

Desempenho da Compressão de Imagens pra Transmissão de Imagens em Canais HF

Ítalo R. M. Soares, Edmar C. Gurjão e Francisco M. de Assis

Resumo—A transmissão em canais na banda de altas-frequências é uma alternativa para se obter longo alcance a um custo baixo, o que é apropriado para envio de imagens em sistemas de vigilância de grandes territórios. Devido aos efeitos desse canal nos sinais por ele transmitidos e a pequena largura da banda disponível, faz-se necessário utilizar técnicas para proteção do sinal (equalização, códigos para controle de erros, dentre outros) e a compressão antes da transmissão. Em trabalhos anteriores, para a transmissão de imagens em canais HF foi proposto o uso da transformada wavelet discreta em conjunto com quantização vetorial cujos vetores do dicionário são diretamente associáveis aos pontos da modulação. Neste trabalho fazemos uma extensão dos trabalhos anteriores realizando a redução da ordem da modulação e o projeto de um dicionário para ser utilizado com essa modulação, que é adequada para o canal HF. Mostra-se que a alteração desenvolvida obtém bons resultados quando comparados com outra topologia, principalmente nas situações em que o canal apresenta baixa relação sinal-ruído.

Palavras-Chave—Canal HF, transformada wavelet, quantização vetorial, modulação, desempenho.

Abstract—Transmission in high-frequency (HF) is an alternative to high range and low cost systems, as image transmission in surveillance systems. Due to the effects of this channel in the transmitted signals and its low bandwidth, it is necessary to both use techniques to protect the transmitted signal (equalization, error control coding, etc.) and signal compression to reduce the representation of the source. In previous work, for image transmission in HF channels it was proposed the use of discrete wavelet transform and vector quantization, whose dictionary vectors must be directly mapped in points of a signal constellation. In this work we extend this work by using a more appropriated modulation to the HF channel and a specially projected dictionary. The modification here proposed has good results compared to other dictionary topology in low signal-to-noise situations.

Keywords—HF channel, wavelet transform, vector quantization, modulation, performance.

I. INTRODUÇÃO

A transmissão em altas frequência (HF - *High Frequency*) é utilizada em sistemas que desejam longo alcance e com baixo custo, pois não há necessidade de repetidores. Entretanto, devido às variações nas camadas da ionosfera esse canal introduz efeitos severos no sinal transmitido, como desvanecimento variante no tempo. Devido a essa severidade faz-se necessário transmitir com baixas taxas, e utilizar diversos mecanismos para proteger o sinal transmitido.

Quando os sinais necessitam de altas taxas para serem transmitidos, é comum que seja aplicada uma forma de compressão

Ítalo R. M. Soares, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG - COPELE. Edmar C. Gurjão e Francisco M. de Assis, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil. E-mails: italo.soares@ee.ufcg.edu.br, ecandeia@dee.ufcg.edu.br, fmarcos@dee.ufcg.edu.br.

antes da transmissão. No caso das imagens a compressão pode ser obtida por meio de transformadas, que permitam representar a imagem com um número menor de pontos, no caso os coeficientes da transformada. Em [4] propõe-se o uso da transformada wavelet discreta (DWT - *Discrete Wavelet Transform*) em conjunto com a quantização vetorial para comprimir a imagem antes da transmissão.

Nesse artigo consideramos a transmissão de imagens em canais HF, e para tanto um esquema proposto em trabalhos anteriores [4] foi aperfeiçoado pela redução na cardinalidade utilizada, em conjunto com um codificador vetorial ajustado para essa modulação. Mostra-se que a utilização desse esquema tem melhor desempenho do que o proposto em outras trabalhos.

O artigo está dividido da seguinte forma, na Seção II o canal HF é descrito. Nas Seções III e IV são descritas a quantização vetorial e a transformada discreta de Fourier respectivamente, que compõem o ferramental básico utilizado neste trabalho. Na Seção V é descrita a combinação da transformada com a quantização vetorial e na Seção VI são apresentados os detalhes da implementação aqui realizada. Os resultados estão apresentados na Seção VII e finalmente na Seção VIII são apresentadas as conclusões e perspectivas futuras para o presente trabalho.

II. TRANSMISSÃO DE IMAGENS EM CANAIS HF

A. Canais HF

No canal de rádio que utiliza frequências altas (*High Frequency* - HF) compreendidas entre 3 a 30 MHz, as ondas são refletidas na camada ionosférica da Terra. Os principais usuários desse espectro são sistemas de comunicações militares, comunicação ar-terra para aeronaves e rádio amadorismo, em todos esses sistemas o uso desse canal é devido ao baixo custo de operação, à independência de equipamentos operados por terceiros e ao longo alcance [1].

A comunicação em HF pela ionosfera é caracterizada por propagação em múltiplos percurso e desvanecimento. A onda reflete uma ou várias vezes nas camadas da ionosfera, causando tempos diferentes de propagação para cada percurso, um espalhamento temporal de até vários milissegundos. A variação da altura média das camadas ionosféricas com o tempo produz diferentes deslocamento em frequência em cada um dos múltiplos percursos.

A transmissão de sinais pelo canal HF é uma tarefa desafiadora, e exige que diversos mecanismos de proteção do sinal (codificação para controle de erros, equalização, dentre outros) sejam utilizadas, e muitas vezes exige-se uma baixa taxa de

transmissão. Nesse trabalho o interesse é pela transmissão de imagens por esse canal, e nesse caso deve-se necessariamente aplicar compressão para diminuir a taxa de transmissão necessária e utilizar modulações de baixa cardinalidade. A seguir são apresentadas duas técnicas de compressão usadas em trabalhos anteriores e que são de interesse do trabalho aqui apresentado.

III. QUANTIZAÇÃO VETORIAL

Um quantizador vetorial de dimensão Q e tamanho N é um mapeamento de um vetor de dimensão k do espaço euclidiano, \mathcal{R}^k , em um conjunto finito com N representantes, chamados de vetores-código [2]. Então,

$$Q : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathcal{C}, \quad (1)$$

em que $\mathcal{C} = (\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N)$ e $\mathbf{y}_i \in \mathbb{R}^k$ para cada $i \in \mathcal{J} = \{1, 2, \dots, N\}$.

O conjunto \mathcal{C} é chamado de dicionário (*codebook*) e tem dimensão N . A taxa de codificação para a quantização vetorial é

$$r = \frac{\log_2 N}{k} \quad (2)$$

que mede o número de bits por amostra usados para representar o sinal de entrada.

Associado a cada vetor-código, \mathbf{y}_j , existe uma região de Voronoi, ou região do vizinho mais próximo, que é definida por

$$R_i = \{\mathbf{x} : d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i) \leq d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_j) \text{ para todo } j \in \mathcal{J}\} \quad (3)$$

em que $d(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ é uma medida de distorção entre os vetores \mathbf{x} e \mathbf{y} , a mais utilizada é a distância euclidiana ao quadrado.

O codificador procura o vetor-código com menor distorção, $d(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i)$, para o vetor de entrada, e então o índice i é transmitido pelo canal ao decodificador. O decodificador possui uma cópia do dicionário e procura pelo vetor-código correspondente ao índice i e produz o vetor \mathbf{y}_i .

A QV aplicada em imagens pode ser feita pela decomposição da imagem em blocos de tamanho fixo sem sobreposição e usar esses blocos como vetores. Por exemplo, se utilizarmos blocos de 4×4 pixels, cada vetor terá dimensão 16.

Um ponto importante na quantização vetorial é como encontrar as regiões de Voronoi e seus representantes, ou seja, determinar os vetores-código \mathbf{y}_j do dicionário. Existem alguns algoritmos que realizam esse treinamento ou projeto do dicionário, como o algoritmo LBG (Linde-Buzo-Gray), o algoritmo K-means e o algoritmo de Kohonen.

O algoritmo de Kohonen é considerado um mapa auto-organizável (*Self-Organizing Map* – SOM). É baseado em redes neurais artificiais e utiliza o método de aprendizagem por competição [3]. O diferencial do algoritmo SOM é a sua organização topológica, ou seja, vetores-código próximos no dicionário apresentam variações mínimas, isso implica que o erro no índice para um de seus vizinhos causa um erro pequeno no sinal reconstruído.

IV. TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA

O princípio dessa técnica é procurar uma representação na qual a informação do sinal seja concentrada em um pequeno número de coeficientes. Com isso, o número de coeficientes necessário para a transmissão ou armazenamento será reduzido.

Um modo prático de decompor um sinal em suas componentes wavelets é aplicar um banco de filtros. A Figura 1 representa esse banco de filtros, sendo $I(x, y)$ a imagem original, G_x é um filtro passa alta, H_x é um filtro passa baixa e $\downarrow 2$ é uma decimação por 2.

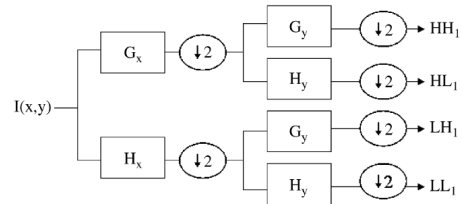


Fig. 1. Banco de filtros para decomposição wavelet de uma imagem na escala 1.

Como resultado do banco de filtros, 4 sub-imagens são construídas, *Low-Low*, *Low-High*, *High-Low* e *High-High* na escala 1. Para obter a escala 2 na decomposição, o banco de filtro é aplicado novamente apenas na sub-imagem *Low-Low*, o que gera 4 novas sub-imagens [5], e o processo pode ser repetido para obter outros níveis de decomposição.

V. DWT E QV APLICADOS À TRANSMISSÃO DE IMAGENS EM CANAIS HF

Em [4] é proposto um esquema de codificação para transmissão de imagens em canais de HF que utiliza transformada wavelet e quantização vetorial mapeada otimamente em uma modulação digital QAM. Nesse trabalho para aumentar a taxa de compressão e obter uma estrutura hierárquica dos dados, a imagem é decomposta em seus coeficientes wavelets. A wavelet utilizada foi a biortogonal de Daubechies (9/7) na escala 3, o que gerou 10 subimagens que podem ser classificadas como:

- Informações mais significantes: LL_3 .
- Informações significantes: HL_3, LH_3, HH_3
- Informações de importância média: HL_2, LH_2, HH_2
- Informações de baixa importância: HL_1, HL_1, HL_1

O dicionário da quantização vetorial do esquema proposto contém 256 vetores-código que foram treinados pelo algoritmo SOM em uma topologia retangular 16×16 . Com isso, é possível realizar um mapeamento direto de cada vetor-código com um símbolo da constelação 256-QAM e manter a organização do dicionário.

Nesta configuração, utilizando código Gray os pontos da constelação diferem de apenas um bit, e um erro de canal levará a um ponto próximo na constelação, que devido ao mapeamento direto na constelação produz um vetor decodificado muito similar ao original.

Para aumentar a compressão, os coeficientes das subimagens HH_3, HH_2, LH_1, HL_1 e HH_1 são descartados pois contêm

poucas informações sobre a imagem. As outras subimagens são quantizadas vetorialmente, e para isso foram construídos 5 dicionários, um para cada subimagem que será transmitida.

- Os vetores dos dicionários de LH_2 e HL_2 possuem tamanho 16 (4×4);
- Os vetores do dicionário LH_3 possuem tamanho 2 (1×2);
- Os vetores do dicionário HL_3 possuem tamanho 2 (2×1);
- Os vetores do dicionário LL_3 possuem tamanho 1 (quantização escalar).

A taxa de compressão resultante com esse processo é 25,6.

Entretanto, mesmo tendo projetado um sistema para transmissão em canais HF, os resultados apresentados em [4] foram obtidos para canais Gaussianos, e utilizam constelações 256 QAM para transmissão, o que não é viável para canais HF. Para esses canais é necessário utilizar constelações de ordem menor, por exemplo 4-QAM, e para utilizar as mesmas ferramentas faz-se necessário o projeto mais elaborado da quantização vetorial que permita a associação com os símbolos da modulação mantendo o efeito de que pequenos erros no canal levem a símbolos vizinhos na constelação, que por sua vez levem a vetores vizinhos no dicionário.

Esse projeto especial chega a ser citado em algumas trabalhos anteriores, [6] [7], mas até onde vai o nosso conhecimento, não há trabalhos explicando como implementá-lo e qual o desempenho do sistema que o utiliza. Na próxima seção será mostrado o projeto do dicionário necessário para usar uma constelações 4-QAM, e em seguida será analisado o desempenho do sistema em canais com desvanecimento plano e para os canais HF.

VI. IMPLEMENTAÇÃO

Nos trabalhos anteriores foi proposto o uso de constelações 256-QAM para os canais HF [4], porém devido às limitações desses canais, é adequado utilizar modulações de baixa cardinalidade, como 4-QAM. Neste trabalho vamos mostrar como utilizar uma constelação 4-QAM de tal sorte que um erro no canal represente a mudança entre vetores código vizinhos.

O mapeamento dos vetores código nos símbolos da modulação é feito de acordo com sua coordenada na topologia do SOM. Por exemplo, utilizando um dicionário com 16 vetores organizados em um topologia (4×4) pode-se mapear cada um desses vetores em um ponto da constelação 16-QAM, pela associação do valor de componente da fase na modulação a uma linha do dicionário, e cada valor de amplitude da componente em quadratura associada a uma coluna do dicionário.

Utilizando o SOM em 2 dimensões transmite-se 16 vetores código mantendo a relação de vizinhança (4×4). Para melhorar a representatividade do dicionário é necessário aumentar o número de vetores código, logo para transmitir esses vetores mantendo a relação de vizinhança pode-se aumentar a ordem da modulação, o que não é interessante para o canal aqui considerado, ou utilizar uma topologia com mais dimensões mantendo a modulação. Por exemplo, se utilizamos um dicionário com 4 dimensões ($4 \times 4 \times 4 \times 4$) teremos 256 vetores, e pode usar duas transmissões com a constelação 16-QAM para enviar o índice de um vetor, a primeira transmissão com os dois primeiros índices (4×4) e a segunda com os dois últimos índices (4×4).

Estendendo essa ideia para a modulação 4-QAM, que é o objetivo desse trabalho, para um dicionário com 256 símbolos que mantenha a regra da vizinhança, deve-se utilizar 8 dimensões ($2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$) e 4 transmissões consecutivas, cada uma transportando dois índices.

VII. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados sobre o desempenho do sistema proposto. Inicialmente, para avaliar o efeito da compressão, os efeitos do canal foram desconsiderados, realizou-se a compressão da imagem e em seguida a sua recuperação, sem intruzir os erros do canal ou realizar qualquer processamento na imagem comprimida, após a recuperação mede-se PSNR.

Na Tabela I estão os resultados da taxa de compressão e relação sinal-ruído de pico (PSNR - *Peak Signal-to-Noise Ratio*) para alguns esquemas de codificação, sendo eles: a quantização vetorial aplicada diretamente nos *pixels* da imagem com vetor-código de tamanho 3×3 (**QV-1**) e 4×4 (**QV-2**), a quantização vetorial aplicada nos coeficientes da DWT utilizando os vetores-código de LH_2 e HL_2 com tamanho 16 (**DWT+QV-1**) e 4 (**DWT+QV-2**) treinados utilizando o algoritmo SOM com topologia bidimensional e vetores-código de LH_2 e HL_2 com tamanho 16 treinados com a topologia do SOM em 8 dimensões (**DWT+QV-3**). Na transformada wavelet foram utilizadas as wavelets biortogonais de Daubechies, a mesma utilizada no padrão JPEG2000.

TABELA I
COMPARAÇÃO DE PSNR E TAXA DE COMPRESSÃO DOS ESQUEMAS DE CODIFICAÇÃO QV E DWT+QV

	Taxa de compressão	bits/pixel	PSNR
QV-1	9	0,89 bpp	26,78 dB
QV-2	16	0,5 bpp	25,98 dB
DWT+QV-1	25,6	0,3125 bpp	28,65 dB
DWT+QV-2	16	0,5 bpp	29,46 dB
DWT+QV-3	25,6	0,3125 bpp	27,59 dB

Observando os valores da PSNR, observa-se inicialmente que o uso da DWT implica num aumento da taxa de compressão, sem grandes degradações da PSNR. O esquema **DWT+QV-2** apresentou o melhor desempenho, isso se deve ao fato de se utilizar um vetor de dimensão menor, o que representa melhor os coeficientes, porém implica numa taxa de compressão menor. Por outro lado, o esquema **DWT+QV-3** apresentou desempenho menor, porém como será visto mais adiante quando os efeitos do canal são incluídos, essa última topologia tem desempenho melhor que outra com dicionário cuja topologia é menor.

Devido às intempéries do canal HF, os sistemas que transmitem por canal necessitam de um conjunto de proteções como equalização, códigos para controle de erro e entrelaçamento. Neste trabalho estamos interessados em avaliar o desempenho da redução na ordem da modulação e mudança na topologia do codificador vetorial, e para tanto vamos apresentar os resultados para o canal com desvanecimento Rayleigh.

Nas simulações consideramos a transmissão da imagem Lena em um canal com desvanecimento Rayleigh lento

e plano, entrelaçamento infinito e ruído aditivo Gaussiano branco (AWGN - *do inglês Additive White Gaussian Noise*). No receptor considera-se conhecimento perfeito do canal e usa-se o critério de máxima verossimilhança (*Maximum Likelihood - ML*) na decisão.

Como a métrica de desempenho utilizada foi a PSNR da imagem recebida, na Figura 2 temos a variação desse parâmetro em função da relação sinal-ruído do canal (SNR - *Signal-to-noise ratio*) em dB, para duas topologias do dicionário, uma com duas dimensões (SOM-2D) e outra com oito dimensões (SOM-8D).

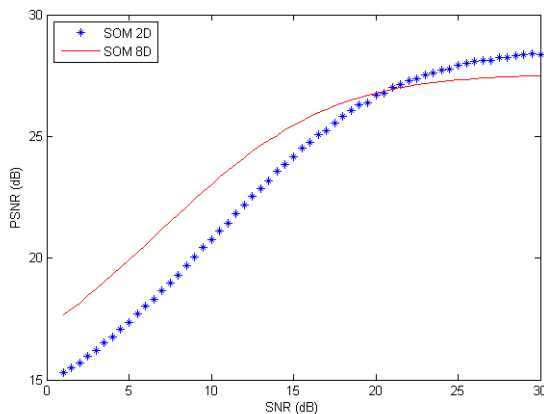


Fig. 2. Variação da PSNR em função da SNR para duas topologias do codificador SOM.

Como esperado, a medida que a SNR aumenta a PSNR melhora para ambos os casos. Porém até aproximadamente 18dB, a transmissão que utiliza o SOM-8D tem desempenho melhor, isso se deve ao fato que no SOM 2D um erro de transmissão não leva a um índice vizinho. Por exemplo, se o índice transmitido for a posição de coordenadas (12,12) cuja representação binária é (11 00, 11 00), e o receptor detectar (01 00, 11 00), posição (4,12). O índice recebido não é vizinho do transmitido, o que ocasiona uma discrepância maior entre os vetores-código, aumentando o erro e diminuindo o PSNR da imagem.

Por sua vez, a topologia em hiper-cubo de 8 dimensões resolve esse problema pois aumenta o número de vizinhos e é mais adequada à modulação 4-QAM. Por exemplo, um índice nessa topologia é representado por 8 coordenadas, se ocorrer um erro na recepção que leve a mudança de uma das 8 coordenadas no receptor o vetor-código terá um valor próximo do transmitido.

Como o SOM 8D possui apenas dois valores para cada coordenada eles são representados de forma binária. Assim, se o índice transmitido for a posição de coordenadas (0,0, 1,0, 0,0, 1, 1) e o receptor detectar (1, 0, 1,0, 0, 0, 1, 1), essas duas coordenadas são vizinhas e possuem vetores-código próximos, diminuindo o erro e aumentando a PSNR da imagem.

VIII. CONCLUSÕES

Em trabalhos anteriores foi proposto o uso da transformada wavelet, quantização vetorial e associação com a modulação

de vetores código com pontos da modulação 256-QAM para transmissão em canais HF. Visto que essa modulação tem alta cardinalidade para canais HF, neste trabalho fizemos uma extensão dessa proposta considerando a utilização da modulação 4-QAM e um projeto apropriado do dicionário.

O primeiro resultado mostrou que o uso da DWT proporciona um aumento na taxa de compressão sem prejudicar a PSNR da imagem recuperada. Em seguida foi mostrado que uma topologia formada por um hiper-cubo de 8 dimensões, quando não há a presença do canal, tem desempenho abaixo de outras topologias menores, e que essa lógica se inverte quando são incluídos os efeitos do canal, visto que a vizinhança proporcionada pela topologia com 8 dimensões ajuda a reduzir os efeitos do canal.

Como trabalhos futuros propõe-se a inclusão dos demais efeitos do canal HF para obter o desempenho do sistema com DWT, topologia do SOM 8-dimensional e modulação 4-QAM. Além disso, pode-se investigar se técnicas de melhoria da qualidade das imagens, como super-resolução [8], podem ser usadas para melhorar o desempenho do sistema.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de apoio ao ensino e à pesquisa científica e tecnológica em defesa nacional (Pró-Defesa) PD 07/2008.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

À Coordenadoria de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPELE) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande.

REFERÊNCIAS

- [1] Campos, Weber S. Equalização Adaptativa para Receptores de Portadora Única em HF. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro, 2002.
- [2] Gersho, A. and Gray, R.M., *Vector Quantization and Signal Compression*, Springer, 1992
- [3] Haykin, S.S. *Neural Networks and Learning Machines*, Vol. 3, Prentice Hall, 2009.
- [4] Chatellier, C. and Boeglen, H. and Perrine, C. and Olivier, C. and Haerberlé, O. *A robust joint source channel coding scheme for image transmission over the ionospheric channel*. Signal Processing: Image Communication, Vol. 22, No 6, pp. 543-556, 2007, Elsevier.
- [5] de Oliveira, H.M. *Análise de Sinais para Engenheiros: Uma abordagem via WAVELETS*, Brasport, 2007.
- [6] Aitsab, O., Pyndiah, R. e Solaiman, B. *Joint optimization of multi-dimensional SOFM codebooks with QAM modulation for vector quantized image transmission*. Proceedings IWISP'96, pp 3-6, 1996, Elsevier Science Ltd.
- [7] Leung, C. e Chan, L. *Transmission of vector quantized data over a noisy channel*, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 8, No 3, pp. 582-589, 1997.
- [8] Glasner, D. and Bagon, S. and Irani, M. *Super-resolution from a single image*, Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on, pp. 349-356. doi = 10.1109/ICCV.2009.5459271.