

# Estimação do Número de Símbolos Interferentes em Sistemas de Comunicações Ópticas Coerentes Digitais

Lucas Dantas<sup>1</sup>, Hildo Guillard Jr.<sup>2</sup>, Rafael Penchel<sup>3</sup>, Leandra Abreu<sup>4</sup>, Ivan Aldaya<sup>5</sup>  
FESJ/UNESP, São João da Boa Vista, SP

Os sistemas de comunicações ópticas têm evoluído constantemente para atender à crescente demanda por capacidade de transmissão [1]. O desenvolvimento dos sistemas coerentes digitais representaram um ponto de inflexão nesta evolução [2]. Nestes sistemas, o sinal de recebido é combinado com um oscilador óptico local, permitindo a recuperação não apenas de amplitude, mas também de informações de fase e polarização, abrindo caminho para técnicas eficientes de mitigar efeitos de transmissão. Desta forma, na grande maioria dos casos, o desempenho dos sistemas de comunicações ópticas coerentes digitais está limitado pela combinação de efeitos não lineares e ruído aditivo causado por amplificadores ópticos ou pelos fotodiodos do receptor. O ruído, devido à sua natureza estocástica, é difícil de ser compensado. Os efeitos não lineares, por outro lado, são determinísticos e conseqüentemente plausíveis de serem mitigados. Nos últimos anos, diferentes abordagens de inteligência artificial têm sido exploradas para minimizar o efeito das não linearidades. Entre elas, as redes neurais artificiais com arquitetura de perceptron multi-camada (*multi-layer perceptron*, MLP) têm emergido como uma das soluções mais promissoras devido à flexibilidade para modelar sistemas com diferentes graus de complexidade, além da possibilidade de implementação paralela [3].

Os MLPs representam uma poderosa ferramenta, mas precisam ser alimentados com o conjunto de dados correto. Para alcançar um desempenho ótimo, é preciso identificar quais símbolos interferem não linearmente com o símbolo a ser corrigido. Caso o MLP não tenha conhecimento do valor de símbolos que realmente afeta um determinado símbolo, o efeito deles não poderá ser mitigado. Por outro lado, se o MLP é alimentado com um conjunto excessivo de símbolos, a dimensionalidade do MLP é sobre-estimada, aumentando a probabilidade de acontecer sobreajuste e incrementando desnecessariamente a complexidade do modelo. Desta forma, a identificação correta dos símbolos que interferem não linearmente entre si é necessária para viabilizar os MLPs. Uma das possibilidades de identificar os símbolos interferentes é mediante validação cruzada de modelos que contemplem diferentes números de símbolos. Assim, são treinados modelos com diferentes conjuntos de dados de entrada e se identifica qual modelo tem melhor desempenho na etapa de teste. Este método é intuitivo mas requer um processo de validação cruzada que incrementa significativamente o custo computacional e latência. Neste trabalho, propomos utilizar a correlação cruzada entre símbolos adjacentes a fim de identificar quais símbolos têm efeito em determinado símbolo. É importante ressaltar que nos sistemas digitais coerentes os símbolos são complexos, podendo ser representados tanto em forma cartesiana (componentes em fase e em quadratura) como em forma polar (fase e amplitude). Para decidir quais características devem ser utilizadas para realizar a correlação, precisamos observar a física do efeito não linear. Em particular, em sistemas de transmissão por fibra óptica, o efeito não linear dominante é o efeito Kerr, que por sua vez induz automodulação de fase, modulação de fase cruzada e mistura de quatro ondas. Em sistemas

---

<sup>1</sup>lucas.dantas@unesp.br

<sup>2</sup>h.guillard@unesp.br

<sup>3</sup>rafael.penchel@unesp.br

<sup>4</sup>leandra.abreu@unesp.br

<sup>5</sup>ivan.aldaya@unesp.br

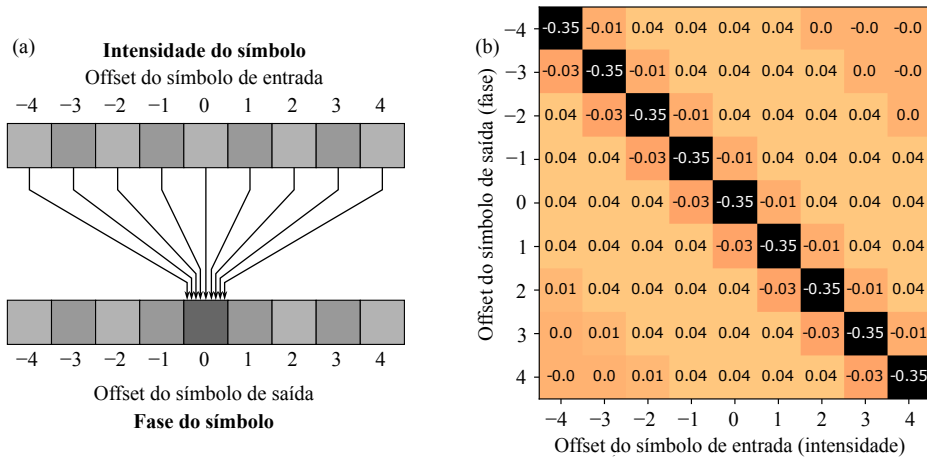


Figura 1: (a) Representação gráfica dos símbolos interferentes. (b) Matriz de correlação. Fonte: dos autores.

de um único canal, o efeito da automodulação de fase é o principal efeito não linear. Neste efeito, a fase da onda é modulada por sua própria intensidade. Esta característica é o que indica quais variáveis serão relacionadas na análise de correlação: intensidade dos símbolos interferentes e a fase do símbolo a ser analisado. A Figura 1 mostra graficamente o conjunto de símbolos envolvidos além das variáveis.

Para comprovar que a análise de correlação pode ser utilizada para avaliar os símbolos interferentes, utilizamos 262.000 símbolos gerados utilizando o esquema de simulação descrito em [4]. Este esquema corresponde a um sistema coerente digital de um único canal com formato de modulação em quadratura de 16 níveis e dupla polarização. Os resultados foram obtidos para uma potência de lançamento de 8 dBm. A matriz de correlação mostra que elementos da diagonal apresentam valores negativos de grande amplitude, enquanto que os valores de correlação entre intensidades dos símbolos vizinhos e a fase do símbolo de interesse é menor, limitada a 11 símbolos.

## Agradecimentos

Agradecemos o apoio da FAPESP (processo número 15/24517-8).

## Referências

- [1] Cisco. **Cisco annual internet report (2018–2023) white paper**. Rel. técn. Cisco, 2020.
- [2] Govind Agrawal. **Sistemas de comunicação por fibra óptica**. 4<sup>a</sup> ed. Elsevier, 2014.
- [3] G. Cossa, C. Costa, V. Cesar, L. Marim, R. Penchel, J. de Oliveira, M. Santos, D. Souza dos Santos e I. Aldaya. “Artificial Neural Networks for Self-phase Modulation Compensation in Unrepeated Digital Coherent Optical Systems”. Em: **International Conference on Computational Intelligence**. Springer. 2022, pp. 259–269. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-2854-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2854-5_22).
- [4] C. Costa, L. Borges, R. Penchel, M. Abbade, E. Giacomidis, J. Wei, J. de Oliveira, M. Santos, S. Li, A. Richter e I. Aldaya. “Self-phase modulation and inter-polarization cross-phase modulation mitigation in single-channel DP-16QAM coherent PON employing 4D clustering”. Em: **Optical Fiber Technology** 75 (2023), p. 103186. DOI: [doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103186](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.103186).