

# Equalização MMSE para o esquema *Color-Hopping Space-Time* (CHST) em sistemas de comunicação VLC

Igor S. C. Rodrigues, Leandro R. Ximenes e Rangel Arthur

**Resumo**— Este artigo propõe o desenvolvimento de um equalizador *Minimum Mean Square Error* (MMSE) e compara sua performance em sistemas de comunicação por luz visível (VLC) sobre efeito de atenuação monocromática usando o código *Color-Hopping Space-Time* (CHST) para a modulação *Color-Shift Keying* (CSK). A atenuação monocromática é um efeito não investigado para a modulação CSK, com grande potencial de degradação em canais do tipo *Non-Line-of-Sight* (NLOS). Simulações computacionais demonstram os efeitos da degradação monocromática em sistemas VLC e que a combinação do equalizador MMSE e o esquema CHST fornecem melhores desempenhos de taxa de erro de bit que o esquema convencional *Quadriled* baseado no equalizador *Zero-Forcing* (ZF).

**Palavras-Chave**— Comunicação por Luz Visível, Modulação por Chaveamento de Cor, Permutação de Símbolos, Atenuação Monocromática, Equalização

**Abstract**— This article proposes the development of a *Minimum Mean Square Error* (MMSE) equalizer and compares its performance in *Visible Light Communication* (VLC) systems under *monochromatic attenuation* effect using the *Color-Hopping Space-Time* (CHST) coding. *Monochromatic attenuation* is an uninvestigated effect for *Color-Shift Keying* (CSK) modulation, with major negative effects on *Non-Line-of-Sight* (NLOS) channels. Computer simulations demonstrate the effects of *monochromatic degradation* in VLC systems and that the combination of the MMSE equalizer and the CHST scheme provide better bit error rate performances than the conventional *Quadriled* scheme based on the *Zero-Forcing* (ZF) equalizer.

**Keywords**— Visible Light Communications, Color Shift-keying, Symbol permutation, Monochromatic attenuation, Equalization

## I. INTRODUÇÃO

A Comunicação por Luz Visível (*Visible Light Communications* - VLC) é uma tecnologia que transmite dados enquanto contribui para a iluminação usando o espectro de luz visível, prometendo taxas de dados superiores, implementação mais barata e maior segurança do que as tecnologias concorrentes na faixa de radiofrequência (RF) [1]. Um sistema VLC pode implementar a modulação por chaveamento de cor (*Color-Shift Keying* - CSK), que usa diferentes combinações de cores para transmitir símbolos diferentes. Variando o comprimento de onda dos símbolos transmitidos, o CSK mantém a potência de transmissão constante, evitando o efeito de cintilação prejudicial que afeta outras modulações, como a modulação

*On-Off Keying* (OOK) [2]. A modulação CSK padronizada em [3] é implementada com três diodos emissores de luz (LEDs) (TLED/CSK), enquanto a modulação QLED/CSK usa quatro LEDs [4].

Recentemente, a codificação *Color-Hopping Space-Time* (CHST) foi proposta em [5] para sistemas QLED/CSK. Este esquema, baseado nas permutações pseudo-aleatórias do mapeamento símbolo-cor, utiliza a multiplexação espaço-tempo-cor para prover ganhos de diversidade e/ou de multiplexação, além de fornecer aprimoramentos de segurança de informação. Por gerar permutações pseudo-aleatórias no mapeamento dos símbolos no mapa de cores, a codificação CHST apresenta interessantes propriedades para a mitigação por degradações monocromáticas do canal de comunicação.

Uma cor monocromática pode ser definida por um único comprimento de onda da luz visível ou por um espectro de banda estreita. A atenuação monocromática ocorre quando a energia nesta banda estreita é absorvida pelas superfícies do ambiente de maneira diferente do resto do espectro, gerando um efeito de seletividade de frequência no canal. É mostrado em [6] que diferentes materiais de superfície que são comuns em ambientes internos têm diferentes valores de absorvância para diferentes comprimentos de onda, e em [7] diferentes valores de absorvância são mostrados para cada cor primária.

Embora, intuitivamente, a atenuação monocromática possa não ter grande impacto em um enlace VLC com uma Linha de Visada (LOS) predominante, a comunicação por um canal sem linha de visada (NLOS), dependente da propagação de sinais por multipercursos, é severamente afetada. Nesta situação crítica, a calibração de cores do receptor VLC, que nada mais é que a equalização do canal sem fio, se torna um desafio ainda maior.

De forma geral, equalizadores são essenciais em comunicações, sendo responsáveis pela reversão da degradação em um sinal transmitido causada por um canal de comunicação não-ideal. O equalizador *Zero-Forcing* (ZF) foi proposto inicialmente por [8] para eliminar interferência intersimbólica e é conhecido por sua simplicidade de implementação. O ZF é o equalizador utilizado no padrão IEEE 802.15.7 para a calibração de cores na modulação CSK [3]. Porém, para canais seletivos em frequência, como em canais sob forte atenuação monocromática, o equalizador ZF tende a amplificar o ruído aditivo, reduzindo a relação Sinal-Ruído (SNR) de recepção e aumentando a taxas de erro de bit (BER). Por outro lado, o equalizador linear *Minimum Mean Square Error* (MMSE), introduzido por [9], foi proposto para contornar esta

Igor Cruz, Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Limeira-SP, e-mail: i263014@dac.unicamp.br; Leandro Ximenes, Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Limeira-SP, e-mail: leandro@ft.unicamp.br; Rangel Arthur, Faculdade de Tecnologia, UNICAMP, Limeira-SP, e-mail: rangel@ft.unicamp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES-Brasil - Código de financiamento 001.

deficiência do equalizar ZF, adicionando-se o conhecimento da matriz de autocorrelação do ruído aditivo em sua formulação.

Este artigo propõe o desenvolvimento de um equalizador MMSE para calibração de cores em sistemas QLED/CSK baseados na codificação CHST. Este documento também compara a performance dos equalizadores ZF e MMSE em cenários sem linha de visada sob efeito de atenuação monocromática.

A organização deste trabalho é dividida cinco seções. A seção II apresenta o esquema CHST e os equalizadores implementados, a seção III traz o modelo de atenuação monocromática idealizado e a seção IV mostra as simulações feitas para análise de performance dos esquemas e equalizadores sobre efeito da atenuação monocromática.

## II. Color-Hopping Space-Time (CHST) coding

A modulação QLED/CSK, implementada em [4], utiliza-se de  $K_T = 4$  LEDs de diferentes cores como transmissores: Azul (B), Ciano (C), Amarelo (Y), Vermelho (R). Os símbolos são mapeados no mapa de cores utilizando as equações:

$$x = P_B x_B + P_C x_C + P_Y x_Y + P_R x_R \quad (1)$$

$$y = P_B y_B + P_C y_C + P_Y y_Y + P_R y_R, \quad (2)$$

em que  $(x, y)$  é o par de coordenadas de um símbolo no mapa de cores,  $P_{k_T}$  é a intensidade atribuída ao LED na cor  $k_T = \{B, C, Y, R\}$  e  $(x_{k_T}, y_{k_T})$  é o par de coordenadas deste LED. Para que a potência de transmissão seja constante ao longo do tempo, respeita-se a condição de que

$$P_B + P_C + P_Y + P_R = 1. \quad (3)$$

Para  $N$  símbolos transmitidos, temos que a matriz  $\mathbf{S}$  de símbolos transmitidos é definida por

$$\mathbf{S} \triangleq \begin{bmatrix} P_{1,B} & P_{1,C} & P_{1,Y} & P_{1,R} \\ P_{2,B} & P_{2,C} & P_{2,Y} & P_{2,R} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{N,B} & P_{N,C} & P_{N,Y} & P_{N,R} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N \times K_T}. \quad (4)$$

No caso da modulação 4-CSK, os símbolos são mapeados nos vértices do mapa de cores, de modo que apenas uma das potências  $P_{n,k_T}$  seja 1, e as demais potências para o mesmo valor de  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$  seja zero.

A codificação CHST é um esquema de codificação de cor-espaço-tempo (STC) baseado em permutações pseudo-aleatórias do mapeamento de símbolos no mapa de cores [5]. Neste esquema, o vetor  $N$  de símbolos para cada arranjo de LEDs é permutado  $P$  vezes ao longo do tempo, com cada permutação conhecida tanto pelo transmissor quanto pelo receptor. No receptor, um ou mais arranjos de  $K_R$  fotodiodos (PD) são usados para coletar os sinais. Geralmente,  $K_T = K_R$  e as cores dos LEDs e PDs se correspondem.

A Fig. 1 mostra o esquema CHST para um sistema *Single-Input Single-Output* (SISO) na operação QLED, ou seja, um único arranjo de quatro LEDs e um único arranjo de quatro PDs.

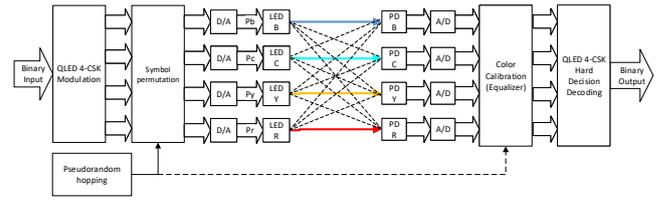


Fig. 1. Esquema de transmissão CHST para o caso SISO [5].

Neste caso SISO, os sinais recebidos para cada período de permutação são concatenados verticalmente, formando a matriz  $\bar{\mathbf{Y}}$  de símbolos recebidos

$$\bar{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \mathbf{M}_1 \mathbf{S}^T \\ \vdots \\ \mathbf{H}_P \mathbf{M}_P \mathbf{S}^T \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{K_R P \times N}, \quad (5)$$

em que  $\mathbf{M}_p$  é uma matriz de permutação de tamanho  $K_T \times K_T$ , e a matriz de canal  $\mathbf{H}_p \in \mathbb{R}^{K_R \times K_T}$  denota um canal possivelmente variante no tempo (ao longo das permutações). Por (5) é possível perceber que a codificação CHST pode ser utilizada para prover diversidade temporal ao sistema de comunicação, a partir da redundância dos símbolos transmitidos em diferentes blocos temporais de permutação.

Definindo a matriz de canal efetiva  $\mathbf{H}_e \in \mathbb{R}^{K_R P \times K_T}$  como

$$\mathbf{H}_e \triangleq \text{blkdiag}(\mathbf{H}_1, \dots, \mathbf{H}_P) [\mathbf{M}_1^T \dots \mathbf{M}_P^T]^T, \quad (6)$$

em que  $\text{blkdiag}(\cdot)$  indica uma matriz de blocos diagonal, então pode-se reescrever (5) como

$$\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{H}_e \mathbf{S}^T. \quad (7)$$

### A. Equalizador ZF

Supondo conhecimento perfeito do estado do canal no receptor para fins de calibração de cores [3], se  $\bar{\mathbf{M}}$  também for conhecido por ele, é possível aplicar um equalizador para estimar  $\mathbf{S}$  a partir de (7).

A equalização ZF pode ser realizada através da equação

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{ZF}} = \hat{\mathbf{S}} \approx \left( \mathbf{H}_e^\dagger \tilde{\mathbf{Y}} \right)^T, \quad (8)$$

em que  $\hat{\mathbf{S}}$  é a estimativa de  $\mathbf{S}$  e  $\tilde{\mathbf{Y}}$  é a versão ruidosa de  $\bar{\mathbf{Y}}$  [5]. O operador  $\dagger$  indica a pseudo-inversa de Moore-Penrose. A condição de identificabilidade do equalizador ZF é então que  $\mathbf{H}_e$  tenha posto coluna completo.

### B. Equalizador MMSE

Alternativamente, neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um equalizador MMSE para a estimação dos símbolos transmitidos. Um estimador MMSE linear pode ser encontrado a partir da solução ótima do sistema abaixo [10]:

$$\mathbf{R}_Y \mathbf{W} = \mathbf{R}_{YS}, \quad (9)$$

em que  $\mathbf{W}$  é o estimador linear MMSE ótimo,  $\mathbf{R}_Y \triangleq \mathbb{E} \left\{ \tilde{\mathbf{Y}} \tilde{\mathbf{Y}}^H \right\}$  é a matriz de autocorrelação da matriz de sinais recebidos  $\tilde{\mathbf{Y}}$ , e  $\mathbf{R}_{YS} \triangleq \mathbb{E} \left\{ \tilde{\mathbf{Y}} \mathbf{S}^* \right\}$  é a matriz de correlação

cruzada entre  $\tilde{\mathbf{Y}}$  e a matriz de símbolos  $\mathbf{S}$ . O sobrescrito  $H$  indica o operador hermitiano,  $*$  o operador de conjugado e  $\mathbb{E}\{\cdot\}$  é o operador de esperança estatística.

Partindo de (7), a versão ruidosa de  $\tilde{\mathbf{Y}}$  é dada por

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{H}_e \mathbf{S}^T + \mathbf{V}, \quad (10)$$

em que  $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{K_R P \times N}$  é a matriz de ruído aditivo gaussiano branco. Com (10) é possível reescrever  $\mathbf{R}_Y$  como

$$\mathbf{R}_Y = \mathbb{E} \left\{ (\mathbf{H}_e \mathbf{S}^T + \mathbf{V}) (\mathbf{H}_e \mathbf{S}^T + \mathbf{V})^H \right\}. \quad (11)$$

Expandindo-se os produtos em (11), considerando a propriedade de linearidade do operador esperança e que  $S^H = S^T$  para sinais reais, obtém-se

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_Y = & \mathbb{E} \left\{ \mathbf{H}_e \mathbf{S}^T \mathbf{S} \mathbf{H}_e^H \right\} + \mathbb{E} \left\{ \mathbf{H}_e \mathbf{S}^T \mathbf{V}^H \right\} \\ & + \mathbb{E} \left\{ \mathbf{V} \mathbf{S}^H \right\} + \mathbb{E} \left\{ \mathbf{V} \mathbf{V}^H \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Para o ruído branco gaussiano de média nula, tem-se que  $\mathbb{E}\{\mathbf{V}\}$  é uma matriz nula, i.e.,  $\mathbb{E}\{\mathbf{V}\} = \mathbf{0}_{K_R P \times N}$ . Considerando que a matriz de símbolos e a matriz de ruído aditivo são independentes, simplifica-se (12) para

$$\mathbf{R}_Y = \mathbb{E} \left\{ \mathbf{H}_e \mathbf{S}^T \mathbf{S} \mathbf{H}_e^H \right\} + \mathbb{E} \left\{ \mathbf{V} \mathbf{V}^H \right\}. \quad (13)$$

Assumindo o conhecimento perfeito do estado do canal, tal que  $\mathbb{E}\{\mathbf{H}_e\} = \mathbf{H}_e$ , então (13) se torna

$$\mathbf{R}_Y = \mathbf{H}_e \mathbf{R}_S \mathbf{H}_e^H + \mathbf{R}_V, \quad (14)$$

em que  $\mathbf{R}_S \triangleq \mathbb{E}\{\mathbf{S}^T \mathbf{S}\}$  é a matriz de autocorrelação da matriz de símbolos, que para a modulação QLED 4-CSK é dada por

$$\mathbf{R}_S = \frac{N}{K_T} \mathbf{I}_{K_T}, \quad (15)$$

sendo  $\mathbf{I}_{K_T} \in \mathbb{R}^{K_T \times K_T}$  a matriz identidade e  $\mathbf{R}_V \triangleq \mathbb{E}\{\mathbf{V} \mathbf{V}^H\}$  a matriz de autocorrelação do ruído dada por

$$\mathbf{R}_V = \sigma_v^2 N \mathbf{I}_{K_R P}, \quad (16)$$

em que  $\sigma_v^2$  é a variância do ruído aditivo.

Retornando a (9),  $\mathbf{R}_{YS}$  é a correlação cruzada entre a matriz de sinais recebidos em (10) e a matriz de símbolos  $\mathbf{S}$ . Pelas mesmas hipóteses de independência do ruído de média zero, e sendo  $\mathbf{S}^* = \mathbf{S}$ , tem-se que

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{YS} = & \mathbb{E} \left\{ (\mathbf{H}_e \mathbf{S}^T + \mathbf{V}) \mathbf{S}^* \right\}, \\ = & \mathbb{E} \left\{ \mathbf{H}_e \mathbf{S}^T \mathbf{S} + \mathbf{V} \mathbf{S} \right\}, \\ = & \mathbf{H}_e \mathbb{E} \left\{ \mathbf{S}^T \mathbf{S} \right\} + \mathbb{E} \left\{ \mathbf{V} \right\} \mathbb{E} \left\{ \mathbf{S} \right\}, \\ = & \mathbf{H}_e \mathbf{R}_S, \end{aligned} \quad (17)$$

$$= \frac{N}{K_T} \mathbf{H}_e. \quad (18)$$

Por fim, substituindo (14) e (18) em (9), obtém-se

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}_e \mathbf{R}_S \mathbf{H}_e^H + \mathbf{R}_V)^{-1} \mathbf{H}_e \mathbf{R}_S, \quad (19)$$

$$= \left( \frac{N}{K_T} \mathbf{H}_e \mathbf{H}_e^H + \sigma_v^2 N \mathbf{I}_{K_R P} \right)^{-1} \frac{N}{K_T} \mathbf{H}_e \quad (20)$$

$$= \left( \frac{1}{K_T} \mathbf{H}_e \mathbf{H}_e^H + \sigma_v^2 \mathbf{I}_{K_R P} \right)^{-1} \mathbf{H}_e / K_T \quad (21)$$

se e somente se  $\mathbf{R}_Y$  é invertível. A partir de (21), estima-se a matriz de símbolos transmitidos com o equalizador MMSE a partir de

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{MMSE}} \triangleq \left( \mathbf{W}^H \tilde{\mathbf{Y}} \right)^T. \quad (22)$$

Este equacionamento é suficiente quando o esquema tradicional QLED 4-CSK sem permutação de cores [4] é utilizado. Porém, quando o esquema CHST é introduzido, tem-se que, para uma matriz de canal  $\mathbf{H}_e \in \mathbb{R}^{K_R P \times K_T}$  com  $K_R = K_T$ , como  $K_T < K_R P$  para  $P \geq 2$ ,  $\mathbf{R}_Y$  possivelmente se torna uma matriz sem posto completo, e portanto, não inversível.

Para contornar este problema, pode-se utilizar uma forma alternativa do filtro MMSE [10]. Nesta forma alternativa,  $\mathbf{W}$  é dado por

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}_e^H \mathbf{R}_V^{-1} \mathbf{H}_e + \mathbf{R}_S^{-1})^{-1} \mathbf{H}_e^H \mathbf{R}_V^{-1} \quad (23)$$

$$= \left( \frac{1}{\sigma_v^2 N} \mathbf{H}_e^H \mathbf{H}_e + \frac{K_T}{N} \mathbf{I}_{K_T} \right)^{-1} \frac{1}{\sigma_v^2 N} \mathbf{H}_e^H,$$

$$= \left( \frac{1}{\sigma_v^2} \mathbf{H}_e^H \mathbf{H}_e + K_T \mathbf{I}_{K_T} \right)^{-1} \frac{1}{\sigma_v^2} \mathbf{H}_e^H, \quad (24)$$

o que faz com que o posto do argumento da inversa em (24) seja invertível, mesmo quando o mesmo não possa se dizer da inversa em (21). Além disso, a complexidade da inversão em (24) costuma ser menor do que em (21), dado que, em geral,  $K_T \leq K_R P$ .

### III. ATENUAÇÃO MONOCROMÁTICA

A atenuação monocromática pode ser definida pela perda na intensidade do sinal em um dos comprimentos de onda usados na transmissão de um sistema VLC. É um importante fator de degradação porque diferentes materiais de superfície e cores podem ter valores diferentes de absorvância e reflectância, como visto em [6] e [7].

De acordo com o campo de estudos da óptica, as cores que vemos na superfície de um objeto são o resultado da combinação de diferentes comprimentos de onda que estão sendo refletidos por esse objeto, enquanto os demais comprimentos de onda são absorvidos. Por exemplo, se iluminamos uma superfície dita como amarela com uma luz branca formada por um conjunto de LEDs RGB, então os comprimentos de onda de cor verde e vermelho serão em boa parte refletidos, enquanto o comprimentos de onda de cor azul será parcialmente ou completamente absorvidos por essa superfície. É importante destacar que as cores vistas pelos nossos olhos são um produto da biologia humana, com seus cones e bastonetes, e, portanto, a cor vista não é necessariamente causada por apenas uma componente espectral da luz. De fato, a cor interpretada pelo cérebro pode ser resultante de apenas um único comprimento de onda (cor espectral) ou da combinação de vários comprimentos de onda (cor não espectral).

Em um sistema SISO VLC empregando a codificação CHST, se considerados os efeitos da atenuações específicas de cor no canal efetivo, então a matriz  $\mathbf{H}_p$  em (5) pode ser substituída por

$$\check{\mathbf{H}}_p \triangleq \mathbf{H}_p \mathbf{A}_p, \quad (25)$$

em que  $\mathbf{A}_p \in \mathbb{R}^{K_T \times K_T}$  é uma matriz diagonal definida como

$$\mathbf{A}_p \triangleq \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & a_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & a_{K_T} \end{bmatrix}, \quad (26)$$

cujo coeficiente  $0 \leq a_{K_T} \leq 1$  determina a atenuação monocromática para o comprimento de onda do  $K_T$ -ésimo LED.

Usando (25), e a partir de (6), o canal efetivo em (8), (21) ou (24) pode ser reescrito como

$$\mathbf{H}_e = \text{blkdiag}(\check{\mathbf{H}}_1, \dots, \check{\mathbf{H}}_P) [\mathbf{M}_1^T \dots \mathbf{M}_P^T]^T. \quad (27)$$

#### IV. RESULTADOS

Nesta seção, o desempenho dos equalizadores ZF e o MMSE são testados com o esquema tradicional QLED 4-CSK [4] e com o esquema CHST [5], em cenários sem linha de visada e com atenuação monocromática. Para isto, simulações de Monte Carlo foram feitas para gerar as curvas de BER. Deve-se notar que equalizador ZF já havia sido testado para ambos os esquemas, em seus trabalhos originais, mas sem a presença de atenuação monocromática. Para a simulação do equalizador MMSE, foi utilizada o estimador definido em (24).

Foi utilizado um canal Rayleigh de quatro coeficientes (*taps*) para simular uma sala quadrada de  $36 \text{ m}^2$  e  $4 \text{ m}$  de altura. O arranjo de transmissão é posicionado no centro do cômodo, próximo ao teto, e o arranjo de recepção é posicionado centralizado no piso. Todos os quatro coeficientes de canal representam componentes de multicaminho com uma única reflexão, cada um relacionado a uma das paredes do ambiente, com uma média de  $-66 \text{ dB}$  de potência relativa (a uma suposta linha de visada) e  $26,91 \text{ ns}$  de atraso de propagação. Nessas simulações, o receptor possui perfeito conhecimento do canal para fins de calibração de cores. O espalhamento Doppler é desprezado e os coeficientes de canal foram considerados constantes para cada bloco de  $NP$  símbolos. Até  $10^7$  símbolos 4-CSK são transmitidos por valor simulado de  $E_b/N_0$ , em que  $E_b$  é a energia do bit ( $W.s$ ), e  $N_0$  é a densidade espectral de ruído (gaussiano branco aditivo) ( $W/Hz$ ). Todos os arranjos são considerados espacialmente decorrelacionados e não há *crosstalk* entre cores.

Foi simulada uma atenuação monocromática constante da cor vermelha ( $k_R = 4$ ) através de uma variável  $\mu$ . Em outras palavras, a partir de (26), tem-se que

$$\mathbf{A} \triangleq \mathbf{A}_p^{(1,1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad \forall p \in \{1, \dots, P\}. \quad (28)$$

As simulações foram realizadas sem a presença de atenuação monocromática ( $\mu = 1$ ) e também com uma forte absorção da cor vermelha pelas paredes do cômodo ( $\mu = 0,001$ ).

Na Fig. 2, compara-se os desempenhos dos dois equalizadores para o esquema convencional QLED/CSK proposto por Singh *et al.* [4] com diferentes graus de atenuação monocromática. Já na Fig. 3, compara-se o mesmo cenário para

o esquema CHST [5] com quatro permutações, i.e.,  $P = 4$ . Por fim, na Fig. 4, uma última comparação é feita entre os dois esquemas de comunicação, para dos dois tipos de equalizadores, com atenuação monocromática fixa.

Comparando as curvas do ZF e do MMSE sem atenuação monocromática ( $\mu = 1$ ) com o esquema QLED/CSK convencional na Fig. 2, podemos notar um ganho de aproximadamente  $15 \text{ dB}$  na utilização do equalizador MMSE sobre o ZF para uma BER de  $10^{-6}$ . Já para as curvas simulando a presença de atenuação monocromática ( $\mu = 0.001$ ), o MMSE apresentou um ganho ainda maior sobre o equalizador ZF, com ganhos de aproximadamente  $30 \text{ dB}$  para um BER de  $10^{-6}$ . O aumento da taxa de erro com atenuação monocromática era esperado, uma vez que a forte atenuação de uma das cores tem efeito similar à desativação de um dos LEDs transmissores do arranjo, ou, por outro ponto de vista, na atenuação de  $25\%$  dos símbolos transmitidos de uma constelação QLED/4-CSK.

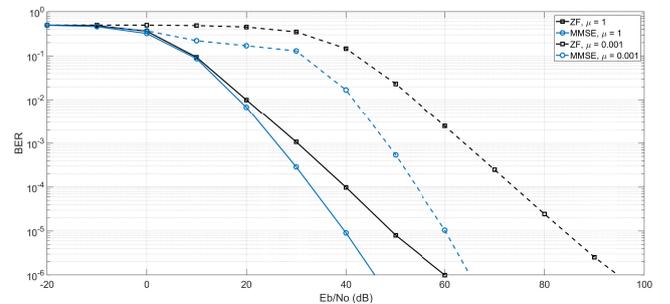


Fig. 2. Implementação dos equalizadores MMSE e ZF para o esquema convencional Singh *et al.*, com ( $\mu = 0.001$ ) e sem ( $\mu = 1$ ) a presença de atenuação monocromática vermelha.

Para o esquema CHST com quatro permutações, as curvas sem atenuação monocromática na Fig. 3 mostram um ganho de aproximadamente  $10 \text{ dB}$  na utilização do equalizador MMSE sobre o ZF para um BER de  $10^{-6}$ , o que evidencia o benefício do equalizador MMSE, mesmo quando aplicado em conjunto do esquema CHST. Para as curvas com atenuação monocromática, o MMSE apresentou ganhos de aproximadamente  $25 \text{ dB}$  para um BER de  $10^{-6}$ . Em ambos os esquemas implementados, o ganho de codificação do equalizador MMSE sobre o ZF é claro, variando de  $15$  até  $30 \text{ dB}$ , principalmente sobre a presença de atenuação monocromática forte, onde são perceptíveis os maiores ganhos. Esta conclusão é similar àquela observada pelo esquema convencional QLED/CSK. Pode-se notar também que o benefício da escolha pelo equalizador MMSE aparenta ser menor para o esquema CHST, visto que o esquema com permutações apresenta uma maior robustez ao ruído e à atenuação monocromática. Vale notar que o esquema CHST é similar ao esquema QLED/CSK para  $P = 1$  [5].

Neste sentido, a comparação direta na Fig. 4 entre os dois esquemas de comunicação VLC sob um efeito da atenuação vermelha forte permite notar que o esquema CHST com  $P = 4$  e com o equalizador MMSE apresenta um ganho de aproximadamente  $20 \text{ dB}$  para uma BER de  $10^{-6}$  comparado ao esquema QLED/CSK convencional utilizando o mesmo equalizador. Comparando em relação aos dois equalizadores,

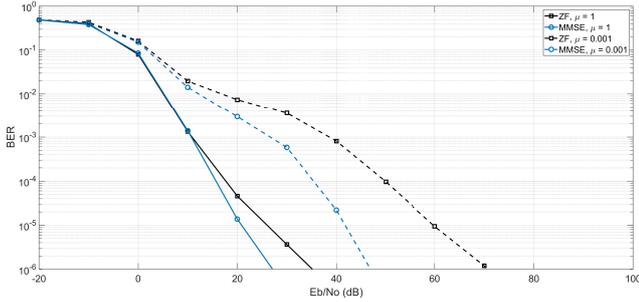


Fig. 3. Implementação dos equalizadores MMSE e ZF para o esquema CHST com quatro permutações, com ( $\mu = 0.001$ ) e sem ( $\mu = 1$ ) a presença de atenuação monocromática vermelha.

ambos esquemas apresentaram ganhos de diversidade similares, embora o esquema CHST tenha valores menores de BER que seu concorrente para o mesmo equalizador utilizado.

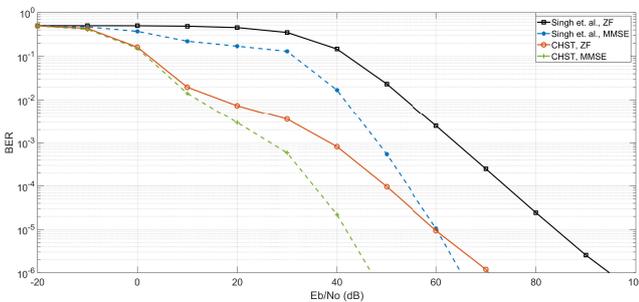


Fig. 4. Comparação entre o esquema CHST ( $P = 4$ ) e o esquema convencional para os dois tipos de equalizadores, com a presença de atenuação monocromática vermelha ( $\mu = 0.001$ ).

## V. DISCUSSÃO

O equalizador ZF clássico para comunicações de RF, ao ser utilizado em um canal seletivo em frequência, tende a degradar o desempenho de um enlace de comunicação ao amplificar demasiadamente o ruído aditivo em faixas espectrais fortemente atenuadas. Por outro lado, o equalizador MMSE busca evitar este problema, ao utilizar o conhecimento estatístico do ruído e do sinal em sua formulação.

Analisando enlaces VLC que empregam a modulação CSK, a atenuação monocromática, por sua vez, torna o canal seletivo no comprimento de onda da luz visível. Logo, o emprego do equalizador ZF para calibração de cores em sistemas QLED/CSK também possui inconveniente da amplificação indesejada do ruído aditivo. Neste sentido, o equalizador MMSE para sistemas QLED/CSK se mostrou uma solução viável e interessante.

Vale notar que a implementação do esquema CHST, naturalmente robusto à atenuação monocromática por prover uma diversidade de cor ao sinal transmitido, pode ser combinado tanto com o equalizador ZF quanto com o MMSE, para ganhos ainda mais elevados e significativos de desempenho. Contudo, o emprego do CHST implica em uma redução da taxa de dados (graças a sua permutação temporal), enquanto que o equalizador MMSE pode exigir uma complexidade maior que o ZF, além de necessitar da informação precisa das estatísticas

de primeira e segunda ordem do sinal e do ruído. Portanto, a utilização de um ou outro equalizador, junto ou não do esquema CHST, é dependente das necessidades da aplicação desejada.

## VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi formulado um estimador MMSE linear para sistemas QLED/CSK com o esquema de codificação CHST. Foi também proposto um modelo de atenuação monocromática em sistemas SISO e avaliado o efeito desta degradação indesejada no desempenho da taxa de erro de bit para dois equalizadores, o ZF e o MMSE aqui proposto. Como resultado, foi mostrado que o esquema de codificação CHST mitiga o impacto da atenuação monocromática, com ganhos de codificação expressivos sobre o esquema QLED/CSK convencional. Além disso, a comparação dos equalizadores demonstrou que o MMSE possui desempenho bastante superior ao ZF, que leva à conclusão de que a implementação do esquema CHST em conjunto com o equalizador MMSE apresenta a melhor estratégia contra a presença de uma atenuação monocromática forte em enlaces VLC sem a presença de linha de visada.

As perspectivas deste trabalho incluem a análise dos efeitos de uma atenuação monocromática variável, a generalização do modelo de atenuação monocromática para sistemas *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO), a estimação de  $E_b/N_0$  para VLC incluindo fontes de iluminação externas, a análise teórica do desempenho e da complexidade da estimação usando os equalizadores, além da validação experimental destes modelos usando circuitos eletrônicos de comunicação VLC.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. C. O'Brien, L. Zeng, H. Le-Minh, G. Faulkner, J. W. Walewski and S. Randel, "Visible light communications: challenges and possibilities," 2008 IEEE 19th Int. Symp. on Pers., Indoor and Mobile Radio Commun., Cannes, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699964.
- [2] S. Rajagopal, R. D. Roberts and S. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light commun.: modulation schemes and dimming support," in IEEE Commun. Mag., vol. 50, no. 3, pp. 72-82, March 2012, doi: 10.1109/MCOM.2012.6163585.
- [3] IEEE Standard for local and metropolitan area networks—Part 15.7: Short-Range Optical Wireless Communications, "in IEEE Std 802.15.7-2018 (Revision of IEEE Std 802.15.7-2011), vol., no., pp.1-407, 23 April 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8697198.
- [4] R. Singh, T. O'Farrell and J. P. R. David, "An enhanced color shift keying modulation scheme for high-speed wireless visible light communications," in J. of Lightw. Technol., vol. 32, no. 14, pp. 2582-2592, 15 July 2014, doi: 10.1109/JLT.2014.2328866.
- [5] I. S. C. Rodrigues, L. R. Ximenes and R. Arthur, "Space-Time-Color (STC) Scheme With Symbol-Hopping for Color Shift Keying (CSK) Modulation," in IEEE Communications Letters, vol. 26, no. 2, pp. 369-373, Feb. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3127697.
- [6] K. Lee, H. Park and J. R. Barry, "Indoor Channel Characteristics for Visible Light Communications," in IEEE Communications Letters, vol. 15, no. 2, pp. 217-219, February 2011, doi: 10.1109/LCOMM.2011.010411.101945.
- [7] Tzeng, Di-yuan and Berns, Roy. (2005), "A Review of Principal Component Analysis and Its Applications to Color Technology," Color Research and Application. 30. 84 - 98. 10.1002/col.20086.
- [8] R. W. Lucky, "Automatic equalization for digital communication," in The Bell System Technical Journal, vol. 44, no. 4, pp. 547-588, April 1965, doi: 10.1002/j.1538-7305.1965.tb01678.x.
- [9] P. Monsen, "MMSE Equalization of Interference on Fading Diversity Channels," in IEEE Transactions on Communications, vol. 32, no. 1, pp. 5-12, January 1984, doi: 10.1109/TCOM.1984.1095956.
- [10] David G. Luenberger. 1997. Optimization by Vector Space Methods (1st ed.). John Wiley and Sons, Inc., USA.