estimar sem erro os valores de $|\alpha(t)|$ e $\phi(t)$ e que haja decorrelação entre os valores de $\alpha_n(t)$ e $\alpha_{n+k}(t)$, mostrou-se em [2] que a probabilidade de erro de bit do sistema é minimizada para $\theta = 27^\circ$. Admitindo correlação entre α_n e α_{n+k} , pode-se obter, a partir da função de autocorrelação do canal, os pontos de correlação nula que correspondem às profundidades de entrelaçamento ideais para cada valor de f_D . Desta forma, o desempenho apresentado em [2] é alcançado, caso o canal seja perfeitamente estimado.

Assumindo a presença de erros de estimação de canal pelo receptor, mostrou-se em [2], [3] (usando os algoritmos LMS [20] e PLL [21] como estimadores de amplitude e fase do canal com desvanecimento, respectivamente) que a técnica de diversidade em modulação alcança um bom desempenho.

IV. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados resultados de simulação concernentes à transmissão da imagem Lena (256×256 pixels), apresentada na Fig. 4, por um canal com desvanecimento Rayleigh. Utilizou-se QV com dimensão $K = 16$ (correspondente a blocos de 4×4 pixels) e tamanho do dicionário $N = 256$. A taxa de codificação correspondente, portanto, foi de $R = 0,5$ bpp. O dicionário foi projetado com o algoritmo LBG (Linde-Buzo-Gray) [22], usando um conjunto de treino consistindo de quatro imagens 256×256 pixels. A qualidade das imagens reconstruídas foi avaliada por meio da relação sinal-ruído de pico (PSNR).



Fig. 4. Imagem Lena original (8,0 bpp).

As simulações envolvendo diversidade em modulação consistiram em utilizar o esquema QPSK com uma rotação de constelação de $\theta = 27^\circ$, que é o ângulo de rotação ótimo de

QPSK de acordo com [2], [3]. O sistema de transmissão utilizou uma profundidade de entrelaçamento k de 50 símbolos. Foi considerada uma frequência doppler (f_D) igual a 50 Hz e foram utilizados os passos do LMS e do PLL iguais a 0,25 e 0,6, respectivamente, para o sistema com DM. Para o sistema sem DM, os passos foram 0,5 e 0,8, respectivamente. Esses valores foram escolhidos de modo a minimizar a probabilidade de erro de bit do sistema [2], [3]

A Fig. 5 (em que DM denota diversidade em modulação e EE denota erros de estimação) apresenta o desempenho da diversidade em modulação em termos de probabilidade de erro de bit, enquanto as Figs. 6 e 7 apresentam a PSNR (mais precisamente o valor médio de PSNR de 200 transmissões de imagem para cada valor de relação sinal-ruído E_b/N_0 considerado) da imagem Lena reconstruída. A notação a seguir foi adotada na Fig. 6:

- ORI: valores de PSNR obtidos usando o dicionário original (sem AI) e considerando um sistema de transmissão sem diversidade em modulação ($\theta = 0^\circ$);
- SA: valores de PSNR obtidos usando o dicionário reorganizado (AI pelo algoritmo *simulated annealing*) e considerando um sistema de transmissão sem diversidade em modulação ($\theta = 0^\circ$);
- ORI+DM: valores de PSNR obtidos usando o dicionário original (sem AI) e considerando um sistema de transmissão com diversidade em modulação ($\theta = 27^\circ$);
- SA+DM: valores de PSNR obtidos usando o dicionário reorganizado (AI pelo algoritmo *simulated annealing*) e considerando um sistema de transmissão com diversidade em modulação ($\theta = 27^\circ$).

Com relação à notação utilizada na Fig. 7, o uso de EE significa que estão sendo considerados erros de estimação. Assim, por exemplo, ORI+DM+EE diz respeito aos valores de PSNR obtidos usando o dicionário original (sem AI), considerando um sistema de transmissão com diversidade em modulação ($\theta = 27^\circ$) e considerando a ocorrência de erros de estimação.

A Fig. 5 mostra o ganho de desempenho obtido com o uso de diversidade em modulação, em termos da redução da probabilidade de erro de bit. Observa-se, por exemplo, para $E_b/N_0 = 16$ dB e considerando a ocorrência de erros de estimação, que a diversidade em modulação leva a uma redução de probabilidade de erro de bit de $1,12 \times 10^{-2}$ para $2,55 \times 10^{-3}$.

A Fig. 6 mostra que a substituição do esquema convencional (ORI) pelo esquema de diversidade em modulação (ORI+DM) leva a um ganho de desempenho em termos de PSNR das imagens reconstruídas para todos os valores de E_b/N_0 considerados. Observa-se, por exemplo, que essa substituição leva a um ganho de PSNR de 4 dB para $E_b/N_0 = 16$ dB. A Fig. 6 também mostra que a técnica de atribuição de índices (AI), por meio do algoritmo *simulated annealing* (curva SA) supera ORI+MD para valores de E_b/N_0 até cerca de 12 dB. Observa-se na figura que os melhores resultados em termos de PSNR são obtidos no esquema SA+MD, ou seja, aplicação de diversidade em modulação combinada ao uso de vetores-código submetidos à técnica de AI por meio de *simulated annealing*.

O ganho de qualidade das imagens reconstruídas devido ao uso da técnica de DM deve-se ao fato de que a DM diminui a probabilidade de erro de bit do sistema de comunicações.

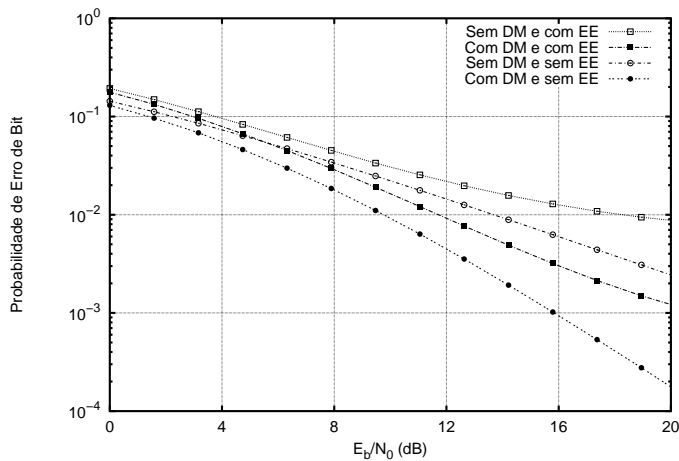


Fig. 5. Probabilidade de erro de bit do sistema em função da relação sinal-ruído (E_b/N_0) do canal com desvanecimento.

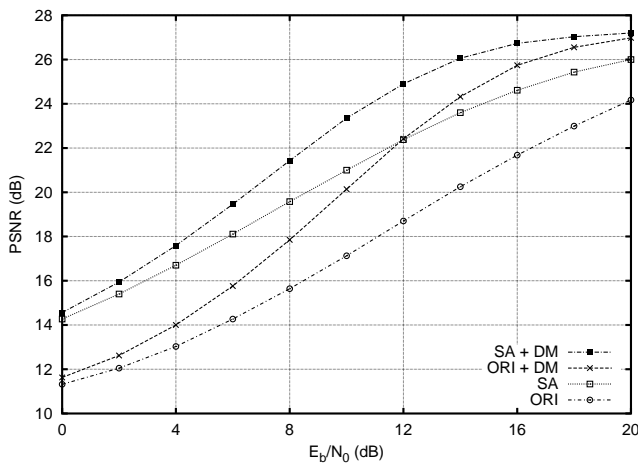


Fig. 6. Relação sinal-ruído de pico (PSNR) da imagem Lena reconstruída em função da relação sinal-ruído (E_b/N_0) do canal com desvanecimento, considerando estimação perfeita.

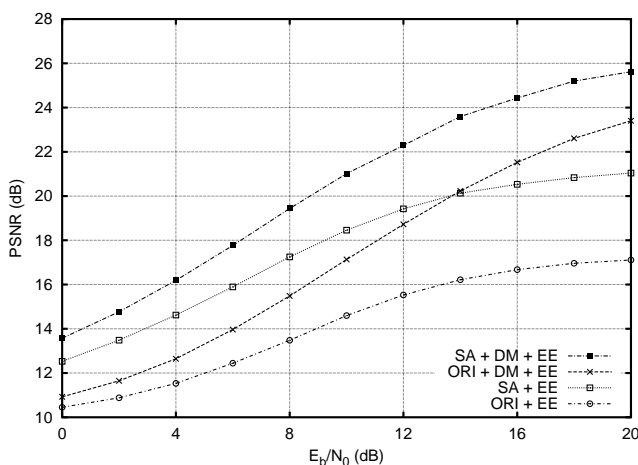


Fig. 7. Relação sinal-ruído de pico (PSNR) da imagem Lena reconstruída em função da relação sinal-ruído (E_b/N_0) do canal com desvanecimento, considerando os erros de estimação de canal.

A DM, portanto, diminui o número de ocorrências de erros nas palavras-binárias transmitidas pelo codificador QV. Isto pode ser observado, por exemplo, nas Figs 8(a) e 8(b): nota-se que a DM diminui o número de bloqueamentos espúrios nas imagens reconstruídas.

Os ganhos em PSNR obtidos ao se substituir o dicionário original pelo dicionário cujos vetores-código passaram pelo processo de AI por meio do algoritmo *simulated annealing* deve-se à seguinte razão: quando os erros de transmissão ocorrem, os correspondentes bloqueamentos espúrios introduzidos nas imagens reconstruídas utilizando-se o dicionário organizado (AI por meio *simulated annealing*) são menos incômodos do que os bloqueamento obtidos com o dicionário original (não submetido ao processo de AI). Em outras palavras, isto se deve ao fato de que a técnica de AI procura organizar os índices dos vetores-código de tal maneira que os vetores-código recebidos erroneamente fiquem, em média, próximos daqueles vetores que seriam recebidos no caso de uma transmissão sem erros. As Figs. 8(a) e 8(c) mostram que os bloqueamentos nas imagens reconstruídas obtidas ao se usar o dicionário organizado (SA) é menos incômodo que os bloqueamentos nas imagens reconstruídas obtidas ao se usar o dicionário original (ORI).

A Fig. 8 mostra que a imagem de melhor qualidade é obtida por SA+DM: DM reduz o número de bloqueamentos e, quando um bloqueamento ocorre, AI por meio de SA em geral faz com que o impacto visual correspondente seja menos perceptível.

Consideremos, agora, a ocorrência de erros de estimação. Comparando as Figs. 6 e 7, observa-se que os erros de estimação levam a uma queda de qualidade das imagens reconstruídas em termos de PSNR. Para $E_b/N_0 = 16$ dB, por exemplo, considerando transmissão sem DM e com uso do dicionário original (isto é, dicionário sem AI por meio de SA), observa-se que os erros de estimação levam a uma redução de PSNR de 21,68 dB (esquema ORI da Fig. 6) para 16,67 dB (esquema ORI+EE da Fig. 7). É importante destacar, no entanto, que mesmo em um cenário com ocorrência de erros de estimação, a diversidade em modulação tem um papel importante para melhorar o desempenho do sistema de comunicações. De fato, ORI+DM+EE apresenta resultados de PSNR superiores aos apresentados por ORI+EE. Os melhores resultados da Fig. 7 correspondem a SA+DM+EE.

A comparação das Figs. 8 e 9 revela o efeito dos erros de estimação na qualidade das imagens reconstruídas: eles levam ao aumento do número de bloqueamentos espúrios quando comparado ao cenário sem ocorrência de erros de estimação. O papel da DM, bem como da AI por meio de SA, pode ser observado na Fig. 9: DM reduz o número de bloqueamentos espúrios; AI por meio de SA faz com que os bloqueamentos, em geral, tornem-se menos incômodos.

[htb]

V. COMENTÁRIOS FINAIS

A quantização vetorial tem sido utilizada em sistemas de codificação de imagens, permitindo a obtenção de taxas de compressão elevadas. No entanto, a QV é muito sensível a erros de canal, que podem levar a bloqueamentos espúrios muito incômodos nas imagens reconstruídas. No presente trabalho, a diversidade em modulação (DM) foi utilizada para melhorar a transmissão de imagens (baseada em QV) por um canal com desvanecimento Rayleigh. Como a DM contribui para reduzir a probabilidade de erro de bit do sistema de comunicação,



Fig. 8. Imagem Lena reconstruída (QV com 0,5 bpp) após a transmissão através do canal com desvanecimento com $E_b/N_0 = 16$ dB e estimação de canal perfeita.

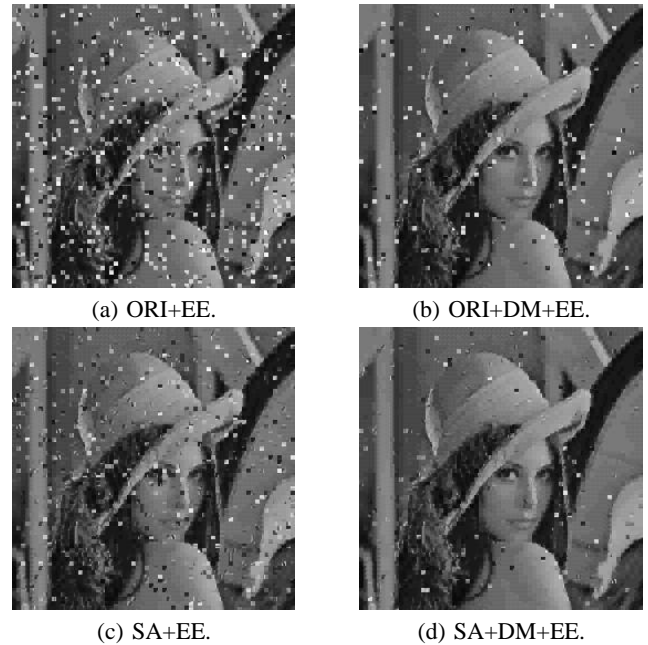


Fig. 9. Imagem Lena reconstruída (QV com 0,5 bpp) após a transmissão através do canal com desvanecimento com $E_b/N_0 = 16$ dB na ausência de estimação de canal perfeita.

ela leva a uma redução no número de bloqueamentos espúrios introduzidos nas imagens reconstruídas. Um ganho adicional de desempenho foi obtido quando a transmissão de imagens foi realizada usando DM e dicionário submetido à técnica de atribuição de índices (AI), que foi levada a efeito com o algoritmo *simulated annealing* – a técnica de AI permite obter bloqueamentos menos incômodos. O trabalho apresentou ainda uma avaliação do efeito dos erros de estimação no desempenho do sistema de comunicação baseado em DM. Resultados em termos de probabilidade de erro de bit e de relação sinal-ruído de imagens reconstruídas, bem como inspeções visuais nessas imagens, revelaram os benefícios da DM ao serem considerados erros de estimação.

Como trabalhos futuros, os autores pretendem avaliar o desempenho do esquema proposto em canais seletivos em frequência bem como analisar o desempenho das técnicas apresentadas neste artigo considerando a transmissão de sinais de voz.

REFERÊNCIAS

- [1] S. B. Slimane. "An Improved PSK Scheme for Fading Channels". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 703–710, May 1998.
- [2] W. T. A. Lopes, J. F. Galdino and M. S. Alencar. "Diversidade em Modulação Aplicada a Canais de Comunicações Móveis". *Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações*, vol. 17, no. 2, pp. 112–123, Dezembro 2002.
- [3] W. T. A. Lopes, M. S. Alencar and J. F. Galdino. "Modulation Diversity for Wireless Communications: Impact of Channel Estimation Errors and Doppler Effect on System Performance". In *Communications, Information and Network Security*, edited by V. K. Bhargava, H. V. Poor, V. Tarokh and S. Yoon, chapter 1, pp. 1–16. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
- [4] W. T. A. Lopes, F. Madeiro, B. G. Aguiar Neto and M. S. Alencar. "Combining Modulation Diversity and Index Assignment to Improve Image VQ for a Rayleigh Fading Channel". In *Anais do VI Congresso Brasileiro de Redes Neurais (CBRN'2003)*, pp. 55–60, São Paulo, SP, Brazil, June 2003.
- [5] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr. and M. P. Vecchi. "Optimization by Simulated Annealing". *Science*, vol. 220, pp. 671–680, May 1983.
- [6] J. A. Freeman and D. M. Skapura. *Neural Networks: Algorithms, Applications and Programming Techniques*. Addison-Wesley, Reading, MA, March 1991.
- [7] A. Gersho and R. M. Gray. *Vector Quantization and Signal Compression*. Kluwer Academic Publishers, Boston, MA, 1992.
- [8] R. M. Gray. "Vector Quantization". *IEEE ASSP Magazine*, vol. 1, pp. 4–29, April 1984.
- [9] N. Farvardin. "A Study of Vector Quantization for Noisy Channels". *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 36, no. 4, pp. 799–809, July 1990.
- [10] P. Knagenhjelm and E. Agrell. "The Hadamard Transform – A Tool for Index Assignment". *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 42, no. 4, pp. 1139–1151, July 1996.
- [11] K. Zeger and A. Gersho. "Pseudo-Gray Coding". *IEEE Transactions on Communications*, vol. 38, no. 12, pp. 2147–2157, December 1990.
- [12] N. Farvardin and V. Vaishampayan. "On the Performance and Complexity of Channel-Optimized Vector Quantizers". *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 37, no. 1, pp. 155–160, January 1991.
- [13] H. Jafarkhani and N. Farvardin. "Design of Channel-Optimized Vector Quantizers in the Presence of Channel Mismatch". *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 1, pp. 118–124, January 2000.
- [14] V. M. DaSilva and E. S. Sousa. "Fading-Resistant Modulation Using Several Transmitter Antennas". *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 10, pp. 1236–1244, October 1997.
- [15] V. Tarokh, N. Seshadri and A. R. Calderbank. "Space-Time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction". *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744–765, March 1998.
- [16] A. Wittneben. "A New Bandwidth Efficient Transmit Antenna Modulation Diversity Scheme for Linear Digital Communications". *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC'93)*, pp. 1630–1634, 1993.
- [17] J. Wu and S. Lin. "Multilevel Trellis MPSK Modulation Codes for the Rayleigh Fading Channel". *IEEE Transactions on Communications*, vol. 41, no. 9, pp. 1311–1318, September 1993.
- [18] M. A. Tzannes and M. C. Tzannes. "Bit-by-Bit Channel Coding Using Wavelets". *Proceedings of the IEEE GLOBECOM'92*, pp. 684–688, April 1992.
- [19] J. G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, New York, 1989.
- [20] S. S. Haykin. *Adaptive Filter Theory*. Prentice Hall, 1991.
- [21] P. Koufalias. "State Variable Approach to Carrier Phase Recovery and Fine Automatic Gain Control on Flat Fading Channels". Master's thesis, University of South Australia, 1996.
- [22] Y. Linde, A. Buzo and R. M. Gray. "An Algorithm for Vector Quantizer Design". *IEEE Transactions on Communications*, vol. COM-28, pp. 84–95, January 1980.