

# Esquema de comunicação Screen-to-Camera (S2C) tensorial em blocos de vídeos segmentados espacialmente

Leandro R. Ximenes e Piettra Gonçalves

**Resumo**— A tecnologia emergente *Screen-to-Camera* (S2C) permite a comunicação entre telas e câmeras digitais, com potencial de rápida implementação na sociedade. Infelizmente, a qualidade da detecção dos dados pode ser afetada por uma baixa resolução da câmera e por elevadas distâncias entre dispositivos. Este artigo propõe um novo *framework* para um sistema S2C tensorial recém proposto, em que a tela agora é segmentada espacialmente, permitindo ao transmissor decidir entre explorar ganhos de diversidade e/ou de multiplexação, assim como ao receptor a escolha de equalizadores de diferentes complexidades. Simulações validam a proposta tanto do ponto de vista de estimação de símbolos quanto de equilíbrio de complexidade computacional.

**Palavras-Chave**— Tela para Câmera, Comunicações Por Câmeras Ópticas, tensores.

**Abstract**— The emerging technology *Screen-to-Camera* (S2C) allows communication between screens and digital cameras, with the potential for rapid implementation in society. Unfortunately, the quality of data detection can be affected by low camera resolution and the large distance between devices. This article proposes a new framework for a recently proposed tensor S2C system, in which the screen is spatially segmented, allowing the transmitter to decide between diversity and/or multiplexing gains, as well as the receiver to choose equalizers of different complexities. Simulations validate the proposal from the point of view of symbol estimation and computational complexity balance.

**Keywords**— Screen-to-Camera, Optical Camera Communications, tensors.

## I. INTRODUÇÃO

A Comunicação de Tela para Câmera (*Screen-to-camera* ou S2C) é uma tecnologia de Comunicações por Câmeras Ópticas (*Optical Camera Communications* ou OCC) e possui um enorme potencial comercial, porém ainda não explorado graças a sua recente introdução pela academia [1]. A ampla disponibilidade desses telas e câmeras digitais, em diversos ambientes, como indústrias, serviços, lares e até mesmo hospitais, favorece a rápida adoção da tecnologia S2C na sociedade, pois esta não requer *hardware* adicional além destes dispositivos para implementar seus protocolos de comunicação. Devido à grande presença desses equipamentos eletrônicos no cotidiano, a tecnologia S2C/OCC pode ser utilizada em aplicações variadas, como comunicações veiculares [2] e posicionamento/navegação [3], entre outras.

Leandro R. Ximenes, Faculdade de Tecnologia (FT), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Limeira-SP, e-mail: ronchini@unicamp.br; Piettra G. S. Cardoso, Faculdade de Tecnologia (FT), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Limeira-SP, e-mail: p186848@dac.unicamp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado por FAEPEX (2424/23).

E a lista de benefícios da tecnologia S2C é extensa. O enlace de comunicação S2C, assim como qualquer outra tecnologia de Comunicação Óptica Sem Fio (*Optical Wireless Communication* - OWC), não é afetado por outros sinais de radiofrequência ou micro-ondas, tornando-o adequado para uso em ambientes críticos para estas bandas de frequência, como aeronaves, hospitais e até mesmo debaixo d'água. Por ser uma tecnologia de luz visível, a tecnologia S2C não está limitada por uma banda licenciada, e sua taxa de dados reflete as características físicas de seus dispositivos (por exemplo, taxas de quadros de sensores de imagem e telas). Finalmente, como uma tecnologia de comunicação visual, poderosas técnicas de processamento de imagens podem ser aproveitadas para melhorar não apenas os aspectos visuais da imagem capturada, mas também a confiabilidade da transmissão de dados.

Contudo, para todos os efeitos, todos os padrões S2C apresentam efeitos de degradação de desempenho semelhantes. A interferência luminosa visível (de lâmpadas ambientes internas ou de luz solar externa) pode ser uma causa de degradação de desempenho de enlaces S2C. Além disso, o desfoque (*defocus* ou *out-of-focus blurring*), gerado pela limitação da resolução do sensor de imagem, é um fenômeno inevitável, especialmente em enlaces de longas distâncias [4].

Recentemente, foram introduzidos dois esquemas ([5], [6]) de comunicação S2C baseados na modelagem tensorial PARAFAC [7], capazes de proporcionar ao receptor a estimação dos dados de comunicação e restauração da qualidade nativa do vídeo transmitido, mitigando em boa parte os efeitos de degradação mencionados. A abordagem deste dois trabalhos é única na literatura OCC/S2C, pois permite que a detecção de símbolos transmitidos ocorra concomitantemente a uma etapa de restauração do vídeo capturado e da estimação da própria degradação visual, resultando em uma maior eficiência espectral e melhores taxas de erro de bit. Sem essas funcionalidades integradas, os sistemas S2C/OCC podem estar sujeitos a uma degradação significativa e exigir etapas adicionais de calibração do receptor previamente à transmissão.

Infelizmente, o receptor proposto em [5], denominado OCC-ALS, utiliza como base o algoritmo *Alternating Least Squares* (ALS), que possui problemas de convergência lenta, dependência de uma boa inicialização e convergência a mínimos locais. Além disso, o OCC-ALS é computacionalmente pesado, pois os tamanhos dos seus fatores matriciais na decomposição PARAFAC são proporcionais ao quadrado (ou cubo) do número de *pixels* na tela ou no sensor de imagem [5].

Por outro lado, em [6] foi proposto um novo algoritmo,

denominado OCC-KRF, capaz de recuperar dados e restaurar vídeos degradados com ruído aditivo. No entanto, o OCC-KRF não aborda a restauração de imagens com borramento ou decimadas como o OCC-ALS faz, além de exigir conhecimento prévio do processo de degradação (método supervisionado). Embora os algoritmos OCC-ALS e OCC-KRF no receptor sejam intercambiáveis, porque utilizam a mesma codificação tensorial no lado da tela digital (transmissor), ambos enfrentam dificuldades computacionais para vídeos de maior resolução.

Este trabalho apresenta uma estratégia diferente para codificar um vídeo de alta resolução em comparação com [5] ou [6], segmentando o vídeo nativo de maior resolução em blocos de menor dimensão espacial. Nesta forma de "mosaicação", cada bloco de vídeo não sobreposto é codificado de forma espaço-temporal com sequências de símbolos distintas *a priori*. Essa abordagem proporciona as seguintes vantagens:

- 1) Cada segmento/bloco de vídeo pode ser processado de forma independente, promovendo a computação paralela, caso disponível, no lado do receptor. Além disso, a segmentação reduz as dimensões espaciais de cada bloco a ser processado, diminuindo a complexidade geral, de função quadrática ao número de *pixels* do bloco.
- 2) Ao dividir cada quadro de vídeo em segmentos espaciais, o novo esquema permite uma nova camada de multiplexação espacial de dados codificados no vídeo. Em outras palavras, múltiplos segmentos podem ser combinados para fornecer ganhos de diversidade e/ou de multiplexação.
- 3) Cada bloco de vídeo pode ser processado por qualquer um dos receptores (OCC-ALS ou OCC-KRF). Essa flexibilidade permite a combinação de etapas de estimação de degradação usando o OCC-ALS com etapas posteriores de detecção de dados usando o algoritmo OCC-KRF, este mais leve, na mesma sequência de vídeo. Com base nesta possibilidade, este artigo propõe um protocolo híbrido OCC-ALS/OCC-KRF.

Para o protocolo híbrido OCC-ALS/OCC-KRF, onde a degradação é desconhecida inicialmente, a abordagem é utilizar o OCC-ALS primeiramente para uma estimativa inicial da matriz de símbolos transmitidos e da matriz de degradação que modela os efeitos de borramento (e outros efeitos lineares). Aplica-se o OCC-ALS apenas nos blocos dos cantos do vídeo, para a redução da complexidade geral do sistema.

Em seguida, dentro do mesmo intervalo de recepção, com a mesma sequência de vídeo, o OCC-KRF é alimentado com a estimativa da matriz de degradação e é feita a detecção dos símbolos com este algoritmo nos blocos restantes.

Essa abordagem híbrida combina a capacidade do OCC-ALS de lidar com uma degradação mais complexa (e.g. borramento de foco) com a menor complexidade do OCC-KRF para estimação de símbolos, levando a um melhor equilíbrio entre eficiência espectral e eficiência computacional.

## II. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO S2C TENSORIAL

No sistema proposto OCC/S2C em [5] ou [6], cada pixel de um vídeo digital de resolução  $J$  pixels por  $L$  pixels é modulado por uma sequência de  $K$  símbolos. Em outras palavras, símbolos reais em banda base são armazenados na matriz  $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{K \times JL}$  para codificar um total de  $JL$  pixels.

O vídeo nativo a ser codificado é dividido em blocos temporais, composto de blocos de  $F$  quadros (*frames*), sendo  $\mathbf{x}_f \in \mathbb{R}^{JL \times 1}$  uma forma vetorizada dos *pixels* do  $f$ -ésimo quadro. A matriz de vídeo  $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1 \ \mathbf{x}_2 \ \dots \ \mathbf{x}_F] \in \mathbb{R}^{F \times JL}$  é então um rearranjo do vídeo digital no qual se deseja codificar a mensagem contida em  $\mathbf{S}$ .

A codificação S2C tensorial dos dados é baseada na codificação *Khatri-Rao Space-Time* (KRST) proposta em [8], dada então por:

$$\bar{\mathbf{X}} = (\mathbf{S} \diamond \mathbf{X}) \in \mathbb{R}^{KF \times JL}. \quad (1)$$

O operador  $\diamond$  denota o produto de Khatri-Rao.

Considerando a transmissão por um canal de comunicação não-ideal, define-se a matriz de degradação  $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{MN \times JL}$ , de tal forma que o vídeo codificado  $\bar{\mathbf{X}}$  é capturado de acordo com o modelo de degradação:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} \bar{\mathbf{X}}^T, \quad (2)$$

em que  $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{MN \times KF}$  é o vídeo capturado.  $M \times N$  é a resolução do sensor de imagem do lado do receptor.

Combinando (1) e (2), o vídeo sem ruído  $\mathbf{Y}$  gerado pelo processo de captura da câmera é dado por:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H} (\mathbf{S} \diamond \mathbf{X})^T \in \mathbb{R}^{MN \times KF}, \quad (3)$$

onde as linhas de  $\mathbf{Y}$  representam o domínio espacial (ou seja, *pixels*) e as colunas o domínio temporal (quadros de vídeo).

Definindo um modelo PARAFAC de terceira ordem  $\mathcal{Y} \in \mathbb{R}^{MN \times F \times K}$  como

$$\mathcal{Y} = \llbracket \mathbf{H}, \mathbf{X}, \mathbf{S}, JL \rrbracket, \quad (4)$$

então a equação (3) pode ser vista como uma forma matricial desdobrada do tensor  $\mathcal{Y}$  [6]. Em resumo, podem ser obtidas diferentes formas desdobradas (i.e., matriciais) deste tensor, das quais se destacam os desdobramentos dos modos 1, 2 e 3, dados respectivamente por

$$\mathbf{Y}^{(1)} = (\mathbf{S} \diamond \mathbf{X}) \mathbf{H}^T \in \mathbb{C}^{FK \times MN}, \quad (5)$$

$$\mathbf{Y}^{(2)} = (\mathbf{X} \diamond \mathbf{H}) \mathbf{S}^T \in \mathbb{C}^{MNF \times K}, \quad (6)$$

$$\mathbf{Y}^{(3)} = (\mathbf{H} \diamond \mathbf{S}) \mathbf{X}^T \in \mathbb{C}^{KMN \times F}. \quad (7)$$

Em [6], apenas o modo 1, dado por (5), é explorada pelo receptor OCC-KRF. Já em [5], todos os três modos em (5)-(7) são explorados pelo OCC-ALS.

Assumindo a presença de ruído aditivo no processo de captura de vídeo, o modelo geral do sistema é dado por

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathcal{Y} + \mathcal{N} \quad (8)$$

em que  $\mathcal{N} \in \mathbb{R}^{MN \times K \times F}$  é o tensor de ruído aditivo, que pode ser térmico, de *shot noise* (ruído de disparo), de amostragem e quantização, entre outros [9].

### A. Complexidade dos receptores OCC-ALS e OCC-KRF

Inicialmente, a proposta de um esquema híbrido OCC-ALS/OCC-KRF é relacionada à complexidade computacional de cada algoritmo individualmente.

A complexidade do algoritmo iterativo OCC-ALS está principalmente relacionada ao seu número de operações de

pseudoinversa (três, por iteração, para ser mais exato). Sendo assim, a complexidade aproximada de uma única iteração do OCC-ALS é dada por [6]:

$$O_{ALS} = JL(F^2K^2 + F^2M^2N^2 + M^2N^2K^2). \quad (9)$$

Por outro lado, a complexidade do algoritmo não-iterativo OCC-KRF é baseada principalmente nas operações de decomposição por valores singulares (SVD), uma vez que ele realiza uma SVD para cada coluna dos produtos de Khatri-Rao em (5)-(7). Deste modo, sua complexidade é dada por [5]:

$$O_{KRF} = JL(M^2N^2 + \max(F, K)^2 \cdot \min(F, K)). \quad (10)$$

Fig. 1 mostra a razão entre  $O_{ALS}/O_{KRF}$  entre as complexidades dos dois algoritmos, considerando apenas uma iteração do OCC-ALS. A partir desta figura e de (9) e (10) fica claro que o algoritmo OCC-ALS fica progressivamente mais pesado que o OCC-KRF quando o número de *pixels* do lado do receptor aumenta. Além disso, e curiosamente, aumentar o número de símbolos por bloco através de  $K$  tem efeitos distintos nos dois algoritmos, visto que (9) depende de  $F^2K^2 + M^2N^2K^2$  e (10) de  $\max(F, K)^2 \cdot \min(F, K)$ .

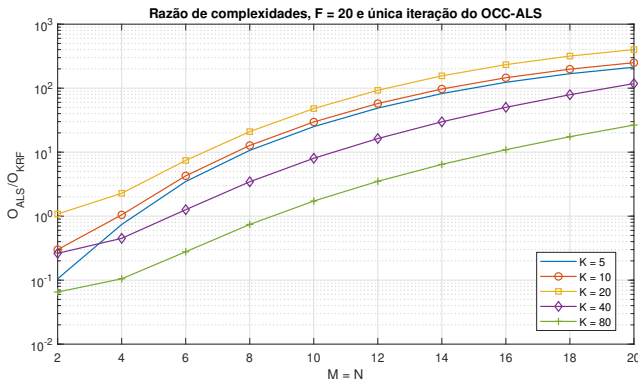


Fig. 1. Razão entre as complexidades dos algoritmos OCC-ALS e OCC-KRF

De qualquer forma, é evidente que o algoritmo OCC-ALS é extremamente mais complexo do que o OCC-KRF com o aumento de  $M = N$ , sobretudo porque o primeiro pode exigir um grande número de iterações para convergência. Sendo, assim, o uso do OCC-ALS é justificado em casos em que a degradação não pode ser negligenciada, uma vez que somente ele estima a matriz de degradação  $\mathbf{H}$ .

Embora devido à alta complexidade do OCC-ALS alguns possam advogar pela opção ao algoritmo OCC-KRF, mesmo que seja necessária uma etapa adicional de estimação da matriz de degradação, o esquema proposto abaixo visa propor um *framework* versátil, baseado na combinação dos dois algoritmos.

### III. S2C SEGMENTADO: ESQUEMA HÍBRIDO OCC-ALS/OCC-KRF

Diferentemente de outros esquemas S2C, inclusive aqueles padronizados em [10] ou propostos em [5], [6], que se concentram na codificação de uma tela envolvendo todos seus *pixels* conjuntamente, esta proposta segmenta espacialmente a tela em múltiplos blocos para processamento individual (Fig. 2). O elemento  $\mathbf{A}^{[v,h]} \in \mathbb{R}^{J_1 \times L_1}$  corresponde ao bloco de

vídeo (codificado) indexado por  $v \in \{1, 2, \dots, V\}$  e  $h \in \{1, 2, \dots, H\}$ , tal que  $H = J/J_1$  e  $V = L/L_1$  são inteiros.

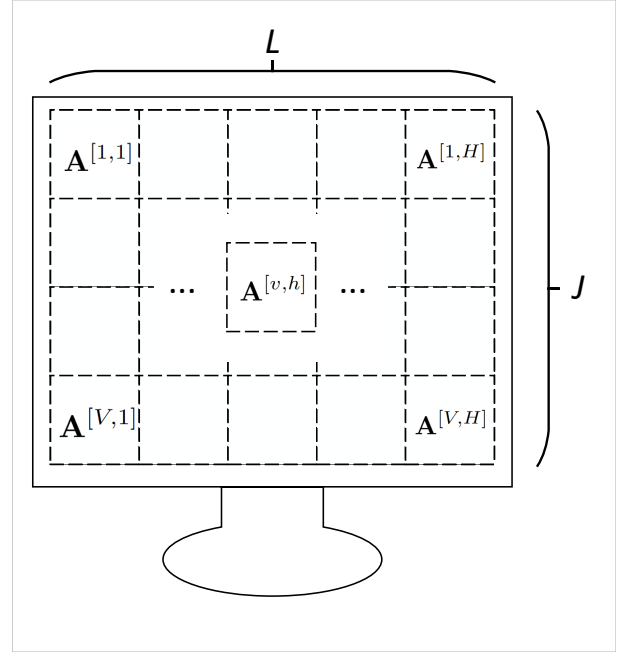


Fig. 2. Esquema S2C com blocos espaciais segmentados

O que torna essa abordagem única é que, como todos os blocos estão relacionados à mesma tela, espera-se que o mesmo efeito de degradação seja experienciado por todos os blocos na recepção, permitindo uma abordagem unificada e combinada para os processos de estimação/mitigação da degradação. Além disso, como a fonte de sinal conectada à tela é a mesma a todos os blocos, estratégias de compromisso entre diversidade e multiplexação de sinais podem ser exploradas.

Como já discutido, o algoritmo OCC-ALS é adequado apenas para estimar a matriz de degradação em conjunto com as matrizes de símbolos e vídeo [5]. Como resultado, o algoritmo OCC-KRF é viável se a matriz  $\mathbf{H}$  é conhecida ou se sua degradação é pequena, enquanto o OCC-ALS é recomendado se a degradação for desconhecida e relevante. No entanto, se a degradação for estimada para alguns blocos, ela pode ser em seguida mitigada em outros.

Seja então o conjunto de índices dos blocos nos cantos da tela definido por  $\mathcal{Q} = \{[1, 1]; [V, 1]; [1, H]; [V, H]\}$ , tal que o  $q$ -ésimo bloco de vídeo,  $q \in \mathcal{Q}$ , seja definido por  $\mathbf{Y}^{[q]}$ . Sendo assim, o modelo (4), considerando  $J = M$  e  $L = N$ , se reescreve como

$$\mathcal{Y}^{[q]} = \llbracket \mathbf{H}^{[q]}, \mathbf{X}^{[q]}, \mathbf{S}^{[q]}, J_1 L_1 \rrbracket. \quad (11)$$

Dado que a matriz degradação  $\mathbf{H}$  é comum para todos os blocos de vídeo, uma vez que o processo de captura a princípio é comum a eles, aplica-se o OCC-ALS 4 vezes para encontrar  $\hat{\mathbf{H}}^{[q]} \forall q \in \mathcal{Q}$ , a matriz de degradação efetivamente estimada pode ser obtida da média das matrizes estimadas destes quatro blocos do canto, i.e.,

$$\hat{\mathbf{H}} \leftarrow \frac{1}{4} \sum_{q \in \mathcal{Q}} \hat{\mathbf{H}}^{[q]}. \quad (12)$$

A matriz  $\hat{\mathbf{H}}$  é então utilizada no algoritmo OCC-KRF para estimação de símbolos e vídeos nos blocos restantes.

#### IV. RESULTADOS DE VALIDAÇÃO COMPUTACIONAL

Nesta seção, o novo sistema proposto, incluindo a multiplexação segmentada no transmissor e o esquema de recepção híbrido OCC-ALS/OCC-KRF, é validado via experimentos computacionais de Monte Carlo. Nesta seção são avaliados desempenhos de taxa de erro de símbolo (*Symbol Error Rate* - SER), de Erro Quadrático Médio (EQM) normalizado do processo de estimação da degradação e a complexidade computacional do esquema híbrido em relação aos algoritmos OCC-ALS e OCC-KRF para os valores simulados.

A partir de (8), a relação Sinal-Ruído (SNR) é ajustada como  $\text{SNR} = \|\mathcal{Y}\|_F^2 / \|\mathcal{N}\|_F^2$ , em que  $\|\cdot\|_F$  denota a norma de Frobenius de um tensor. Para cada realização do Monte Carlo, a energia média do símbolo é mantida constante e apenas a potência do ruído gaussiano branco aditivo é ajustada para obter a SNR adequada. Para cada ponto de SNR simulado é realizado ao menos 100 realizações independentes.

Os elementos do vídeo sintético em escala de cinza  $\mathbf{X}$  são sorteados de forma independente de uma distribuição uniforme contínua  $U(0, A)$ , onde  $A = 1$  representa a intensidade máxima do pixel. Pressupõe-se que os quadros do transmissor e receptor estão perfeitamente sincronizados e de mesma resolução, e a tela e a câmera estão perfeitamente alinhadas, com a detecção perfeita da Região de Interesse (RoI) e sem quaisquer distorções de perspectiva e de efeito vinheta.

Além disso, todas as simulações utilizam a mesma modulação e codificação. Assim, os símbolos são selecionados aleatoriamente da modulação *On-Off Keying* (OOK), de acordo com probabilidades iguais para bits 0 e 1. Para o receptor OCC-ALS, as estimativas dos fatores da decomposição PARAFAC são inicializados com elementos que seguem uma distribuição gaussiana de média zero e variância unitária, e este algoritmo é configurado para encerrar quando  $\epsilon_i \leq 10^{-5}$ .

Para todas as simulações, são considerados os cenários sem degradação ( $\mathbf{H}$  como uma matriz identidade) e com borrimento de desfoque fixo, gerado a partir de uma máscara (*kernel*) de média móvel de tamanho  $2 \times 2$ .

##### A. Efeito na qualidade da estimação da matriz de degradação

A primeira avaliação tem como objetivo identificar o desempenho da estimação da matriz de degradação nos blocos dos cantos do vídeo usando o OCC-ALS, bem como avaliar os possíveis benefícios decorrentes do uso da média das estimativas usando (12). É somente por meio de uma estimativa confiável da matriz de degradação  $\mathbf{H}$  que se torna viável a aplicação eficaz do algoritmo OCC-KRF nos demais blocos do vídeo dentro do esquema híbrido.

A Fig. 3 traz o desempenho do algoritmo OCC-ALS executado nos blocos dos cantos do vídeo, em termos de erro quadrático médio (EQM) normalizado da estimativa de degradação segundo (13). As curvas lidam com caso com diversidade ( $\hat{\mathbf{H}}$  obtido de (12)) e sem diversidade ( $\hat{\mathbf{H}}$  obtido diretamente do OCC-ALS, sem média entre os blocos). Para o caso sem borrimento,  $\mathbf{H}$  é uma matriz identidade e para

o caso com borrimento de desfoque é uma matriz Toeplitz condizente com o borrimento escolhido [6].

$$\text{EQM} = E \left\{ \|\mathbf{H} - \hat{\mathbf{H}}\|_F^2 \right\} / E \left\{ \|\mathbf{H}\|_F^2 \right\}. \quad (13)$$

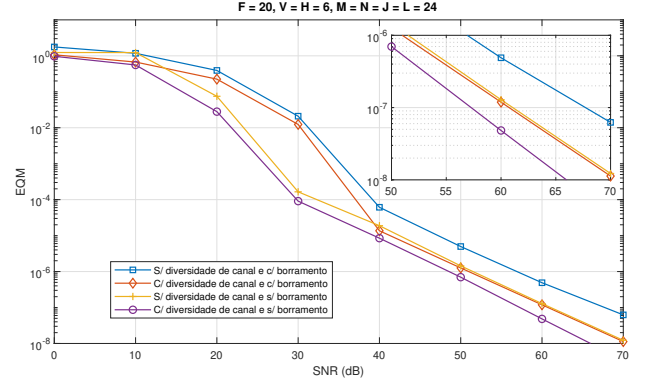


Fig. 3. EQM da estimação da matriz de degradação. Janela no canto superior direito traz um zoom para valores altos de SNR

A Fig. 3 mostra de fato o benefício de se ter utilizar a redundância/diversidade da estimação de  $\mathbf{H}$  nos blocos dos cantos. Tanto para o caso com e sem borrimento, combinar as quatro estimativas de degradação em (12) levou a uma redução do EQM. Para o caso sem borrimento, o ganho foi de aproximadamente 2,5 dB em alto SNR ( $\text{EQM} = 10^{-7}$ ), enquanto para o caso com borrimento o ganho foi por volta de 6 dB. E, embora o borrimento leve a um maior EQM, aproveitar da diversidade da estimação de degradação levou a um desempenho similar ao caso em que não há diversidade ou degradação. Por outro lado, para valores baixos de SNR (entre 20 dB e 40 dB), a presença de borrimento aparenta ser ainda crítica para o desempenho da estimação da degradação.

##### B. Efeito na taxa de erro de símbolo

Uma vez estimada a matriz  $\hat{\mathbf{H}}$  única para todos os blocos, é aplicado o algoritmo OCC-KRF sobre o processamento de recepção para todos os blocos de vídeo restantes. Portanto, a qualidade da estimação da matriz de degradação pela etapa anterior com o OCC-ALS é crucial para a boa recuperação dos símbolos na etapa posterior com o algoritmo OCC-KRF.

A Fig. 4 traz os três receptores (OCC-ALS, OCC-KRF e o híbrido OCC-ALS/OCC-KRF), considerando a exploração da diversidade de degradação (segundo a Fig. 3) e também a diversidade de símbolos – de certo forma, uma diversidade espacial por combinar os sinais de diferentes blocos espaciais. Para ganhos de diversidade de símbolos, assume-se que a matriz de símbolos estimada globalmente é dada pela média das matrizes estimadas em todos os blocos, ou seja

$$\hat{\mathbf{S}} \leftarrow \frac{1}{VH} \sum \hat{\mathbf{S}}^{[i]}, \quad (14)$$

em que  $\hat{\mathbf{S}}^{[i]}$  é a matriz de símbolos estimada no  $i$ -ésimo bloco. A Equação (14) assume que todas os blocos são codificados com a mesma matriz de símbolos, favorecendo ganhos de diversidade e não de multiplexação.

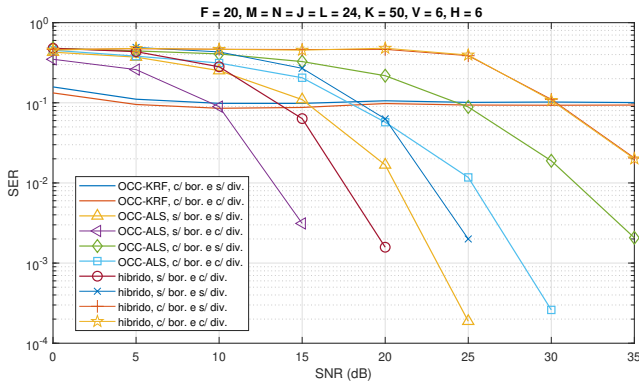


Fig. 4. Taxa de símbolos para diferentes receptores, presença ou não de borrimento, com ou sem diversidade de símbolos

A Fig. 4 demonstra que o algoritmo OCC-KRF (sem conhecimento do canal) apresenta o pior desempenho na presença de borrimento. Isto ocorre pois o equalizador OCC-KRF necessita do conhecimento da matriz de degradação, assumida desconhecida por ele na Fig. 4. Desta forma, nem mesmo a exploração da diversidade de símbolos evitou um péssimo desempenho de SER.

Por outro lado, o algoritmo OCC-ALS foi eficaz em reduzir a SER com o aumento do SNR, tendo seu melhor desempenho na ausência de borrimento e com uso da diversidade. Observa-se nas curvas do OCC-ALS, para  $SER = 10^{-2}$  que há um ganho aproximado de 7 dB quando a diversidade é explorada e uma perda de quase 12 dB quando há borrimento.

Na Fig. 4 pode ser visualizado que a abordagem híbrida não atinge valores de SER tão bons quanto do algoritmo OCC-ALS. Tanto na presença quanto na ausência de borrimento, o algoritmo OCC-ALS se saiu melhor, por estimar conjuntamente símbolos e degradação sobre todos os blocos, e não apenas dos blocos dos cantos. Por outro lado, o algoritmo híbrido funciona sob presença de borrimento, ainda que com desempenho pior que o OCC-ALS, algo que claramente o algoritmo OCC-KRF sem conhecimento de canal não é capaz.

Contudo, o benefício do esquema híbrido sobre o OCC-ALS é fornecer um bom compromisso entre estimação de símbolos e complexidade computacional. A Fig. 5 traz as complexidades de cada esquema, considerando  $VH$  blocos de  $4 \times 4$  pixels. Quando o algoritmo OCC-ALS é utilizado, é indicado também o seu número de iterações  $n$ . O valor  $n = 53$  é o valor mediano do número de iterações do OCC-ALS sob borrimento com  $V = H = 6$  (obtido das Figs. 3 e 4), para referência.

O interessante a ser notado na Fig. 5 é que é possível que uma única iteração o algoritmo OCC-ALS seja menos pesada que o algoritmo OCC-KRF, mas o primeiro algoritmo se torna cada vez mais complexo quando  $n$  cresce. Em [6], por exemplo, o número de iterações podia passar de 100, e não tão raro foram verificadas simulações com mais de 1000 iterações. Para efeito comparativo, para  $n = 53$  e  $V = H = 6$ , parâmetros encontrados nas simulações anteriores, a complexidade do algoritmo OCC-ALS é quase 6 vezes maior que do sistema híbrido. Embora este valor não pareça elevado, nota-se das Figs. 1 e 5 que para um número pequeno de blocos ( $V, H$ ), a complexidade do algoritmo OCC-ALS domina a

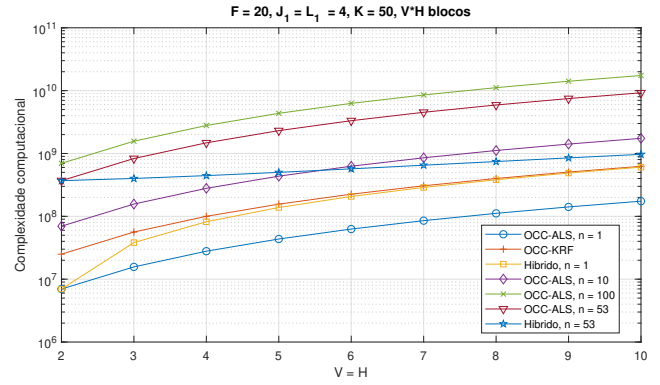


Fig. 5. Complexidade teórica dos algoritmos simulados, para diferente número de blocos espaciais

complexidade geral do esquema híbrido proposto. Contudo, a partir que mais blocos são incluídos, é cada vez mais viável escolher o segundo em relação ao primeiro.

## V. CONCLUSÃO

Este artigo propôs uma nova abordagem de transmissão tensorial do tipo *screen-to-camera*, capaz de segmentar uma tela de transmissão em diferentes blocos espaciais de pixels. Com esta abordagem foi possível aferir ganhos de diversidade e obter melhores compromissos de desempenho entre estimação de símbolos, de estimação de degradação visual e complexidade computacional. A partir deste novo *framework* de transmissão foi proposto um esquema híbrido de recepção OCC-ALS/OCC-KRF, e simulações computacionais demonstraram que o esquema proposto é viável, do ponto de vista de complexidade computacional majoritariamente, quando a resolução espacial da tela é elevada e há borrimento óptico significativo no enlace.

## REFERÊNCIAS

- [1] N. Saeed, S. Guo, K. Park, T. Y. Alaffouri, and M. Alouini, "Optical camera communications: Survey, use cases, challenges, and future trends," *Physical Commun.*, vol. 37, p. 100900, 2019.
- [2] M. D. Thieu, T. L. Pham, T. Nguyen, and Y. M. Jang, "Optical-RoI-signaling for vehicular communications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 69 873–69 891, 2019.
- [3] H. Yang, W. Zhong, C. Chen, and A. Alphones, "Integration of visible light communication and positioning within 5G networks for internet of things," *IEEE Netw.*, vol. 34, no. 5, pp. 134–140, 2020.
- [4] J. Lee, S. Kim, and S. Han, "Defocus based optical signal reception for distance enhanced optical camera communication," in *2019 21st Int. Conf. on Transparent Opt. Netw. (ICTON)*, 2019, pp. 1–4.
- [5] L. R. Ximenes, B. A. Laredo, and R. Arthur, "Integrated data detection and video restoration for optical camera communications," *Digit. Signal Process.*, vol. 141, p. 104192, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200423002877>
- [6] L. R. Ximenes and M. F. Alves, "Tensor-based screen-to-camera communications," *IEEE Commun. Lett.*, pp. 1–1, 2023.
- [7] R. Harshman, "Foundations of the PARAFAC procedure: Models and conditions for an "explanatory" multi-modal factor analysis," *UCLA Work. Papers in Phonetics*, vol. 16, 1970.
- [8] N. D. Sidiropoulos and R. S. Budampati, "Khatri-Rao space-time codes," *IEEE Trans. on Signal Process.*, vol. 50, no. 10, pp. 2396–2407, 2002.
- [9] Z. Wang, Q. Wang, W. Huang, and Z. Xu, *Optical Camera Communication: Modulation and System Design*, pp. 291–351.
- [10] "IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.7: Short-range optical wireless communications," *IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011)*, pp. 1–407, 2019.