

Impacto da Rotação de Estado de Polarização em Equalizadores Estáticos para Redes Ópticas Passivas Coerentes

Eduardo de Souza Rosa, Julia Aline Sousa Maciel, Tiago Sutili e Rafael Carvalho Figueiredo

Soluções em Fotônica e Quântica – CPQD
Campinas, São Paulo, Brasil

Resumo— Este trabalho investiga a viabilidade do uso de equalização puramente estática na cadeia de Processamento Digital de Sinais (DSP) de recepção de Redes Ópticas Passivas Coerentes (CPON), eliminando a atualização adaptativa dos coeficientes do equalizador de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (MIMO) e, em consequência, reduzindo a complexidade e consumo energético das Unidades de Rede Óptica (ONU). Foi avaliado, via simulação, o impacto das rotações de Estado de Polarização (SoP) na Taxa de Erro de Bit (BER) de um sistema DP-16QAM a 200 Gb/s, para diferentes tamanhos de quadro e distâncias de enlace. Os resultados mostram que, para quadros de até 80.000 símbolos, o sistema opera abaixo do limite de FEC mesmo em velocidades de rotação de polarização muito superiores às tipicamente observadas em redes de acesso.

Palavras-Chave— redes ópticas passivas coerentes, processamento digital de sinais, estado de polarização.

Abstract— This work investigates the feasibility of using purely static equalization in the Digital Signal Processing (DSP) chain of Coherent Passive Optical Network (CPON) receivers, eliminating the adaptive update of Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) equalizer coefficients and, consequently, reducing the complexity and power consumption of Optical Network Units (ONUs). The impact of State of Polarization (SoP) rotations on the Bit Error Rate (BER) of a 200 Gb/s DP-16QAM system was evaluated through simulation, for different frame sizes and link distances. The results show that, for frames of up to 80,000 symbols, the system operates below the FEC threshold even at polarization rotation rates well above those typically observed in access networks.

Keywords— passive optical networks, digital signal processing, state of polarization.

I. INTRODUÇÃO

Redes ópticas de acesso desempenham um papel crucial na infraestrutura de comunicações, provendo altas taxas de bits para conexões de última milha. Redes Ópticas Passivas (PON - *Passive Optical Networks*) oferecem uma solução com boa relação custo-benefício para redes de acesso, permitindo conexões de até 10 Gb/s por comprimento de onda utilizando transmissores e receptores de baixa complexidade operando com formato de modulação por Chaveamento Liga-Desliga

(OOK - *On-Off Keying*) em distâncias de até 20 km e suportando até 64 clientes conectados [1]. Estas redes utilizam comunicação em *broadcast* para a transmissão em *downstream* e em rajadas para a transmissão em *upstream*, ambas multiplexadas no tempo. De modo semelhante, a padronização de sistemas de acesso 50G-PON, uma evolução mais recente dos atuais sistemas XGS-PON, mantém o mesmo esquema de transmissão enquanto aumenta a taxa de símbolos para 50 Gbd, todavia requerendo componentes ópticos e eletrônicos com maior banda de operação [2].

No entanto, em um cenário marcado pelo desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas, demandando taxas ainda maiores de transmissão até o usuário final, o desenvolvimento de redes de acesso de maior capacidade, como as futuras 200G-PON, enfrenta desafios significativos. Dentre eles, para manter a arquitetura e topologia das atuais redes PON, os requisitos de largura de banda para os componentes eletrônicos e optoeletrônicos se tornam proibitivos, ao mesmo tempo em que as penalidades do sistema tornam-se mais relevantes devido a taxas de símbolos mais elevadas, aumentando sua complexidade ao exigir uma cadeia de Processamento Digital de Sinais (DSP - *Digital Signal Processing*) para sua mitigação. Ecoando dificuldades semelhantes encontradas quando as redes de transporte óptico exigiram taxas de bits superiores a 10 Gb/s, várias abordagens têm sido propostas para contornar estas limitações de largura de banda. Muitas destas soluções focam em redes ópticas passivas com multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM-PON - *Wavelength Division Multiplexing PON*), com esquemas para aumentar a capacidade da rede óptica através do emprego de múltiplos comprimentos de onda para transmissão, mantendo as taxas de símbolos mais baixas. Outras focam no aumento da eficiência espectral através do emprego de formatos de modulação de ordem superior, particularmente através da implementação de redes PON Coerentes (CPON - *Coherent PON*), elevando as taxas de bits sem aumentar excessivamente as taxas de símbolos. Além disso, os sistemas CPON possuem muitas características vantajosas que podem ser aproveitadas em redes de acesso. Sua maior sensibilidade é adequada para permitir um alcance estendido e suportar um número maior de clientes por Terminal de Linha Óptica (OLT - *Optical Line Terminal*), enquanto sua flexibilidade na transmissão

Os autores podem ser contatados através do email: eduardor@cpqd.com.br. Este trabalho foi financiado pelos os órgãos FUNTTEL/Finep (auxílio 0943/23) e CNPq (bolsas 305559/2026-5 e 300726/2025-2). Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório Integrador Sisfoton-MCTI (auxílio CNPq 440220/2021-1).

de diferentes formatos de modulação adiciona outro grau de liberdade na definição de taxas de bits específicas para diferentes clientes, permitindo maior flexibilidade na operação da rede.

Contudo, além de atender aos requisitos funcionais de distância de operação, taxa de bits e número de clientes conectados por OLT, os sistemas de acesso têm requisitos muito estritos quanto ao custo e ao consumo de energia dos equipamentos, em particular das Unidades de Rede Óptica (ONU – *Optical Network Unit*) localizadas nos clientes. Neste sentido, transceptores coerentes convencionais, como os utilizados em redes de transporte, são excessivamente custosos, em especial pelo extenso uso de DSP para recuperar os dados transmitidos. Isso tem motivado muitos estudos propondo esquemas coerentes simplificados, com diferentes compromissos entre complexidade e desempenho [3–6]. De modo fortuito, algumas características das redes de acesso, tais como sua distância de operação reduzida e a operação particionada no tempo das ONUs, permitem simplificações no DSP, enquanto o desempenho sistêmico se mantém aceitável.

Dentre as possíveis simplificações do processamento digital no receptor da ONU, exploramos neste trabalho uma abordagem de equalização que dispensa a atualização dinâmica dos coeficientes do equalizador, mantendo seus coeficientes fixos nos valores inicialmente estimados com o uso do preâmbulo. Avaliamos o impacto dessa simplificação na taxa de erro de bit de sinais transmitidos em uma rede de acesso simulada, incluindo rotações no Estado de Polarização (SoP – *State of Polarization*), que é responsável pelas principais variações temporais de canal na fibra óptica. Analisamos também o papel que o tamanho do quadro de dados tem na resiliência do sistema sem equalização dinâmica submetido a rotações no SoP.

II. SoP E DSP

Os sistemas ópticos possuem canais de propagação razoavelmente estáticos. A principal variação temporal do canal óptico é relacionada com rotações aleatórias no SoP, em geral causadas por deslocamentos ou vibrações mecânicas na fibra óptica. Em enlaces de longa distância estas variações podem causar mudanças no estado de polarização de várias dezenas de krad/s [7], ou em casos extremos, como o de descargas atmosféricas em cabos OPGW (*Optical Ground Wire*), podem chegar a alguns Mrad/s [8]. Estas variações motivam o uso de equalizadores dinâmicos operando em tempo integral nos receptores coerentes em sistemas de transporte, onde estes cenários são factíveis. No entanto, sistemas de curto alcance, como redes de acesso, estão menos sujeitos a tais variações e tipicamente exibem variações de SoP em valores inferiores a 1 krad/s [9].

Adicionalmente, as redes de acesso operam com sinais intermitentes, transmitindo quadros de dados de tamanho variável, ao contrário dos sinais contínuos das redes de transporte. Consequentemente, o processo de equalização de canal em uma rede de acesso pode se ater apenas às variações de canal que ocorram dentro do tempo de um único quadro, limitando o efeito que as variações de SoP podem causar

sobre o sinal. Quadros típicos em sistemas de acesso têm até algumas dezenas de milhares de símbolos, embora os documentos de padronização indiquem que estes quadros possam ser maiores [2, 3].

Considerando o acima exposto, é factível a adoção de um esquema de equalização estático, após a estimativa de canal inicial por meio do preâmbulo, removendo a necessidade do cálculo adaptativo dos coeficientes do equalizador, reduzindo a complexidade do receptor. Esta redução é particularmente importante na ONU, uma vez que, embora consideremos que a ONU recebe sinais continuamente, já que a comunicação em *downstream* é em *broadcast*, é possível operar o DSP como se o dado fosse enviado em rajadas, ativando o processamento apenas quando a ONU identificar, através do preâmbulo, que um quadro específico é destinado a ela. As seções seguintes descrevem o cenário de simulação e os resultados do esquema proposto, para diferentes tamanhos de quadro e velocidades de rotação do SoP.

III. CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

A Figura 1 representa a configuração do sistema de simulação para a transmissão de *downstream* de 200 Gb/s sobre um enlace CPON com 256 clientes. A simulação deste sistema foi realizada utilizando um simulador óptico próprio desenvolvido em Python. O ambiente de simulação abrange desde os modelos de transmissores e receptores coerentes até a propagação no canal, modelada pelo método *Split-Step Fourier*, com a adição dos efeitos de ruído de rotação de polarização. Para o *downstream*, o transmissor começa com a estrutura de processamento digital detalhada na Figura 2(a). O DSP consiste em um mapeador digital para codificar os dados transmitidos no formato de modulação de amplitude em quadratura com 16 símbolos e multiplexação em polarização (DP-16QAM – *Dual Polarization 16-ary Quadrature Amplitude Modulation*), uma inserção de símbolos piloto com *overhead* de 3,125%, um interpolador *upsampler* para aumentar a taxa de amostragem para duas amostras por símbolo e, finalmente, um bloco de inserção de preâmbulo para anexar uma sequência de preâmbulo de 1024 amostras a cada rajada de dados. Em seguida, quatro Conversores Digital-Analógicos (DAC – *Digital to Analog Converter*) com resolução de 8 bits e largura de banda de 3 dB de 16 GHz convertem as amostras digitais em quatro sinais analógicos. Cada sinal é amplificado por um amplificador linear com largura de banda de 3 dB de 35 GHz e usado para alimentar um modulador eletro-óptico em fase e quadratura de dupla polarização (DP-IQM – *Dual Polarization In-phase Quadrature Modulator*) com largura de banda de 3-dB de 29 GHz. A fonte de luz é um laser com potência de saída de 3 dBm e largura de linha de 100 kHz.

A rede óptica passiva é composta por um embaralhador de polarização (PS – *Polarization Scrambler*) para inserir uma rotação de polarização com velocidade variável, um divisor óptico 1:256 e um segmento de fibra monomodo padrão (SSMF – *Standard Single-mode Fiber*) com atenuação de 0,2 dB/km e um parâmetro de dispersão de 16,5 ps/(km.nm). O receptor, localizado no lado da ONU, consiste em um

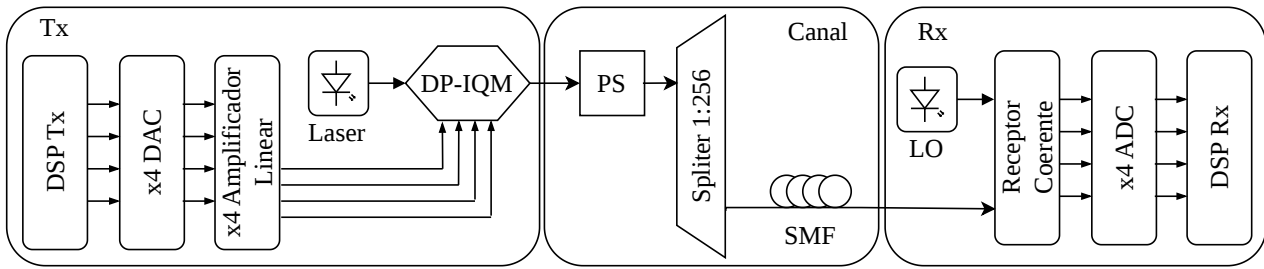


Fig. 1. Cenário de simulação CPON com taxa de 222 Gb/s CPON *downstream* com 256 clientes. O transmissor representa a OLT, enquanto o receptor representa a ONU.

receptor coerente óptico de dupla polarização que utiliza um laser oscilador local com potência óptica de 3 dBm e largura de linha de 100 kHz, com um desvio de frequência de 1 GHz em relação à frequência do transmissor. Em seguida, quatro fotodetectores balanceados com largura de banda de 3 dB de 40 GHz, ruído balístico e ruído térmico a 300 K convertem as ondas ópticas em sinais elétricos analógicos, que são amostrados a duas amostras por símbolo por quatro Conversores Analógico-Digitais (ADCs) de 8 bits com largura de banda de 3 dB de 16 GHz.

Finalmente, o processamento digital de sinais no receptor, conforme ilustrado na Figura 2(b), começa pela identificação do préambulo, que cumpre diversas funções. Inicialmente o préambulo indica para qual ONU é o quadro de símbolos recebido, acionando os demais blocos de processamento do receptor digital. Na sequência, os dados recebidos, incluindo o préambulo, passam pela equalização da dispersão cromática (CD - *Chromatic Dispersion*) usando um equalizador no domínio da frequência com 128 coeficientes fixos e

sobreposição de 50%. Após a mitigação da CD, o préambulo é processado para recuperar o estado atual do canal, incluindo o SoP, estimar o desvio de frequência e indicar o exato início do quadro de dados, momento no qual o préambulo é removido do sinal. Em seguida, o DSP usa as informações extraídas do préambulo para realizar uma demultiplexação de polarização e equalização de canal com um filtro MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) 2×2 com 8 coeficientes temporais estáticos, em um processo que também realiza a subamostragem (*downsampling*) do sinal para uma amostra por símbolo. No final da estrutura do DSP, ocorre a correção do desvio de frequência, seguida por uma estimação de fase auxiliada por pilotos, recuperando os símbolos transmitidos. Após a remoção dos pilotos, procedemos com a avaliação da Taxa de Erro de Bit (BER - *Bit Error Rate*). Para todas as simulações, consideramos que os dados são codificados usando um algoritmo de Correção de Erros Direta por Decisão Rígida (HD-FEC - *Hard Decision Forward Error Correction*) com *overhead* de 7% e um limite de FEC de $4,3 \times 10^{-3}$. Além disso, há o já mencionado *overhead* de 3,125% para símbolos piloto, com o préambulo impondo um *overhead* adicional de 0,6%. Considerando tais fatores, a taxa de bits bruta é de 222 Gb/s, correspondendo a uma taxa de símbolos de 27,7 GBd para DP-16QAM.

IV. RESULTADOS

A Figura 3 mostra a taxa de erro de bit de simulação para uma distância de 20 km com velocidade de rotação de polarização de 0 a 50 krad/s, para quadros transmitidos de 80.000, 160.000 e 240.000 símbolos. Para todos os tamanhos de quadro, a taxa de erro de bit fica em torno de 1×10^{-6} em situações de baixa velocidade de rotação de polarização. No caso do quadro com 80.000 símbolos, a taxa de erro aumenta de forma razoavelmente regular à medida que aumentamos a velocidade de rotação, até atingir cerca de 1×10^{-4} para 50 krad/s, permanecendo, portanto, abaixo do limite do FEC em todos os valores de rotação. Para as simulações com quadros maiores a degradação da BER foi mais pronunciada, de forma que a taxa de erro de bit ultrapassou o limite do FEC para rotação de cerca de 21 krad/s para quadros de 240.000 símbolos e 26 krad/s para 160.000 símbolos.

Observamos resultados similares para as simulações com distância de 40 km, como mostrado pela Figura 4. Neste caso

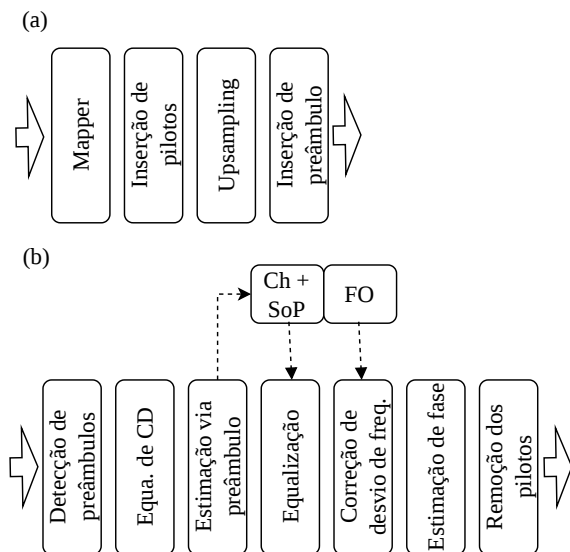


Fig. 2. Cadeia de processamento digital de sinais do (a) transmissor e (b) receptor.

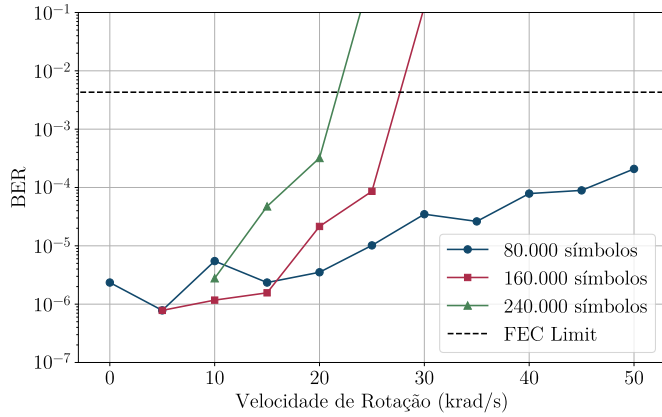


Fig. 3. Resultados de simulação para CPON *downstream* com taxa de bits líquida de 200 Gb/s utilizando formato DP-16QAM, em uma rede com 256 clientes e distância de 20 km. BER em função da velocidade de rotação de polarização, para diferentes comprimentos de quadro.

a BER para baixas velocidades de rotação ficou em torno de 1×10^{-5} para todos os tamanhos de quadro. Para quadros de 80.000 símbolos a BER máxima ficou pouco abaixo de 1×10^{-3} , enquanto que as máximas rotações com taxa de erro abaixo do limite do FEC se mantiveram em 21 krad/s para quadros de 240.000 símbolos e 26 krad/s para 160.000 símbolos.

No caso das simulações com distância de 80 km a BER para baixas velocidades de rotação de polarização já se encontra próxima do limite do FEC, uma vez que esta é aproximadamente a distância máxima que conseguimos alcançar com esta arquitetura de sistema considerando todas as limitações do enlace simulado. Mesmo assim, quando utilizamos o quadro com 80.000 símbolos, a degradação da taxa de erro de bit em função da velocidade de rotação ocorre de forma suave, alcançando o limite do FEC apenas com rotações acima de 40 krad/s. Mesmo para quadros com comprimentos maiores e degradação mais acentuada, o limite do FEC é violado em torno de 17 krad/s com quadro de 240.000 símbolos e 24 krad/s com quadro de 160.000

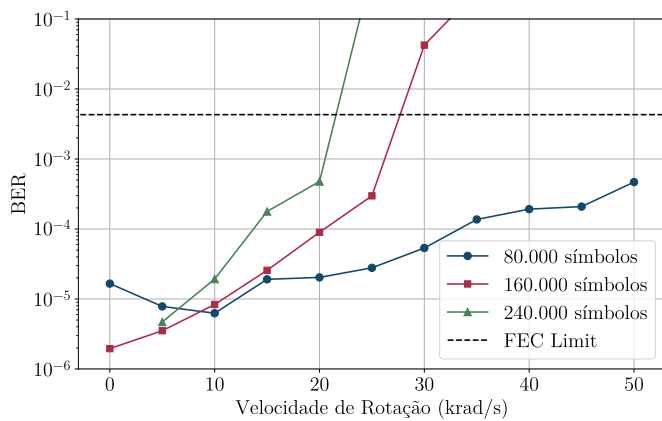


Fig. 4. Resultados de simulação para CPON *downstream* com taxa de bits líquida de 200 Gb/s utilizando formato DP-16QAM, em uma rede com 256 clientes e distância de 40 km. BER em função da velocidade de rotação de polarização.

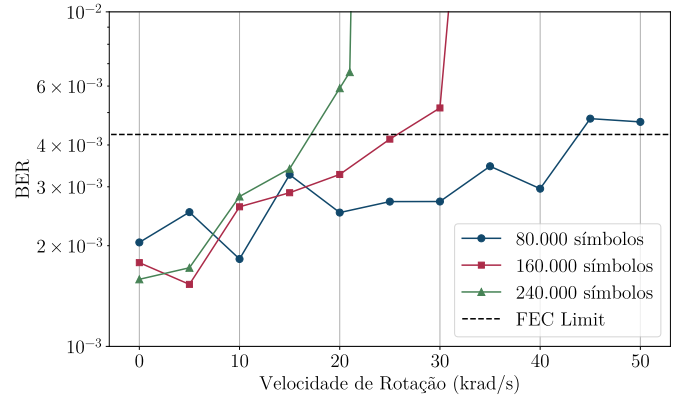


Fig. 5. Resultados de simulação para CPON *downstream* com taxa de bits líquida de 200 Gb/s utilizando formato DP-16QAM, em uma rede com 256 clientes e distância de 80 km. BER em função da velocidade de rotação de polarização.

símbolos.

De forma geral, os resultados obtidos nas simulações demonstram que a equalização estática é uma abordagem viável para sistemas CPON em redes de acesso, mesmo considerando os cenários de maior distância e quadros mais longos. Em todos os casos avaliados, as velocidades de rotação do SoP que levaram à violação do limite do FEC ficaram muito acima do valor de 1 krad/s tipicamente observado em sistemas de curta distância [9], indicando que as variações de canal esperadas em redes de acesso reais não devem ser um limitante para o funcionamento do esquema proposto. Mesmo no cenário mais desfavorável, correspondente a um enlace de 80 km com quadros de 240.000 símbolos, o limite do FEC só foi atingido a partir de 17 krad/s, valor aproximadamente 17 vezes superior ao máximo esperado neste tipo de rede. Estes resultados sustentam a adoção de equalizadores estáticos nos receptores digitais de ONUs em sistemas CPON como uma opção viável para a arquitetura da cadeia de processamento digital de sinais, permitindo a redução da complexidade de hardware e consumo de energia destes equipamentos.

V. CONCLUSÕES

Os resultados de simulação indicam que para tamanhos típicos de quadros de dados, com comprimento inferior a 80.000 símbolos, as variações de estado de polarização causam penalidades que não comprometem o funcionamento de sistemas CPON em redes de acesso com 20 km, 40 km ou 80 km, sendo limitado no caso da maior distância à velocidades de rotação do SoP de até 40 krad/s, enquanto que em distâncias menores a taxa de erro de bits ficou abaixo do limite do FEC para todas as velocidades avaliadas, com máximo em 50 krad/s. Com o uso de quadros maiores, e considerando a transmissão em enlaces de 80 km, a variação do SoP limita a operação do sistema apenas a valores elevados, de 17 krad/s com quadro de 240.000 símbolos e 24 krad/s com quadro de 160.000 símbolos, valores que, embora plausíveis em sistemas de transporte, são muito maiores que os habitualmente observados em sistemas de curta distância. Estes resultados abrem caminho para a adoção de

equalizadores estáticos nos receptores digitais CPON, com principal impacto na redução de complexidade e consumo de energia no receptor das ONUs.

REFERÊNCIAS

- [1] International Telecommunication Union (ITU-T) - Standardization Sector, "G.9807.1: 10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)," ITU-T, Tech. Rep., 2023.
- [2] International Telecommunication Union (ITU-T) - Standardization Sector, "G.9804.3: 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification," ITU-T, Tech. Rep., 2021.
- [3] J. Zhang, Z. Jia, M. Xu, H. Zhang, and L. Alberto Campos, "Efficient preamble design and digital signal processing in upstream burst-mode detection of 100G TDM coherent-PON," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 13, no. 2, 2021.
- [4] Y. Sun, H. Jiang, L. Yi, W. Hu, and Q. Zhuge, "Preamble Design for Joint Frame Synchronization, Frequency Offset Estimation and Channel Estimation in Burst Mode Coherent PONs," in *2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2024, pp. 1–3.
- [5] G. Li, A. Yan, S. Xing, Z. Li, W. Shen, J. Wang, J. Zhang, and N. Chi, "Pilot-Aided Continuous Digital Signal Processing for Multi-format Flexible Coherent TDM-PON in Downstream," in *2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2023.
- [6] A. Yan, G. Li, S. Xing, Y. Hu, W. Shen, J. Zhao, Z. Li, C. Shen, J. Shi, N. Chi, and J. Zhang, "Hybrid, Multi-Format, Flexible-Rate Coherent PON Supporting Ultimate-Simplified Coherent and Full-coherent Receivers with Compatible OLT in Downstream," in *2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, 2024, pp. 1–3.
- [7] L. E. Nelson, M. Birk, S. L. Woodward, and P. Magill, "Field measurements of polarization transients on a long-haul terrestrial link," in *IEEE Photonic Society 24th Annual Meeting*, 2011, pp. 833–834.
- [8] T. Brugière, T. H. Crawford, A. Mortelette, M. J. Tanoh, M. Reimer, M. O'Sullivan, D. Doucet, C. Tremblay, D. L. Peterson, T. J. Xia, G. A. Wellbrock, and M. P. Bélanger, "Polarization Activity Monitoring of an Aerial Fiber Link in a Live Network," in *Optical Fiber Communication Conference*. Optica Publishing Group, 2016, p. Tu3G.3. [Online]. Available: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2016-Tu3G.3>
- [9] A. Nespola, G. Franco, F. Forghieri, M. Traverso, S. Anderson, M. Webster, and R. Gaudino, "Proof of Concept of Polarization-Multiplexed PAM Using a Compact Si-Ph Device," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 31, no. 1, pp. 62–65, 2019.