



Novos protocolos de comunicação Screen-to-Camera (S2C) com dispositivos de exibição e captura de vídeos modernos

Palavras-Chave: Comunicações ópticas, Comunicações por Luz Visível, Processamento de imagens

Autores:

MIGUEL SORG PINHEIRO, FT - UNICAMP

Prof. Dr. LEANDRO RONCHINI XIMENES, FT - UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A crescente demanda por maiores taxas de transmissão tem evidenciado as limitações do espectro de radiofrequência, impulsionando a busca por alternativas no espectro óptico [1]. Nesse contexto, as tecnologias de Comunicação Óptica sem Fio (*Optical Wireless Communication*, OWC), em especial a Comunicação por Câmera Óptica (*Optical Camera Communication*, OCC), surgem como uma solução promissora, aproveitando a vasta presença de câmeras em dispositivos modernos, como smartphones e tablets, para funcionarem como receptores de baixo custo [2].

Uma importante modalidade da OCC é a comunicação *Screen-to-Camera* (S2C), que utiliza telas como transmissores, abre um leque de aplicações em áreas como sinalização interativa e troca segura de dados [3]. Para superar os desafios da S2C, como as baixas taxas de quadros das câmeras e os efeitos de desfocagem óptica, esta pesquisa adota o esquema tensorial proposto em [3], baseado na modelagem pela decomposição PARAFAC [4].

Contudo, um dos desafios fundamentais em sistemas S2C é a seleção precisa e eficiente da Região de Interesse (*Region of Interest*, ROI), a área da imagem capturada que contém a tela transmissora. Uma demarcação imprecisa da ROI pode levar a um aumento significativo na taxa de erro de bit (*Bit Error Rate*, BER), comprometendo a comunicação. Diante disso, esta pesquisa teve como objetivo principal não apenas validar o sistema tensorial de comunicação S2C inicialmente apresentado em [4] em um maior número de cenários práticos, mas também desenvolver e incorporar um método de baixo custo computacional para a detecção automática da ROI, eliminando a necessidade de intervenção manual e aumentando a robustez do sistema.

METODOLOGIA:

A metodologia deste trabalho parte do estudo teórico e por simulações computacionais do esquema tensorial S2C já proposto em [3], e avança na implementação e testes experimentais práticos de um algoritmo para detecção automática da ROI.

A abordagem teórica do projeto baseia-se em um esquema de comunicação S2C que utiliza a decomposição PARAFAC para modelar o sinal recebido como um vídeo digital em escala de cinza. O vídeo recebido é representado como um tensor de terceira ordem, cujos fatores correspondem à matriz de símbolos transmitidos, à matriz que modela a degradação do canal e à estrutura do vídeo original. Para reduzir a complexidade computacional dos algoritmos de decomposição, que são proporcionais ao quadrado das dimensões espaciais [3], a tela é segmentada em blocos espaciais menores, como ilustrado na Figura 1 e proposto em [5]. Essa técnica explora a diversidade espacial, permitindo o processamento independente de cada bloco e melhorando a robustez do sistema.

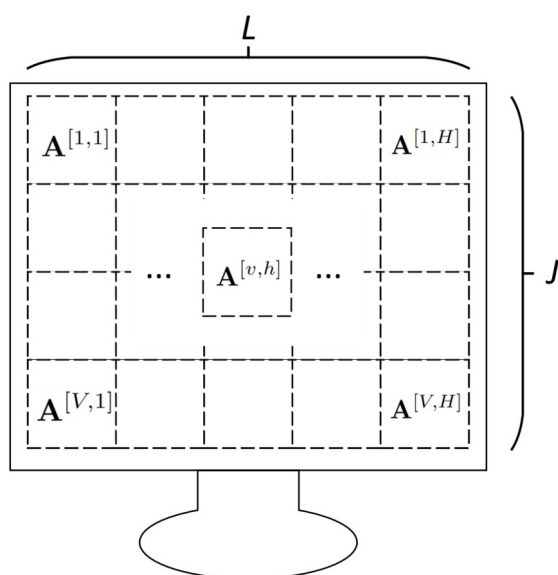


Figura 1: Esquema S2C com a tela segmentada em blocos espaciais independentes. Fonte: [5].

Para a recuperação dos dados, foram considerados dois receptores principais: o OCC-ALS (*Alternating Least Squares*) e o OCC-KRF (*Khatri-Rao Factorization*), descritos respectivamente em [3] e [6]. O OCC-ALS é um método iterativo que realiza a estimação conjunta dos símbolos e da degradação, mas possui maior complexidade computacional. Em contrapartida, o OCC-KRF é um método não iterativo mais leve, porém exige conhecimento prévio do processo de degradação. Os parâmetros chave do sistema, como a resolução da tela (J e L), a resolução dos blocos (M e N) e o número de quadros (F), foram ajustados para analisar e estudar os efeitos da diversidade espacial e temporal.

Durante os testes práticos, observou-se a necessidade de um método automático para localizar a ROI. Para isso, foi desenvolvido e implementado um algoritmo baseado na análise da variância temporal dos pixels, detalhado no artigo submetido ao SBrT [7]. A premissa é que a região da tela que transmite dados exibe maior variação de intensidade ao longo do tempo em comparação com o fundo estático. O processo consiste nas seguintes etapas:

1. **Estimativa da Variância Temporal:** Para uma sequência de quadros de vídeo, calcula-se a variância da intensidade de cada pixel ao longo do tempo, gerando um “mapa de variância”.
2. **Normalização e Limiarização de Otsu:** O mapa de variância é normalizado e, em seguida, binarizado utilizando o método de Otsu [8]. Essa técnica determina automaticamente um limiar ótimo para separar os pixels da ROI (alta variância) dos pixels do fundo (baixa variância).

3. **Pós-processamento Morfológico:** Uma operação de abertura morfológica é aplicada à máscara binária para remover pequenos ruídos e regiões espúrias, resultando em uma máscara limpa contendo apenas a ROI.
4. **Determinação da ROI:** Por fim, um algoritmo de rotulação de componentes conectados identifica a região principal e define seu retângulo delimitador (*bounding box*), que corresponde à ROI detectada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Inicialmente, foram realizadas simulações no software *MATLAB* utilizando vídeos sintéticos em escala de cinza. O objetivo era validar o comportamento teórico do sistema em um ambiente controlado e analisar o impacto da diversidade espacial e temporal no desempenho. Foram geradas curvas de Taxa de Erro de Símbolo (SER) versus Relação Sinal-Ruído (SNR), adicionando ruído gaussiano (AWGN) ao sinal. A Figura 2 exemplifica um desses resultados, onde se avaliou o desempenho do receptor OCC-ALS sob diferentes configurações de diversidade temporal (número de quadros F) e de níveis de borrimento: sem borrimento ($\text{sim}=1$), borrimento moderado ($\text{sim}=2$) e borrimento intenso ($\text{sim}=3$). O borrimento foi implementado através de um filtro de disco (passa-baixas), de raio $r=1$ ($\text{sim}=2$) e $r=2$ ($\text{sim}=3$).

A análise da figura evidencia que o aumento da diversidade e a redução do borrimento são cruciais para a performance. Por exemplo, ao se analisar o impacto da diversidade temporal, observa-se que aumentar o número de quadros de $F=5$ para $F=10$ (mantendo $\text{sim}=1$) permitiu uma redução de aproximadamente 8 dB na SNR necessária para se atingir a mesma SER de 10^{-1} . Por outro lado, o aumento do grau de borrimento degradou drasticamente o desempenho; para $F=10$, passar do cenário $\text{sim}=1$ para $\text{sim}=2$ implicou uma penalidade de mais de 10 dB de SNR para se atingir uma SER de 10^{-2} . O desempenho foi ainda pior no cenário com borrimento intenso ($\text{sim}=3$), que atingiu a mesma taxa de erro apenas para valores de SNR muito elevados.

Posteriormente, para a validação prática do método de detecção automática da ROI, a transmissão de dados foi realizada a partir da tela de 15.6 polegadas de um notebook *Dell Inspiron 3530*, que exibia os vídeos a 3 quadros por segundo. A ROI transmitida possuía dimensões físicas de aproximadamente 4.7 cm x 4.7 cm. O receptor era um smartphone *Samsung Galaxy A54*, mantido em um suporte fixo para garantir estabilidade. A captura foi realizada com o aplicativo de câmera padrão no modo “Vídeo Profissional”, configurado para uma resolução de 720p a 30 quadros por segundo (configurando uma superamostragem temporal), com velocidade do obturador em 1/60 s, balanço de branco travado em 4500 K, *HDR* desativado e foco fixo na área da tela.

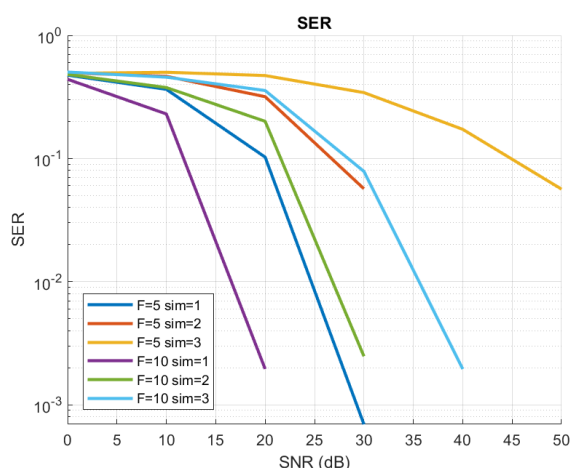


Figura 2: Impacto da diversidade temporal e do borrimento no desempenho do receptor OCC-ALS

O esquema de comunicação tensorial, gerado em MATLAB, utilizou um vídeo em escala de cinza com uma resolução de ROI de $J \times L = 8 \times 8$ pixels, contendo $F=5$ quadros e $K=10$ pulsos de modulação BPPM (*Binary Pulse Position Modulation*) por pixel. Neste caso, para a recuperação dos dados, foi empregado o receptor OCC-KRF. O sistema foi avaliado em quatro cenários distintos, combinando duas distâncias (30 cm e 150 cm) e duas condições de iluminação ambiente: “luzes acesas” (iluminação interna artificial de ~ 28 lux) e “luzes apagadas” (baixa luminosidade de ~ 4 lux). Para garantir a robustez estatística, a análise da taxa de erro de bit (BER) foi realizada a partir de 10.000 simulações de *Monte Carlo* para cada ponto, adicionando-se um ruído Gaussiano de média nula ao sinal.

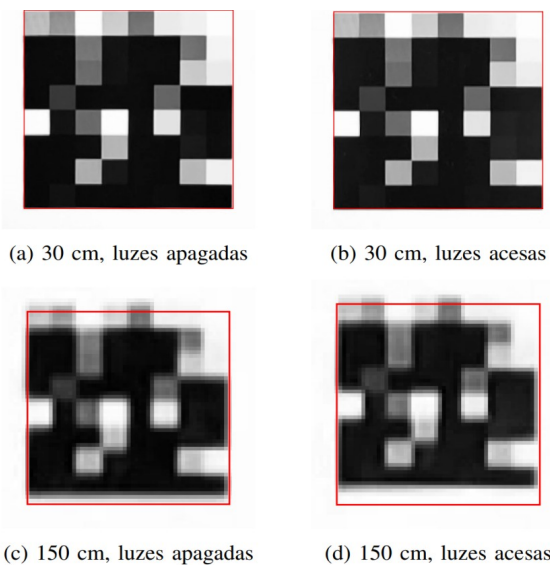


Figura 3: ROI detectada sob quatro condições experimentais

A análise da Figura 4 revela que os melhores desempenhos (menor BER) foram obtidos a 30 cm, com pouca diferença entre as condições de iluminação. O cenário de 150 cm com luzes apagadas também apresentou um desempenho muito próximo, sugerindo que a distância e o consequente borramento, isoladamente, têm um impacto limitado.

No entanto, o cenário mais desafiador (150 cm, luzes acesas) apresentou uma degradação de desempenho substancial. Este resultado, quando comparado à curva de referência com ROI manual, indica que a degradação não se deve apenas a um erro na detecção da ROI, mas provavelmente a efeitos não lineares introduzidos pelo display ou pela câmera, como *blooming* (vazamento de luz entre pixels) e saturação do sensor, que são intensificados pela combinação de longa distância e alta iluminação ambiente.

A eficácia do algoritmo de detecção foi primeiramente avaliada visualmente. Como demonstrado na Figura 3, o método foi capaz de isolar corretamente a ROI em todas as quatro condições testadas. Mesmo no cenário mais desafiador (150 cm de distância com luzes acesas), onde efeitos de desfocagem e reflexos são mais pronunciados, o algoritmo conseguiu delimitar a área de interesse com precisão, com apenas um leve desalinhamento.

Em seguida, o impacto da precisão da ROI na qualidade da comunicação foi avaliado através de curvas de BER versus $1/P_n$ (inverso da potência do ruído adicionado via software), geradas a partir de

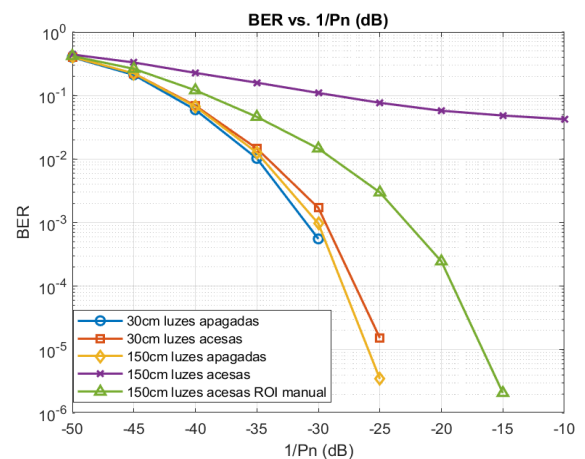


Figura 4: BER obtido usando detecção automática da ROI

CONCLUSÕES:

Este trabalho validou com sucesso a aplicação de modelos tensoriais para sistemas de comunicação S2C e, como principal contribuição, desenvolveu e integrou um método de baixo custo computacional e livre de treinamento para a detecção automática da Região de Interesse. Os resultados experimentais demonstraram que o algoritmo proposto, baseado na análise de variância temporal, é robusto e eficaz na localização da ROI sob diversas condições de distância e iluminação.

A análise de desempenho da comunicação via validação numérica e experimentos reais com um esquema *smartphone-laptop* revelaram que, embora a detecção da ROI seja precisa, fatores não lineares do canal óptico, como saturação do sensor e *blooming*, podem ser grandes limitantes de desempenho em cenários de longa distância com alta iluminação ambiente, sobretudo com dispositivos de uso comercial de baixo custo.

Como perspectivas futuras, pretende-se investigar a fundo esses efeitos não lineares e desenvolver técnicas para mitigá-los. Além disso, planeja-se avaliar o sistema em cenários com múltiplos transmissores simultâneos e adaptar o algoritmo para operação em tempo real, explorando o potencial da tecnologia S2C para aplicações dinâmicas e interativas no ecossistema das futuras redes 6G.

BIBLIOGRAFIA

- [1] N. Saeed, S. Guo, K.-H. Park, T. Y. Al-Naffouri e M.-S. Alouini, "Optical camera communications: Survey, use cases, challenges, and future trends", *Physical Communication*, vol. 37, p. 100900, 2019.
- [2] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam e Y. M. Jang, "A Comparative Survey of Optical Wireless Technologies: Architectures and Applications", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 9819-9840, 2018.
- [3] L. R. Ximenes, B. A. Laredo e R. Arthur, "Integrated data detection and video restoration for optical camera communications", *Digital Signal Processing*, vol. 141, p. 104192, 2023.
- [4] R. Harshman, "Foundations of the PARAFAC procedure: Models and conditions for an 'explanatory' multimodal factor analysis," UCLA, Los Angeles, CA, USA, Tech. Rep. 16, 1970.
- [5] L. R. Ximenes and P. G. Cardoso, "Esquema de comunicação Screen-to-Camera (S2C) tensorial em blocos de vídeos segmentados," XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2024), Belém, PA, 2024.
- [6] L. R. Ximenes e M. F. Alves, "Tensor-Based Screen-to-Camera Communications", *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 10, pp. 2787-2791, 2023.
- [7] L. R. Ximenes and M. S. Pinheiro, "Automatic Screen Detection via Temporal Variance Analysis for Screen-to-Camera Communications," XLIII Brazilian Symposium on Telecommunications and Signal Processing (SBrT 2025), Natal, RN, 2025 (aprovado).
- [8] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, pp. 62–66, Jan. 1979.