

Sistema Automotivo VLC

Usando Sensor de Imagem de Comunicação Óptica

Aluno: Wagner Flores dos Santos

MTG029007 - MEIOS DE TRANSMISSÃO GUIADOS
ANO/SEMESTRE: 2025.1
ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES [290}

Julho de 2025



INSTITUTO FEDERAL

Santa Catarina
Câmpus São José

I. Introdução

Neste trabalho, os autores apresentam uma nova abordagem para comunicação entre veículos usando luz visível, ou VLC. A proposta é utilizar LEDs automotivos, como faróis e lanternas, para transmitir dados, e um sensor especial chamado OCI, um tipo de sensor de imagem que consegue identificar os sinais ópticos com alta precisão.

Esse sistema já demonstrou funcionar com veículos reais, em movimento, atingindo 10 megabits por segundo. Agora, com o uso da modulação óptica OFDM, ele chega a taxas ainda maiores de até 55 megabits por segundo superando o limite do padrão IEEE 802.11p, usado atualmente em muitas aplicações veiculares.

O projeto leva em consideração fatores práticos, como o ruído do sensor e as limitações dos LEDs, garantindo confiabilidade a longo prazo. E nos testes realizados, o sistema mostrou excelente desempenho.

I. Introdução

O que é VLC?

- VLC = Visible Light Communication
- Usa LEDs como transmissores e sensores de imagem como receptores.
- Veículos autônomos e conectados exigem comunicações V2X confiáveis.
- VLC surge como solução complementar à RF (como DSRC/802.11p).

II. Conceito do Sistema

O transmissor óptico (TX) é instalado em uma lanterna traseira e o receptor (RX) com OCI é posicionado no veículo que segue. O transmissor utiliza múltiplos LEDs automotivos controlados por FPGA com modulação DCO-OFDM.

O OCI possui IPx para detectar a posição dos LEDs e CPx para extrair o sinal óptico de alta velocidade. Uma imagem binária (flag image) marca os LEDs detectados, permitindo a seleção automática do melhor pixel CPx. Essa arquitetura garante robustez contra desalinhamento e luz ambiente, e permite operação com muitos transmissores em paralelo.

II. Conceito do Sistema

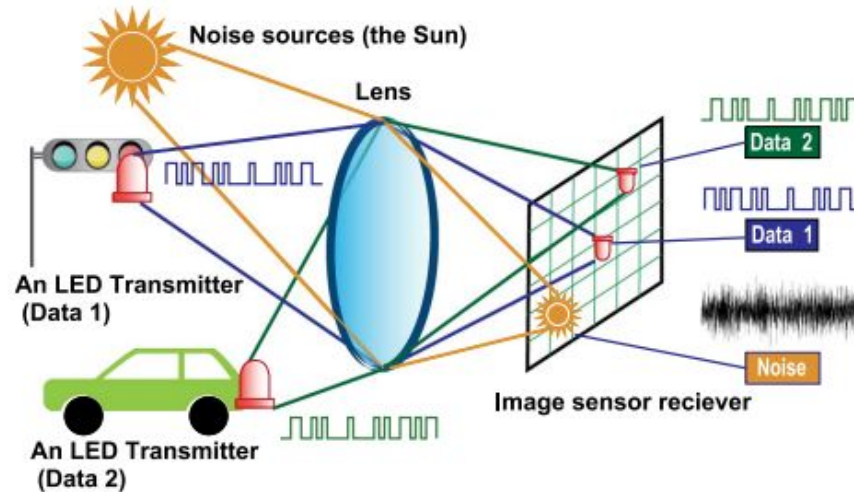


Fig. 1. Spatial separation of multiple sources by an image sensor. The image sensor receiver for the VLC system can discard noise sources such as the Sun and focus only on the pixels that sense desirable sources (i.e., LED transmitters).

III. Arquitetura do Sensor OCl

O sensor CMOS personalizado combina dois tipos de pixels:

- IPx (imagem): localiza as fontes luminosas na cena.
- CPx (comunicação): detecta sinais rápidos.

A imagem de flag, gerada pelos IPx, indica regiões com LEDs ativos. Os CPx correspondentes são então ativados para recepção do sinal.

Esses CPx têm resposta em alta frequência e faixa dinâmica ampla, com amostragem seletiva, diferente de sensores de vídeo convencionais. Isso permite taxa de leitura elevada sem necessidade de atualizar toda a imagem.

III. Arquitetura do Sensor OCI

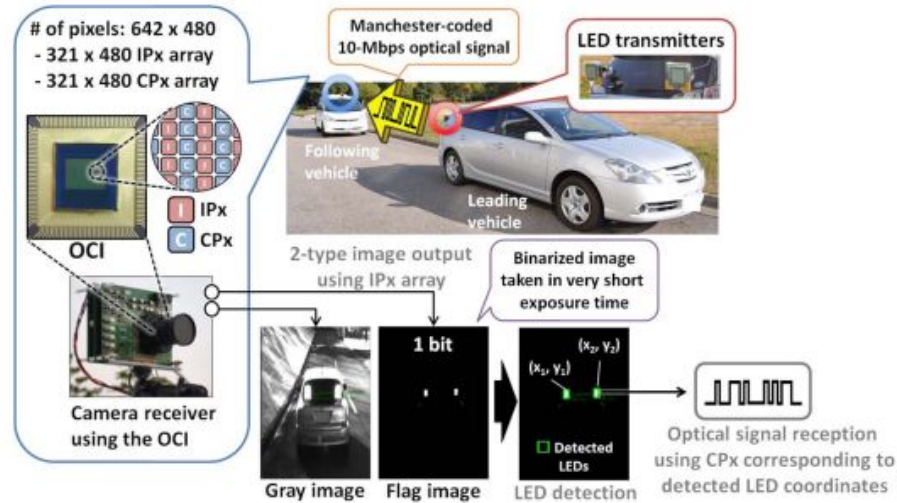


Fig. 2. Entire operation of OCI-based V2V system. The OCI outputs a conventional gray image and a 1-bit flag image. Based on the flag image, the LED regions are detected and, then, CPx corresponding to the coordinates of the LED receives optical signals.

IV. Modulação OFDM Óptica e Projeto de Sinal

A modulação usada é o DCO-OFDM, adaptado para luz visível (sinal real e positivo).

1. Simetria Hermitiana garante que o sinal no tempo seja real.
2. Polarização DC desloca o sinal para cima de zero.
3. Clipping remove os valores negativos (com pequena distorção).

O sinal é gerado via IFFT em FPGA, modulado em subportadoras com QAM de ordem variável (bit loading) e convertido para corrente dos LEDs. O número de subportadoras ativas e a corrente média são ajustados para respeitar limites térmicos e garantir segurança automotiva.

IV. Modulação OFDM Óptica e Projeto de Sinal

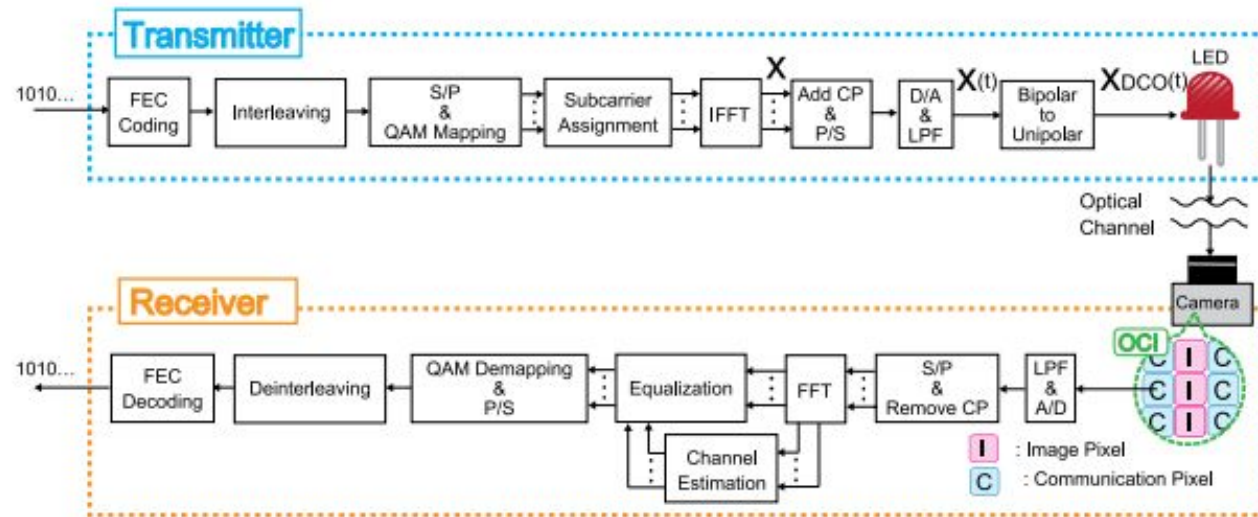


Fig. 3. General system model of OCI-based optical-OFDM.

V. Características do Sensor OCI

A. Resposta em Frequência - O CPx possui largura de banda de cerca de 25 MHz — suficiente para OFDM em dezenas de subportadoras.

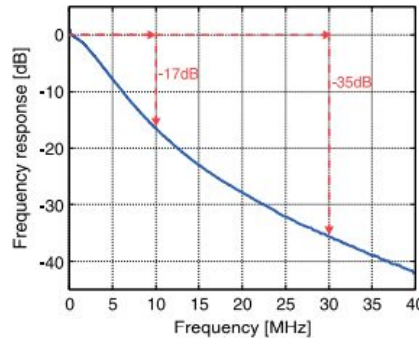


Fig. 4. Measured frequency response of the CPx. The CPx has a high dynamic range by the logarithmic response structure to be used in outdoor lighting environments. By this response characteristic, the frequency response of the OCI is not flat, but it continuously decreases as the frequency increases [16].

V. Características do Sensor OCI

B. Ruído - O ruído térmico domina ambientes internos; já o ruído da luz ambiente (solar ou artificial) afeta ambientes externos. Técnicas de seleção de pixel e ajuste de ganho ajudam a manter a integridade do sinal.

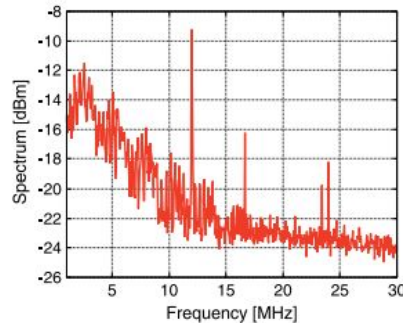


Fig. 5. Measured noise spectrum of a CPx output. The large narrowband noise at 12 MHz, and the low-frequency noise component (several MHz) are shown. These noises arise from circuits to obtain the gray and flag images; then, they obscure received signals.

Figura 5: Ruído
Fonte: GOTO et al., 2016.

V. Características do Sensor OCI

C. Faixa Dinâmica - Grande faixa dinâmica permite recepção estável em diferentes distâncias e intensidades luminosas.

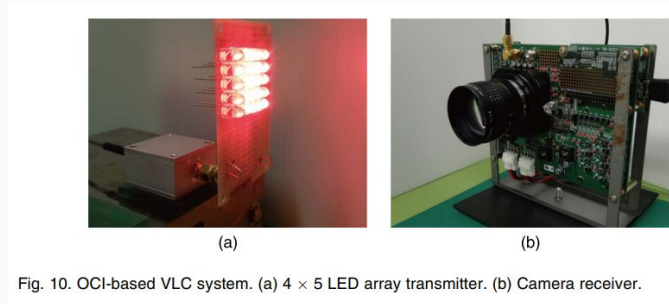


Figura 6: Transmissor e receptor
Fonte: GOTO et al., 2016.

D. Ângulo de Incidência - A recepção se mantém confiável para ângulos de até $\pm 15^\circ$, o que é adequado para tráfego urbano real.

VI. Resultados Experimentais

A. Montagem - Transmissor LED + FPGA e receptor OCl operando entre 0,5 e 2,5 m.

B. Desempenho:

- 45 Mb/s com BER = 0
- 55 Mb/s com BER < 10^{-5}

C. Comparação Teórica - Resultados próximos do limite de Shannon. O uso de bit loading adapta a modulação para cada subportadora, otimizando a transmissão.

D. Robustez - Funcionamento estável mesmo com variações de distância, ângulo e luz ambiente.

VI. Resultados Experimentais

Montagem

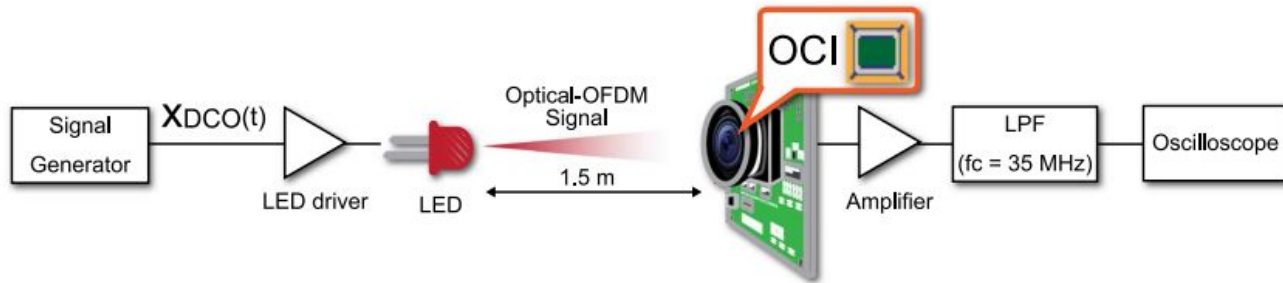


Fig. 11. Experimental setup, LED transmitter, and OCI-based camera receiver.

VI. Resultados Experimentais

Desempenho

TABLE 6
BER measurement results

Coding rate	Target bit rate [Mbps]	Throughput [Mbps]	BER	
3/4	60	45	0	$(0/1.01 \times 10^7)$
	66.7	50	7.86×10^{-7}	$(8/1.02 \times 10^7)$
	73.3	55	4.48×10^{-6}	$(49/1.09 \times 10^7)$
1/2	90	45	0	$(0/1.01 \times 10^7)$
	100	50	3.11×10^{-6}	$(32/1.03 \times 10^7)$
	110	55	9.17×10^{-6}	$(99/1.08 \times 10^7)$

VII. Discussão

Comparação com DSRC - O sistema supera o DSRC (27–54 Mb/s) ao alcançar até 55 Mb/s com canal óptico único e sem interferência RF.

Segurança - A comunicação direcional garante confidencialidade natural (LoS). A posição do emissor é visível na imagem, aumentando a confiança da origem dos dados.

Escalabilidade - A integração com câmeras automotivas existentes torna o sistema escalável. Pode ser usado em aplicações V2V, V2I, semáforos inteligentes, cruzamentos, etc.

Limitações

- Exige linha de visão (LoS).
- Iluminação extrema pode saturar o sensor.
- LEDs limitam taxas muito altas.

VIII. Conclusão

O sistema proposto com VLC e OCI apresenta vantagens únicas, especialmente em termos de segurança (direcionalidade), imunidade a RF e integração com sensores de câmera.

No entanto, a exigência de linha de visão, ausência de padronização global e desafios de escalabilidade limitam sua adoção comercial imediata.

Enquanto isso, o mercado segue adotando o C-V2X, apoiado por operadoras de celular e montadoras como Qualcomm, Huawei, Ford, BMW e outras.

A tecnologia VLC, no entanto, tem grande potencial como complemento: pode ser usada para reforçar a comunicação de curto alcance em cruzamentos, semáforos, manobras autônomas e sistemas de segurança redundantes.

IX. Referências

[1] H. Goto, Y. Fujimoto, S. Haruyama, and M. Nakagawa,
“A new automotive VLC system using optical communication image sensor,”
IEEE Photonics Journal, vol. 8, no. 3, pp. 1–17, June 2016,

[2] 5GAA (5G Automotive Association)
“C-V2X Use Cases, Deployment and Timeline”
<https://5gaa.org>