

Um Esquema para Inserção de Marcas D'Água em Imagens de Light Field

Felipe A. B. S. Ferreira e Juliano B. Lima

Resumo—Imagens produzidas a partir de *light fields* representam um avanço recente e importante em diversas aplicações. Porém, tais imagens trazem também novos desafios relacionados, por exemplo, à transmissão e à segurança dos dados. Este último aspecto é abordado no presente trabalho, em que se propõe um esquema cego e baseado em *Quantization Index Modulation* para inserção de marcas d'água em imagens *lenslet* de *light field*. O objetivo é recuperar a marca, mesmo após a imagem ter sido submetida à compressão no domínio da transformada discreta do cosseno em quatro dimensões; para isso, desenvolve-se uma estratégia de ordenação dos coeficientes no referido domínio. Os testes realizados demonstram que a marca proposta atende aos requisitos de imperceptibilidade e robustez desejados.

Palavras-Chave—Marca d'água, *Quantization Index Modulation*, *Light field*, transformada discreta do cosseno.

Abstract—Images generated from light fields represent a recent and important advance in several application scenarios. However, such images also bring new challenges related, for example, to transmission and data security. In this paper, we address the referred security aspect by the proposition of a blind watermarking scheme for lenslet light field images, which is based on *Quantization Index Modulation*. The goal is to recover the watermark even after the image is subjected to compression in the 4D discrete cosine transform domain; with this purpose, a strategy for ordering the coefficients in the mentioned domain is developed. Our tests demonstrate that the proposed watermarking technique complies with the desired imperceptibility and robustness requirements.

Keywords—Watermarking, *Quantization Index Modulation*, *Light field*, discrete cosine transform.

I. INTRODUÇÃO

Imagens de *light field* vem ganhando a atenção da comunidade acadêmica nos últimos anos [1], [2]. Isso se deve principalmente à possibilidade de captura de mais informação visual do que aquela proporcionada por métodos convencionais de imagens 2D e aos avanços no poder de processamento para tratar todos esses dados. Imagens de *light field* são formadas a partir da função plenóptica que descreve a luz em uma cena em função da posição, ângulo, comprimento de onda e tempo [2]. Essa abordagem provê benefícios e dá suporte a incrementos em operações como segmentação [3], [4], detecção por meio de oclusão [5], classificação e reconhecimento [6], [7], etc.

Apesar de suas vantagens, imagens de *light field* adicionam novos desafios para aplicações que possuem requisitos de transmissão e segurança. Com o aumento na disseminação de imagens deste tipo, surge a necessidade de novos algoritmos

Felipe A. B. S. Ferreira e Juliano B. Lima Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, E-mails: felipe.bsferreira@ufpe.br, juliano.bandeira@ieee.org. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e pela FACEPE.

para compressão [8] e proteção de propriedade intelectual [9]. Com relação a esta última, têm sido documentadas na literatura proposições de técnicas de marca d'água para *light fields* no domínio de *wavelets* [10] e da 2D-DCT [9], por exemplo. Porém, a representação mais natural de um *light field* parece ser por meio de uma estrutura 4-dimensional, com duas dimensões para o plano das vistas e outras duas para o plano espacial da imagem. Tal possibilidade é considerada em [11], em que se demonstra que, usando a 4D-DCT, consegue-se explorar com maior eficiência a redundância presente na estrutura de um *light field lenslet* do que usando suas versões bidimensionais. Essa conclusão deu suporte para que, em [12], fosse proposto um CODEC para imagens *lenslet* de *light fields* utilizando a 4D-DCT, explorando a alta correlação entre as vistas e o plano espacial. Os resultados apresentados nesses trabalhos sugerem a 4D-DCT como uma alternativa promissora para métodos de compressão de *light fields*.

No presente artigo, propõe-se uma técnica cega de marca d'água para imagens *lenslet* de *light fields* no domínio da 4D-DCT; o objetivo principal da técnica, em que a marca é inserida empregando *Quantization Index Modulation* [13], é prover alta robustez à compressão dessas imagens. Nesse contexto, propõe-se uma estratégia de origem empírica para ordenação dos coeficientes da transformada; tal procedimento é utilizado nas etapas de inserção e extração da marca. Neste trabalho, foram utilizadas 12 imagens de teste sugeridas na chamada de propostas do JPEG para codificação de *light fields* [14]; os resultados obtidos demonstram a imperceptibilidade da marca e evidenciam a robustez da técnica mesmo após o *light field* ser submetido a compressões com percentuais relativamente baixos de coeficientes retidos.

O presente trabalho é organizado da seguinte forma: na seção II, descreve-se o método proposto e, na seção III, são apresentados os materiais e métodos utilizados nas simulações. Os resultados produzidos são apresentados na seção IV e as principais conclusões são dadas na seção V.

II. MÉTODO PROPOSTO

O esquema proposto neste artigo envolve duas etapas, uma para inserção da marca d'água e outra para extração. Em ambas as etapas, são utilizados mecanismos pseudo-aleatórios que devem estar em sincronia para que a marca d'água seja recuperada corretamente. A semente utilizada para geração de sequências pseudo-aleatórias é utilizada como chave do processo de marca d'água proposto neste trabalho. A seguir, os detalhes concernentes às referidas etapas são descritos.

A. Inserção

Considere um *light field* \mathbf{L} em escala de cinza e com dimensões $S \times T \times U \times V$, e uma marca d'água \mathbf{W} com dimensões $N \times N$. Os passos para inserção da marca d'água são os seguintes.

Passo 1: Inicialmente, embaralhe os *bits* da marca d'água \mathbf{W} utilizando a transformada de Arnold [15], e obtenha a marca embaralhada \mathbf{W}' . Isso é feito para descorrelacionar os *pixels* da marca no domínio espacial. A transformada de Arnold consiste no mapeamento de um ponto (x, y) , em que $x, y \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$, noutro ponto (x', y') , em que $x', y' \in \{1, 2, 3, \dots, N\}$, conforme

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N}, \quad (1)$$

em que (x, y) e (x', y') são coordenadas dos *pixels* da marca d'água original \mathbf{W} e da embaralhada \mathbf{W}' , respectivamente.

Passo 2: Calcule a 4D-DCT do *light field* \mathbf{L} utilizando blocos \mathbf{B} de tamanho $s \times t \times u \times v$. A 4D-DCT é calculada de forma separada utilizando a 2D-DCT para computar a transformada no plano uv (plano espacial da imagem) e em seguida no plano st (plano das vistas). Para cada vista $\mathbf{B}(i, j)_{st}$, $1 \leq i \leq s$ e $1 \leq j \leq t$, calcule

$$\mathbf{B}'(i, j)_{st} = \mathbf{\Gamma}_u \times \mathbf{B}(i, j)_{st} \times \mathbf{\Gamma}_v^T \quad (2)$$

em que $\mathbf{\Gamma}_n$ é a matriz da DCT de tamanho $n \times n$ e $(\cdot)^T$ denota a transposição linha-coluna. Em seguida, para cada subvista $\mathbf{B}(k, l)_{uv}$, $1 \leq k \leq u$ e $1 \leq l \leq v$, calcule

$$\tilde{\mathbf{B}}(k, l)_{uv} = \mathbf{\Gamma}_s \times \mathbf{B}'(k, l)_{uv} \times \mathbf{\Gamma}_t^T. \quad (3)$$

Passo 3: Ordene os coeficientes de cada bloco 4-dimensional $\tilde{\mathbf{B}}$ em uma estrutura unidimensional (vide detalhes na Seção IV.A).

Passo 4: Para cada *bit* b da marca d'água embaralhada \mathbf{W}' , realize a modulação dos coeficientes em $\tilde{\mathbf{B}}$ conforme descrito a seguir. Seja C um coeficiente qualquer, faça:

$$\tilde{C} = \begin{cases} 2\Delta \times \text{arred}\left(\frac{C}{2\Delta}\right) + r, & \text{se } b = 1; \\ 2\Delta \times \text{arred}\left(\frac{C}{2\Delta}\right) - r, & \text{se } b = 0, \end{cases} \quad (4)$$

em que Δ é um parâmetro definido pelo usuário para controlar a “força” da marca d'água, $\text{arred}(\cdot)$ é uma função de arredondamento e r é um número pseudo-aleatório no intervalo $[-\Delta/2, \Delta/2]$. Os *bits* da marca d'água \mathbf{W}' são inseridos num subconjunto específico de coeficientes no domínio da transformada e respeitando a ordenação mencionada no Passo 3 (vide detalhes na Seção IV). Se um *bit* de \mathbf{W}' for inserido num coeficiente de um certo bloco transformado, o *bit* seguinte será inserido no bloco seguinte; os blocos são tomados de forma cíclica até que todos os *bits* de \mathbf{W}' tenham sido inseridos. Para aumentar a segurança do processo, a ordem em que os blocos são tomados pode ser embaralhada e servir por parte da chave para extração correta dos *bits*.

Passo 5: Calcular a 4D-IDCT para cada bloco, obtendo o *light field* $\tilde{\mathbf{L}}$ marcado.

B. Extração

Para a correta extração da marca d'água é preciso utilizar a mesma chave de geração de números pseudo-aleatórios utilizada na inserção. Os passos para extrair a marca são descritos a seguir.

Passo 1: Calcule a 4D-DCT bloco a bloco do *light field* marcado $\tilde{\mathbf{L}}$.

Passo 2: Ordene os coeficientes de cada bloco 4-dimensional transformando em uma estrutura unidimensional, conforme o Passo 3 da etapa de inserção.

Passo 3: Para cada coeficiente marcado \tilde{C} , extraia cada *bit* b da marca d'água embaralhada \mathbf{W}' :

$$b = \arg \min_{\theta \in \{0,1\}} (|C_\theta - \tilde{C}|), \quad (5)$$

em que

$$C_\theta = \begin{cases} 2\Delta \times \text{arred}\left(\frac{\tilde{C}}{2\Delta}\right) + r, & \text{se } \theta = 1; \\ 2\Delta \times \text{arred}\left(\frac{\tilde{C}}{2\Delta}\right) - r, & \text{se } \theta = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Passo 4: Aplique a transformada de Arnold inversa a \mathbf{W}' obtendo a marca d'água original \mathbf{W} :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} \pmod{N}. \quad (7)$$

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela I apresenta a lista de *light fields* utilizados neste trabalho, todos adquiridos no banco de imagens *lenslet* do *Multimedia Signal Processing Group* (<http://mmspg.epfl.ch/EPFL-light-field-image-dataset> [16]). Estas imagens foram escolhidas por fazerem parte do conjunto de teste do *JPEG Pleno Call for Proposals on Light Field Coding* [14], que consiste em uma chamada de propostas de métodos de compressão a fazer parte do padrão JPEG. Todos os *light fields* utilizados possuem 15×15 vistas, cada uma com resolução espacial de 434×625 *pixels*, ou seja, tamanho $15 \times 15 \times 434 \times 625$. Para adequar ao tamanho do bloco da 4D-DCT utilizado, $13 \times 13 \times 15 \times 15$, os *light fields* foram reduzidos para $13 \times 13 \times 420 \times 615$, sendo mantidas as vistas e *pixels* nas posições centrais, e as demais descartadas. A escolha do tamanho do bloco da 4D-DCT é função do principal objetivo deste trabalho, que é avaliar a robustez da marca d'água quando o *light field* é submetido a uma esquema de compressão utilizando a 4D-DCT [12], que utiliza o mesmo tamanho de bloco em sua proposta.

A marca d'água utilizada nos testes, que é mostrada na Figura 1, foi obtida do banco de imagens da *University of Southern California* [17]. Selecionou-se a imagem *Male*, em escala de cinza e com tamanho 1024×1024 , a qual foi também redimensionada para 512×512 e 2048×2048 . Em seguida, essas imagens foram binarizadas utilizando como limiar o valor médio de nível de cinza presente na imagem.

A marca d'água foi inserida após conversão do esquema de cores do *light field* de RGB para YCbCr. Todos os testes foram realizados utilizando apenas o canal Y e o valor do parâmetro de força, Δ , adotado para inserção da marca foi 40. Para avaliação de imperceptibilidade da marca d'água, foi



Fig. 1: Imagem *Male* binarizada utilizada como marca d'água nos testes.

utilizada a média do SSIM de cada uma das vistas individuais, ou seja

$$\text{SSIM}_{\text{médio}} = \frac{1}{ST} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^T \text{SSIM}(i, j), \quad (8)$$

em que

$$\text{SSIM}(i, j) = \frac{(2\mu_I\mu_R + Z_1)(2\sigma_{IR} + Z_2)}{(\mu_I^2 + \mu_R^2 + Z_1)(\sigma_I^2 + \sigma_R^2 + Z_2)} \quad (9)$$

corresponde ao SSIM da i -ésima e t -ésima vista, I e R correspondem, respectivamente, às imagens em avaliação e de referência da vista em questão, e Z_1 e Z_2 são definidos por $(0,01 \times F)^2$ e $(0,03 \times F)^2$, respectivamente, com F sendo a faixa dinâmica dos valores dos *pixels* (255 para 8 bpp). Para análise de robustez da marca d'água extraída, foi utilizada a correlação normalizada (NC, *normalized correlation*), definida por

$$\text{NC} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)R(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I(i, j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M R(i, j)^2}}, \quad (10)$$

em que N e M são, respectivamente, o número de linhas e o de colunas da marca d'água, e $I(i, j)$ e $R(i, j)$ é o j -ésimo *pixel* da i -ésima linha da marca d'água em avaliação e da marca d'água de referência, respectivamente.

IV. RESULTADOS

Esta seção é iniciada com a proposição de uma estratégia para ordenação dos coeficientes no domínio da 4D-DCT. O objetivo é permitir que se identifique um subconjunto de coeficientes em que seja mais adequado inserir a marca d'água no referido domínio; em linhas gerais, a ideia é evitar coeficientes que, ao serem modificados pela inserção da marca, levem a altas degradações no *light field* marcado, em relação ao original, ou tornem o processo de marcação insuficientemente robusto. Em seguida, são apresentados resultados de testes de imperceptibilidade da marca e de sua robustez à compressão no domínio da 4D-DCT, após o método descrito na Seção II ter sido aplicado empregando a estratégia de ordenação desenvolvida.

TABELA I: Lista das imagens de *light field* utilizadas neste trabalho e suas respectivas categorias.

Categoria	Nome
Studio	Ankylosaurus & Diplodocus 1
Studio	Desktop
Studio	Magnets 1
Urban	Bikes
Urban	Stone Pillars Outside
ISO and color charts	Color Chart 1
ISO and color charts	ISO Chart 12
Grids	Danger de Mort
Nature	Flowers
People	Fountain & Vincent 2
People	Friends 1
Mirrors and transparency	Vespa

A. Ordenação dos Coeficientes

Quando se aplica uma 2D-DCT a uma imagem para fins de compressão, normalmente, os coeficientes no respectivo domínio são visitados em *zig-zag* (do canto superior esquerdo para o canto inferior direito de cada bloco da imagem), a fim de que se gere uma versão vetorizada de cada bloco transformado; nas primeiras posições de cada vetor, aparecem coeficientes com magnitudes mais altas (frequências mais baixas) e, nas últimas, coeficientes com magnitudes mais baixas (frequências mais altas). Tais propriedades permitem que se explore, combinando quantização e codificação, as propriedades de compactação de energia da 2D-DCT e que se determine uma faixa de coeficientes adequada à inserção de marcas d'água robustas à respectiva compressão.

Na ausência de uma estratégia análoga à descrita acima para ordenação dos coeficientes no domínio da 4D-DCT de uma imagem de *light field*, optou-se, neste trabalho, por desenvolver uma nova abordagem. A 4D-DCT foi calculada bloco a bloco para cada uma das 12 imagens de teste e, em seguida, foi computada a média de cada um dos coeficientes de acordo com suas posições nos blocos. Esse processo resultou em um único bloco $13 \times 13 \times 15 \times 15$ contendo a média de cada coeficiente em sua respectiva posição. Em seguida, o bloco foi vetorizado, resultando em uma sequência de 38.025 valores, com os índices ordenados de acordo com o valor absoluto dos coeficientes. A Figura 2 apresenta gráficos dos coeficientes de um dos blocos (vetorizado) do *light field* Bikes sem ordenação¹ e utilizando a ordenação proposta. Note que a energia do espectro na Figura 2b se concentra no que seriam as baixas frequências mais do que no espectro na Figura 2a.

B. Imperceptibilidade

Na Figura 3, são apresentados os resultados de $\text{SSIM}_{\text{médio}}$ de acordo com a faixa de frequência utilizada para inserção da marca d'água. Para cada tamanho de marca d'água foi utilizado um intervalo diferente do espectro de frequências de acordo com a quantidade de coeficientes necessários para inserção. Para a marca de 2048×2048 foram inseridos 3654 bits por bloco, enquanto que, para a marca de 1024×1024 , foi necessário alterar 914 coeficientes por bloco e, para a marca de tamanho 512×512 , foi necessário inserir 229 bits por bloco.

¹Por *sem ordenação*, quer-se dizer que os coeficientes são ordenados segundo uma sequência lexicográfica das quatro coordenadas que os identificam.

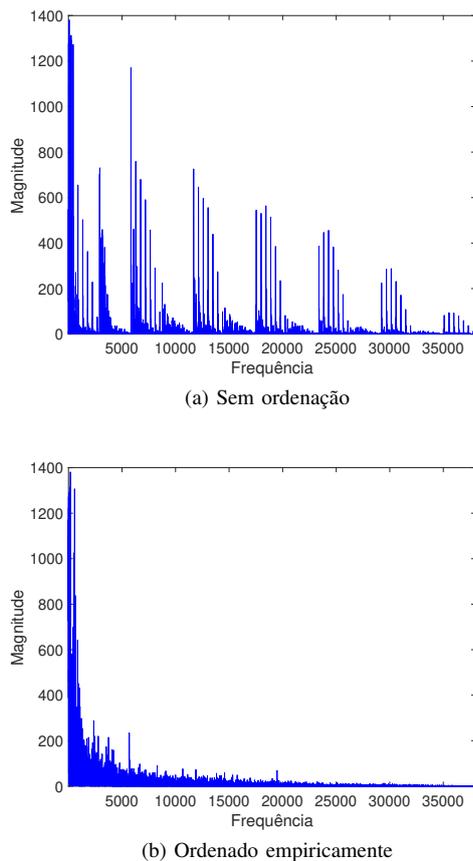


Fig. 2: Espectro de frequência de um bloco do *light field Bikes*. Para melhor visualização foram suprimidos os coeficientes com magnitude maior que 1500.

Um ponto importante é que, em todos os testes, o coeficiente DC não foi utilizado para inserção da marca. Por exemplo, para marca de tamanho 2048×2048 , a primeira faixa de coeficientes utilizada foi de 2 até 3655 (ao longo da versão vetorizada do bloco com dimensões $13 \times 13 \times 15 \times 15$ no domínio da 4D-DCT, obtida empregando a estratégia proposta na Seção IV.A). Conforme esperado, note que, à medida em que são utilizadas frequências mais altas, maiores são os resultados de $SSIM_{\text{médio}}$, uma vez que estas regiões possuem uma menor concentração de energia e modificá-las degrada o *light field* com menor intensidade. Os menores valores são obtidos quando a faixa de coeficientes utilizada para inserção da marca está em regiões de baixa frequência. Os resultados apresentados são para a imagem *Bikes*, porém o mesmo comportamento é encontrado nos demais *light fields*.

C. Robustez à Compressão

Brevemente, o processo de compressão utilizado consiste em calcular a 4D-DCT bloco a bloco do *light field* marcado e, para cada bloco, os $P\%$ coeficientes de maior valor absoluto são retidos, ao passo em que os demais $(1 - P)\%$ são zerados. Na Figura 4, são apresentados os resultados de NC da marca d'água original com relação às marcas extraídas após o *light field* ser submetido à compressão com 90%, 70%, 50%, 30% e 10% de coeficientes retidos. Observando a escala de cores,

nota-se, como esperado, a redução no valor de NC à medida em que menos coeficientes são retidos. Na Figura 5, são apresentadas as marcas d'água extraídas com menor valor de NC para cada percentual de coeficientes retidos (essas marcas foram inseridas na faixa de frequência mais alta). Conforme esperado, o processo de compressão dificulta a recuperação dos bits da marca, uma vez que os coeficientes zerados (de menor valor absoluto) tendem a se concentrar nas altas frequências. As imagens apresentam artefatos de ruído que aumentam em quantidade à medida em que menos coeficientes são retidos na compressão do *light field* marcado. Por outro lado, nota-se que, mesmo nos casos mais críticos, em que apenas 10% dos coeficientes foram retidos, ainda é possível identificar, visualmente, a marca d'água sem dificuldades.

V. CONCLUSÕES

Imagens de *light field* apresentam um importante avanço na tecnologia de captura e exibição de imagens e vídeos pois permitem a visualização de uma mesma cena sob diferentes vistas. A 4D-DCT parece ser uma candidata promissora para compressão deste tipo de imagem, por ser capaz de compactar, no domínio da transformada, a energia dessas imagens *lenslet*. Tal cenário tem motivado a realização da pesquisa documentada neste artigo. A técnica de marca d'água para *light fields* descrita demonstrou satisfazer requisitos importantes de imperceptibilidade e de robustez à compressão, sugerindo que o método em si e, mais especificamente, a estratégia de ordenação de coeficientes desenvolvida podem ser aplicados de forma bem sucedida a uma classe ampla de imagens. Atualmente, tem-se buscado caracterizar o esquema com relação à robustez contra outros tipos de ataques e avaliado o seu desempenho empregando um banco mais amplo de *light fields*.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Ihrke, J. Restrepo, and L. Mignard-Debise, "Principles of light field imaging: Briefly revisiting 25 years of research," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33, no. 5, pp. 59–69, 2016.
- [2] G. Wu, B. Masia, A. Jarabo, Y. Zhang, L. Wang, Q. Dai, T. Chai, and Y. Liu, "Light field image processing: An overview," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 7, pp. 926–954, 2017.
- [3] Y. Xu, H. Nagahara, A. Shimada, and R.-I. Taniguchi, "Transcut: Transparent object segmentation from a light-field image," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2015, pp. 3442–3450.
- [4] J. Fiss, B. Curless, and R. Szeliski, "Light field layer matting," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, pp. 623–631.
- [5] T. Yang, Y. Zhang, X. Tong, X. Zhang, and R. Yu, "A new hybrid synthetic aperture imaging model for tracking and seeing people through occlusion," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 23, no. 9, pp. 1461–1475, 2013.
- [6] N. Li, J. Ye, Y. Ji, H. Ling, and J. Yu, "Saliency detection on light field," in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2014, pp. 2806–2813.
- [7] T.-C. Wang, J.-Y. Zhu, E. Hiroaki, M. Chandraker, A. A. Efros, and R. Ramamoorthi, "A 4D light-field dataset and CNN architectures for material recognition," in *European Conference on Computer Vision*. Springer, 2016, pp. 121–138.
- [8] I. Viola, M. Rerabek, and E. Touradj, "Comparison and evaluation of light field image coding approaches," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 11, no. 7, pp. 1092–1106, 2017.
- [9] A. Ansaria, S. Honga, G. Saavedraa, B. Javidib, and M. Martinez-Corralla, "Ownership protection of plenoptic images by robust and reversible watermarking," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 107, pp. 325–334, 2018.

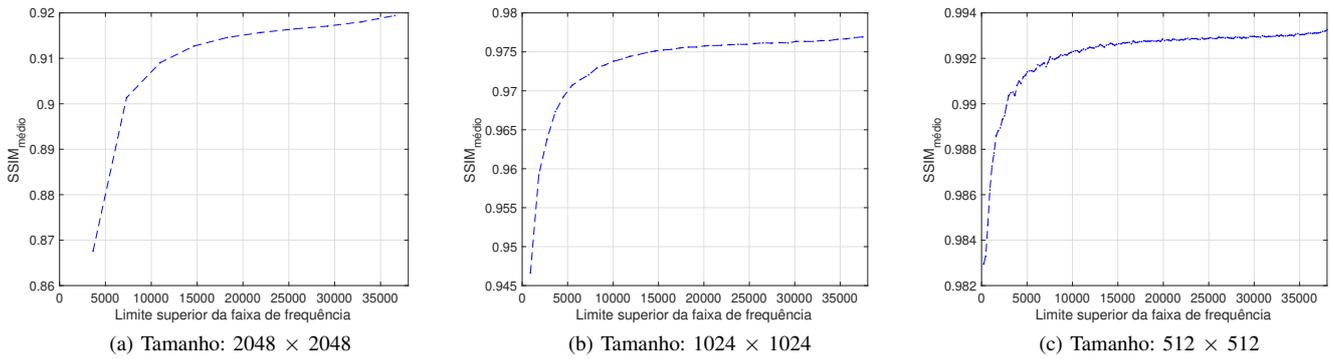


Fig. 3: $SSIM_{médio}$ para o *light field Bikes* com diferentes tamanhos de marca d'água e diferentes faixas de frequência usadas para inserção da marca.

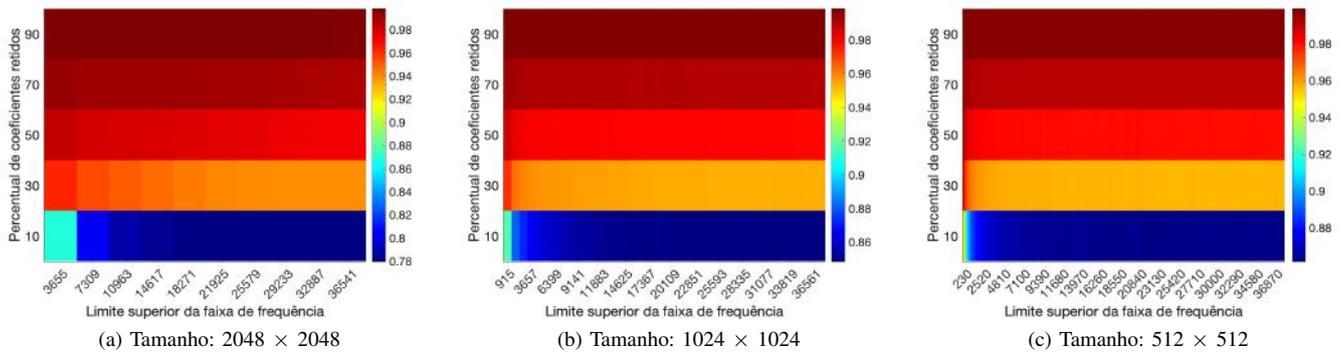


Fig. 4: Mapa de cores com informação de NC (*normalized correlation*) para marcas extraídas do *light field Bikes* após compressão com diferentes percentuais de coeficientes retidos. Os valores de NC são indicados na barra lateral de acordo com a intensidade da cor.



Fig. 5: Marcas d'água extraídas por percentual de coeficientes retidos. Todas estas marcas (2048×2048) foram inseridas na última faixa de coeficientes (frequências altas).

[10] P. Paudyal, F. Battisti, A. Neri, and M. Carli, "A study of the impact of light fields watermarking on the perceived quality of the refocused data," in *2015 3DTV-Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON)*. IEEE, 2015, pp. 1–4.

[11] G. Alves, M. P. Pereira, M. B. de Carvalho, F. Pereira, C. L. Pagliari, V. Testoni, and E. A. B. da Silva, "A study on the 4D sparsity of JPEG Pleno light fields using the discrete cosine transform," in *25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. IEEE, 2018, pp. 1–5.

[12] M. B. de Carvalho, M. P. Pereira, G. Alves, E. A. B. da Silva, C. L. Pagliari, F. Pereira, V. Testoni, and E. A. B. da Silva, "A 4D DCT-based lenslet light field codec," in *25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. IEEE, 2018, pp. 435–439.

[13] B. Chen and G. Wornell, "Quantization index modulation: A class of provably good methods for digital watermarking and information embedding," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 4, pp. 1423–1443, 2001.

[14] ISO/IEC JTC 1/SC29/WG1N74014, "JPEG Pleno call for proposals on light field coding," Geneva, Switzerland, January 2017.

[15] F. Svanstrom, "Properties of a generalized Arnold's discrete cat map," Master's thesis, Department of Mathematics of Linnaeus University, Sweden, June 2014.

[16] M. Rerabek and T. Ebrahimi, "New light field image dataset," in *8th International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX)*, 2016, pp. 1–2.

[17] Signal and Image Processing Institute (SIPI), "The USC-SIPI image database," <http://sipi.usc.edu/database/database.php>, acessado em: 09/04/2019.