

Aplicação da Transformada de Kahunen e Loève na Compressão de Imagens Multiespectrais Usando a Recomendação do CCSDS

Oscavo G. Prata Jr e Marcelo S. Pinho

Resumo—Este trabalho propõe três formas de se aplicar a transformada de Kahunen e Loève (KLT) no algoritmo de compressão de imagens recomendado pelo CCSDS, com o objetivo de reduzir a redundância entre as bandas de imagens multiespectrais. Os esquemas propostos operam com taxa fixa e possuem um algoritmo simples de alocação de taxas para as diferentes componentes da KLT. Os novos métodos são testados em um conjunto de quatro imagens capturadas pelo CCD do CBERS-2B. Os resultados mostram que estes novos métodos podem obter melhorias acima de 2 dB quando comparados com os resultados do algoritmo recomendado pelo CCSDS.

Palavras-Chave—Compressão de dados, compressão de imagens multiespectrais, transmissão de imagens de sensoriamento remoto.

Abstract—This work proposes three different ways to apply the Kahunen and Loève Transform (KLT) in the algorithm for image compression recommended by CCSDS, in order to reduce the interband redundancy of multispectral images. The proposed schemes work with a fixed rate and have a simple algorithm to allocate the rate over the KLT components. The new methods are tested in a test set composed by four images from the CCD of CBERS-2B. The results show that these new methods can obtain an improvement over 2 dB when compared to the result of the CCSDS algorithm.

Keywords—Data compression, multispectral image compression, remote sensing image transmission

I. INTRODUÇÃO

A utilização de imagens obtidas por satélites de sensoriamento remoto tem auxiliado de forma significativa a prestação de diferentes tipos de serviços a sociedade. De fato, o estudo do clima e o monitoramento de áreas de preservação ambiental são alguns exemplos de serviços onde este tipo de imagens têm sido amplamente utilizadas. Com o avanço tecnológico dos dispositivos de imageamento, a resolução espacial e em frequência das imagens vem melhorando de forma significativa. Como consequência desta melhoria, a qualidade dos serviços aumenta mas a taxa de bits (que precisam ser enviados para a terra) também cresce. Infelizmente, as restrições de potência e de espectro nos sistemas de comunicação utilizados pelos satélites de sensoriamento remoto produzem uma limitação nesta taxa de bits. A utilização de compressores de imagens pode tornar o sistema de transmissão mais eficiente e pode viabilizar um aumento na resolução mesmo com as limitações da taxa de bits.

Oscavo G. Prata Jr e Marcelo S. Pinho, Divisão de Engenharia Eletrônica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, Brasil, E-mails: oprata@gmail.com, mpinho@ieee.org. Marcelo S. Pinho agradece o apoio da Agência Espacial Brasileira e da FAPESP (2010/11695-1).

O problema da compressão de imagens tem sido estudado por mais de duas décadas e diversos autores já apresentaram diferentes soluções para este problema [1]. Por permitirem uma redução da taxa de transmissão maior, grande parte dos estudos são dedicados a compressores com perda, i.e., compressores onde a versão recuperada após a descompressão é uma aproximação da imagem original. Um dos métodos de compressão mais utilizados na prática é o do padrão JPEG, apresentado no início da década de 1990 [2]. Com os avanços na área de processamento digital de sinais, após a introdução do JPEG, surgiram vários algoritmos de compressão que usavam transformadas multiresolução, tais como o Zerotree [3] e o SPIHT [4]. Além de atingirem desempenhos superiores ao do JPEG, o fato destes algoritmos usarem transformadas multiresolução permitiam um esquema simples de codificação progressiva. Por conta destas características, tais codificadores se tornaram muito populares e no final da década de 1990, o comitê do JPEG decidiu dar início ao desenvolvimento de um novo padrão, denominado JPEG2000 [5]. Embora o desempenho deste novo padrão seja significativamente superior ao do JPEG, ele possui uma complexidade computacional maior.

Em aplicações espaciais, a complexidade computacional é um fator crítico. Por esta razão, o *Consultative Committee for Space Data Systems* (CCSDS) recomenda a utilização de um algoritmo com complexidade reduzida, que segue princípios similares ao do JPEG2000 [6]. Embora o desempenho deste algoritmo seja um pouco pior que o do JPEG2000 [7], [8], [9], o relacionamento entre desempenho e complexidade computacional é vantajoso para aplicações espaciais.

Em grande parte dos satélites de sensoriamento remoto, os sistemas de imageamento são projetados para operar com imagens multiespectrais. No entanto, a recomendação do CCSDS não contempla forma alguma de se explorar a redundância existente entre as diferentes bandas da imagem. A partir da literatura da área de compressão de imagens, é possível observar que existem diferentes formas de se explorar esta redundância. A utilização de uma transformada multiresolução em três dimensões [10] e a utilização da transformada de Kahunen e Loève (KLT — *Kahunen e Loève Transform*) [11] são exemplos de técnicas que são normalmente utilizadas. Mais recentemente, foi apresentado um método baseado em aproximações sucessivas para vetores que também é capaz de explorar a redundância entre bandas [12]. Este trabalho apresenta novos métodos de compressão de imagens que utilizam a KLT (como forma de explorar a redundância entre as bandas de imagens multiespectrais) em conjunto com o algoritmo de

compressão de imagens recomendado pelo CCSDS. Imagens do CBERS-2B (terceiro satélite lançado dentro do programa China-Brazil Earth Resources Satellite) são utilizadas para avaliar o desempenho dos métodos propostos. Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 introduz a recomendação CCSDS para a compressão de imagens. A aplicação conjunta da KLT e da recomendação CCSDS é o tema da Seção 3. Os resultados obtidos para as imagens do CBERS-2B são apresentados na Seção 4. A Seção 5 fecha o artigo, apresentando as conclusões.

II. O ALGORITMO DE COMPRESSÃO RECOMENDADO PELO CCSDS

Conforme mencionado na Introdução, o algoritmo recomendado pelo CCSDS segue princípios similares ao do compressor JPEG2000. Por conta deste fato, o algoritmo da recomendação pode operar em dois modos: (a) sem perda e (b) com perda e também permite a utilização de um esquema de decodificação progressiva. Assim como a maioria dos compressores de imagem, o algoritmo recomendado é estruturado em três estágios: (a) transformada, (b) quantizador e (c) codificador de entropia.

O primeiro estágio do compressor é uma transformada wavelet discreta (DWT — *Discrete Wavelet Transform*). Neste estágio, a recomendação prevê a utilização de uma DWT real ou de uma DWT inteira. Esta última transformada deve ser utilizada sempre que se deseja operar no modo sem perda. Em geral, no modo com perda, a utilização da DWT real permite atingir taxas de compressão superiores às obtidas com a DWT inteira. As transformadas da recomendação são ligeiramente diferentes das usadas no JPEG2000 e utilizam filtros de análise passa-baixas e passa-altas de ordem 9 e 7 respectivamente, tanto para a DWT real quanto para a DWT inteira. A Tabela I apresenta os coeficientes dos filtros de análise utilizados na DWT real. A DWT inteira é uma aproximação obtida a partir da transformada real. No método recomendado, as duas transformadas são aplicadas até o 3º nível. Sendo assim, a imagem transformada possui 10 sub-bandas, conforme ilustra a Figura 1.

TABELA I
COEFICIENTES DOS FILTROS DE ANÁLISE DA DWT 9/7

j	Passa-Baixas — h_j	Passa-Altas — g_j
0	0.852698679009	-0.788485616406
± 1	0.377402855613	0.418092273222
± 2	-0.110624404418	0.040689417609
± 3	-0.023849465020	-0.064538882629
± 4	0.037828455507	0

Após a DWT, o algoritmo da recomendação realiza um truncamento simples dos coeficientes, que na prática corresponde ao segundo estágio da estrutura padrão de um compressor de imagens, i.e., o quantizador. É neste estágio em que a perda de informação ocorre, pois com os coeficientes truncados não é possível reverter a transformação da DWT 9/7 sem erro.

O terceiro estágio do algoritmo recomendado pelo CCSDS é um codificador de entropia que executa a codificação dos

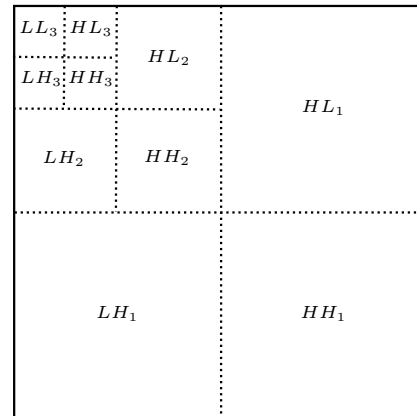


Fig. 1. Sub-bandas da DWT

planos de bits dos coeficientes da DWT. Embora este codificador de entropia tenha baixa complexidade computacional, ele possui um grande número de detalhes e por isso neste artigo será apresentado apenas suas linhas gerais. Todos os detalhes do método estão disponíveis na recomendação [6]. O algoritmo de codificação opera em cima de uma estrutura em árvore da DWT e é dividido em cinco estágios. A Tabela II apresenta quais os bits são codificados em cada um dos cinco estágios. São a estrutura em árvore e a codificação em planos de bits que permitem que a decodificação seja realizada de forma progressiva.

TABELA II
CODIFICAÇÃO DOS PLANOS DE BITS

Estágio 1	Bits mais significativos dos coeficientes da sub-banda LL_3
Estágio 2	Bits mais significativos dos coeficientes das sub-bandas HL_3 , LH_3 e HH_3
Estágio 3	Bits mais significativos dos coeficientes das sub-bandas HL_2 , LH_2 e HH_2
Estágio 4	Bits mais significativos dos coeficientes das sub-bandas HL_1 , LH_1 e HH_1
Estágio 5	Bits menos significativos de todas as sub-bandas

Por fim, é importante ressaltar que a recomendação do CCSDS apresenta um método de compressão para uma imagem com uma única banda. Sendo assim, os satélites com imagens multiespectrais que o utilizam o algoritmo recomendado, em geral, aplicam o compressor em cada uma das bandas de forma independente. Isto significa que a redundância entre as bandas não é explorada.

III. APLICANDO A KLT NA RECOMENDAÇÃO CCSDS

Existem diferentes formas de se explorar a redundância entre as bandas de uma imagem multiespectral. Uma delas é a utilização de transformadas em três dimensões. Por exemplo, em [10] é apresentado um método para compressão de imagens multiespectrais, baseado no SPIHT, utilizando uma DWT

tridimensional. Outra forma bastante difundida na literatura é a utilização de técnicas para descorrelacionar as bandas da imagem multiespectral. Este processo de descorrelação pode ser realizado através da KLT [5] ou de algum outro método equivalente [13]. Em [11] foi realizada uma comparação entre codificadores que utilizam a DWT tridimensional e a KLT como forma de explorar a redundância entre as bandas de imagens multiespectrais. A conclusão do estudo foi a de que a KLT produz resultados melhores que a DWT tridimensional.

A contribuição deste trabalho é a apresentação de novos métodos de compressão de imagens, baseados no algoritmo recomendado pelo CCSDS, utilizando a KLT para explorar a redundância entre as bandas de imagens multiespectrais. Seja $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_N)^T$ um vetor aleatório com matriz de covariâncias \mathbf{C}_X . Seja \mathbf{A} uma matriz $N \times N$, representando uma transformação linear de \mathbb{R}^N em \mathbb{R}^N . Neste caso, a aplicação desta transformação linear no vetor \mathbf{X} produz um novo vetor aleatório $\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}$ cuja matriz de covariâncias é dada por $\mathbf{C}_Y = \mathbf{A}\mathbf{C}_X\mathbf{A}^T$. A transformação linear \mathbf{A} é chamada de Transformada de Kahunen e Loève quando a matriz é construída a partir dos autovetores $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_N$ de \mathbf{C}_X , i.e.,

$$\mathbf{A} = [\mathbf{e}_1 \ \mathbf{e}_2 \ \dots \ \mathbf{e}_N]^T$$

Neste caso, é possível mostrar que a matriz de covariâncias do vetor aleatório transformado é dada por

$$\mathbf{C}_Y = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_N \end{pmatrix},$$

onde λ_i é o autovalor associado ao autovetor \mathbf{e}_i . A aplicação da KLT nas bandas de uma imagem multiespectral pressupõe um modelo probabilístico para os pixels e necessita do conhecimento da matriz de covariâncias do modelo probabilístico. Na prática, em geral, a matriz de covariâncias é estimada a partir das bandas. Portanto, é importante observar que a transformada depende da imagem a ser comprimida. Sendo assim, em um esquema real, os coeficientes da KLT precisam ser transmitidos junto com a imagem comprimida.

Existem diferentes formas de se utilizar a KLT para explorar a redundância entre as bandas de uma imagem multiespectral em conjunto com o algoritmo recomendado pelo CCSDS. Neste trabalho, são propostos três métodos distintos. Seja N o número de bandas da imagem multiespectral a ser comprimida. No primeiro método, a KLT é aplicada diretamente na imagem, dando origem a N componentes. Após a aplicação da KLT, cada uma das componentes é comprimida de forma independente pelo algoritmo recomendado. Neste trabalho, este primeiro método será denominado KLT+CCSDS. No segundo método, a DWT é calculada de forma independente para cada banda da imagem e a KLT é aplicada nas imagens transformadas. Após a aplicação da KLT, a quantização dos coeficientes da transformada e a codificação dos planos de bits são realizados de forma independente em cada uma das N componentes obtidas pela KLT. Neste trabalho, este segundo método é denominado DWT+KLT1+CCSDS. No último método proposto, a DWT é aplicada de forma inde-

pendente em cada uma das bandas da imagem multiespectral e a KLT é aplicada de forma independente em cada uma das sub-bandas da DWT. Portanto, neste último método, são utilizadas 10 transformadas de Kahunen e Loève diferentes (uma para cada sub-banda). Este último método é chamado de DWT+KLT2+CCSDS.

Neste trabalho, os três métodos propostos operam com taxa de bit fixa, i.e., a quantização e a codificação de entropia são ajustadas de forma a garantir esta taxa, em bits por pixel. Seja R a taxa em bits por pixel desejada. Como nos três métodos a quantização e a codificação de entropia são aplicadas de forma independente nas componentes originadas pela aplicação da KLT, cada uma das componentes terá uma taxa R_1, \dots, R_N e estas somadas devem ser igual a R . É importante observar que após a aplicação da KLT, cada uma das componentes carrega informação de todas as bandas da imagem multiespectral. Além disso, a importância de cada uma das componentes na reconstrução das bandas e a dificuldade de se comprimir cada uma das componentes podem variar. Sendo assim, é fundamental utilizar uma estratégia eficiente para a alocação de taxa de bits, i.e., para encontrar uma coleção de taxas R_1, \dots, R_N que minimizem a distorção total da imagem multiespectral.

A estratégia de alocação de taxas utilizada neste trabalho é baseada no valor da variância das imagens que são aplicadas na entrada do quantizador e do codificador de entropia. A estratégia foi obtida usando as expressões da curva taxa-distorção para fontes gaussianas. Sejam N fontes gaussianas com variâncias dadas por $\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2$. Neste caso, se cada uma das fontes for comprimida usando uma taxa R_i , as distorções são dadas por

$$D_i = \sigma_i^2 2^{-2R_i},$$

$i = 1, \dots, N$. Sendo assim, a distorção total para todas as fontes é dada por

$$\begin{aligned} D &= \sum_{i=1}^N D_i \\ &= \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 2^{-2R_i} \end{aligned} \quad (1)$$

Minimizando (1) dada restrição de que $\sum_{i=1}^N R_i = R$, é possível chegar a solução

$$R_i = \frac{R}{N} - \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \log_2 \sigma_j^2 + \frac{1}{2} \log_2 \sigma_i^2, \quad (2)$$

$i = 1, \dots, N$. Dependendo dos valores das variâncias $\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2$, as taxas obtidas por (2) podem ser negativas ou podem assumir valores muito altos. O caso de taxas negativas indicam que tal componente deveria ser descartada pois valeria mais a pena gastar a taxa com as outras componentes. Os valores muito altos, nem sempre fazem sentido no caso prático em questão, pois podem ser superiores a taxa obtida pelo algoritmo recomendado pelo CCSDS operando com a menor distorção possível. Para evitar os casos extremos, a alocação de taxa adotada neste trabalho limita R_i ao intervalo $[R_{\min}; R_{\max}]$. A taxa mínima, R_{\min} é ajustada para garantir

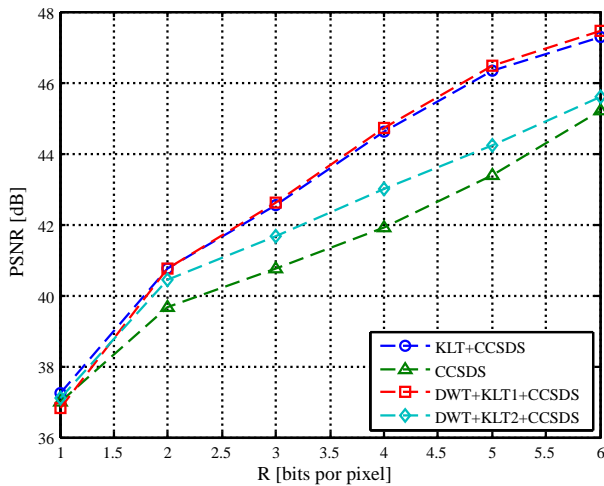


Fig. 2. Resultados para a primeira imagem

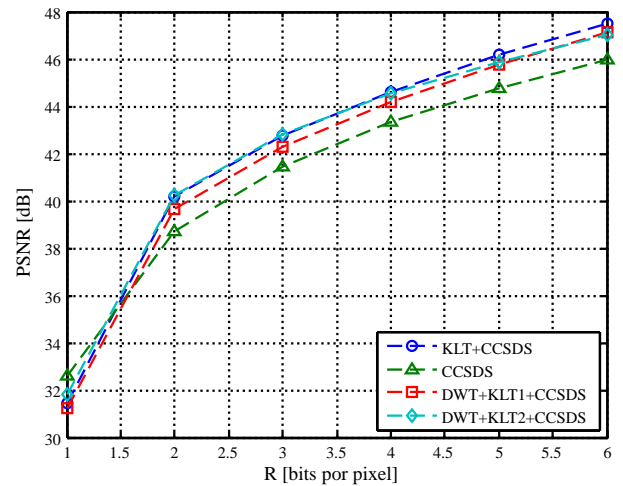


Fig. 3. Resultados para a segunda imagem

que pelo menos alguma parcela da componente seja codificada. O objetivo da taxa R_{max} é evitar que uma das componentes receba quase toda a taxa disponível para as N componentes.

IV. RESULTADOS

Os três métodos de compressão foram implementados em *software* e testados em quatro imagens capturadas pela câmera CCD de alta resolução do CBERS-2B. As imagens desta câmera possuem cinco bandas, operando nas faixas $0,51 - 0,73\mu m$ (banda 1), $0,45 - 0,52\mu m$ (banda 2), $0,52 - 0,59\mu m$ (banda 3), $0,63 - 0,69\mu m$ (banda 4) e $0,77 - 0,89\mu m$ (banda 5). As imagens utilizadas nos testes foram trechos das imagens brutas (i.e., sem qualquer processamento) e com 512 linhas e 512 colunas. A taxa mínima utilizada no algoritmo de alocação de taxa foi de $R_{min} = 0,125R$ bits por pixel e a taxa máxima foi ajustada para $R_{max} = 0,4R$ bits por pixel, sendo R a taxa total para as cinco bandas. As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram as curvas taxa versus PSNR (*Peak-Signal to Noise Ratio*) para as quatro imagens testadas. Nas Figuras, as taxas apresentadas são os valores para as cinco bandas, i.e., uma taxa igual a 5 bits por pixel representa uma taxa de 1 bit por pixel por banda, o que corresponde a uma taxa de compressão de 8:1. Ainda nas Figuras, o PSNR é calculado sobre as cinco bandas da imagem multiespectral. É interessante observar que os métodos DWT+KLT1+CCSDS e KLT+CCSDS são os que apresentam melhores resultados, sendo que a diferença de desempenho pode ser superior a 2 dB.

É importante observar que o algoritmo de alocação de taxa utilizado neste trabalho foi baseado em expressões da curva taxa-distorção de fontes gaussianas. Como as imagens transformadas não seguem a distribuição gaussiana e como o algoritmo da recomendação não atinge a curva taxa-distorção, esta estratégia não é a melhor possível. De fato, a alocação ótima é aquela que atinge o valor máximo de PSNR, ou de forma equivalente, o menor erro quadrático médio (MSE — *Mean Square Error*). O MSE total pode ser obtido a partir do MSE de cada componente da KLT e resolvendo o problema de minimização com a restrição $\sum_i R_i = R$, é possível concluir

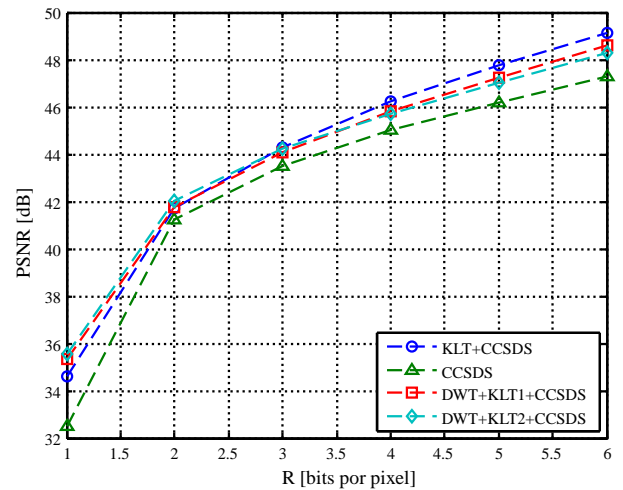


Fig. 4. Resultados para a terceira imagem

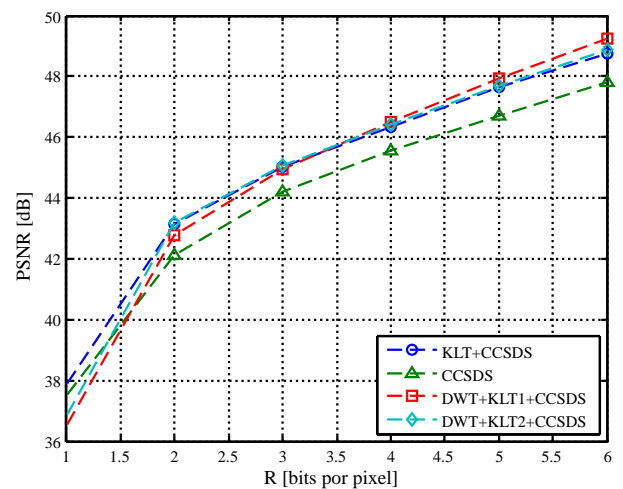


Fig. 5. Resultados para a quarta imagem

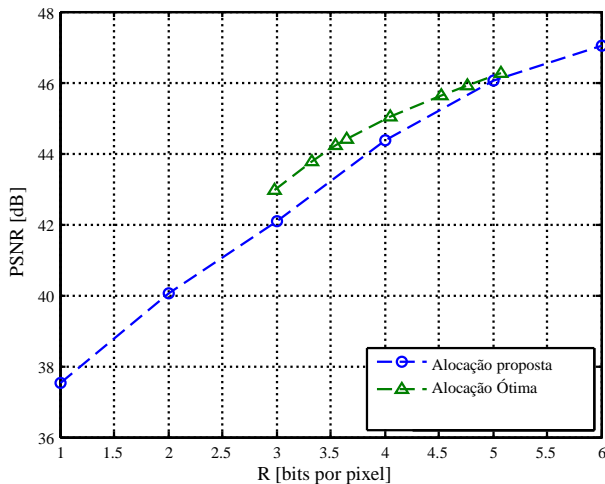


Fig. 6. Avaliação da estratégia de alocação de taxas

que a solução ótima é dada pelos pontos R_1, \dots, R_5 em que a derivada da curva taxa-distorção de cada componente é constante. Portanto, é possível avaliar o resultado que seria obtido com a solução ótima através do levantamento das curvas taxa-distorção de todas as componentes da KLT da imagem. Este levantamento é feito através da fixação do valor da derivada nas cinco curvas, produzindo a alocação ótima para esta derivada fixa. Note que a taxa total não é fixa neste critério, mas sim a derivada da curva. Portanto, além de possuir uma complexidade maior que a estratégia proposta neste trabalho, este método não opera com taxa fixa.

Com o objetivo de avaliar a estratégia de alocação de taxas utilizada neste trabalho, foram levantadas as curvas taxa-distorção das componentes da KLT da primeira imagem e foi realizada a alocação de acordo com o critério ótimo, considerando o método KLT+CCSDS. A Figura 6 apresenta a comparação entre a alocação ótima e a adotada neste trabalho. Nesta Figura, é possível notar que para taxas altas, o método atinge resultados próximos do ótimo. No entanto, para taxas mais baixas, a diferença chega perto de 1 dB, o que talvez justifique a pouca diferença entre os métodos propostos e o CCSDS original na região de baixas taxas. É importante notar, que para traçar a curva com alocação ótima, foi necessário o levantamento das cinco curvas taxa-distorção das componentes. Sendo assim, este método além de não operar com taxa fixa, possui uma complexidade significativamente maior que o esquema de alocação proposto neste trabalho.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou três formas de se aplicar a KLT no algoritmo de compressão de imagens recomendado pelo CCSDS. A utilização da transformada visa explorar a redundância entre as bandas de imagens multiespectrais. O trabalho desenvolvido teve seu foco no modo de operação com perda de informação e com algoritmos capazes de operar com taxa fixa (em bits por pixel). Usando a curva taxa-distorção de variáveis aleatórias gaussianas, este trabalho propôs um método simples de alocação de taxas sobre as componentes da transformada

de Kahunen e Loève. Para avaliar o desempenho dos métodos propostos, foi utilizado um conjunto com quatro imagens multiespectrais obtidas pela câmera CCD do CBERS-2B. Os testes realizados mostraram que a utilização da KLT pode gerar ganhos acima de 2 dB quando comparado com o algoritmo recomendado pelo CCSDS aplicado de forma independente em cada uma das bandas. O método de alocação de taxas foi avaliado através da comparação com a alocação ótima para o algoritmo recomendado pelo CCSDS. Foi possível observar que o método de alocação de taxas é eficiente para a região em torno de 5 bpp, mas que pode ser melhorado na região de taxas mais baixas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em especial às Pesquisadoras Leila Fonseca e Lilian Faria pelas imagens cedidas do CBERS-2B.

REFERÊNCIAS

- [1] K. Sayood, *Introduction to Data Compression*, Morgan-Kaufmann, 3rd Ed, 2005.
- [2] W. Pennebaker, & J. Mitchell, *JPEG: Still Image Data Compression Standard*, Van Nostrand Reinhold Pub., 1992.
- [3] J. M. Shapiro, "Embedded image coding using zerotrees of wavelets coefficients," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 41, pp. 3445-3462, 1993.
- [4] A. Said, & W. A. Pearlman, "A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 6, pp. 243-250, 1996.
- [5] D. Taubman, & M. Marcellin, *JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards and Practice*, Springer, 2001.
- [6] Image Data Compression. Recommendation for Space Data Systems Standards. CCSDS 122.0-B-1. Blue Book. Issue 1. Washington D.C.: CCSDS, Novembro 2005.
- [7] Image Data Compression. Recommendation for Space Data Systems Standards. CCSDS 120.1-G-1. Green Book. Issue 1. Washington D.C.: CCSDS, Junho 2007.
- [8] M. S. Pinho, "lossless compression of images from China-Brazil earth resources satellite," *Proc. SPIE Remote Sensing*, 2011.
- [9] L. Faria, L. Fonseca, & M. Costa, "Performance evaluation of data compression systems applied to satellite imagery," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, Outubro, 2011.
- [10] P. L. Dragotti, G. Poggi, & A. R. P. Ragozini, "Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, pp. 416-428, 2000.
- [11] M. Cagnazzo, G. Poggi, & L. Verdoliva, "A Comparison of flat and object-based transform coding techniques for the compression of multispectral images," *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, 2005.
- [12] A. J. S. Dutra, W. A. Pearlman, & E. A. B. da Silva, "Successive Approximation Wavelet Coding of Hyperspectral Images," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, pp. 370-385, 2011.
- [13] A. O. Moraes, G. K. Bonetti, & M. S. Pinho, "Transformada inteira de Gram-Schmidt para imagens multiespectrais," *Anais do Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2007.