

Sistema RoF/BS-ILC utilizando um Transmissor de Múltiplos Comprimentos de Onda Baseado em Óptica Integrada

Matheus Seda Borsato Cunha, Eduardo Saia Lima, Nicola Andriolli, Danilo Henrique Spadoti, Felipe Bizerra Fideles, Giampiero Contestabile, Juliano Oliveira, Evandro Conforti e Arismar Cerqueira S. Jr.

Resumo— Este trabalho relata a transmissão RoF seguido por um enlace baseado em comunicação por luz infravermelha com feixe direcionado (BS-ILC), que utiliza a tecnologia de óptica em espaço livre (FSO). O transmissor é baseado em óptica integrada. No sistema RoF/BS-ILC proposto, um sinal M-QAM foi transmitido por um *fronthaul* óptico de 12,5 km, seguido por um enlace de acesso FSO de 1,5 m. O desempenho do sistema foi avaliado em termos do EVM_{RMS} , em função da vazão para diferentes ordens de modulação. Os resultados demonstram a possibilidade de alcançar uma vazão total de 5,12 Gbit/s utilizando os oito canais disponíveis.

Palavras-Chave— 5G, 6G, BS-ILC, circuitos fotônicos integrados e RoF.

Abstract— This work reports the RoF transmission followed by a link based on beam steered-infrared light communication (BS-ILC), which uses free space optics (FSO) technology and a photonic integrated transmitter. In the proposed RoF/BS-ILC system, an M-QAM signal was transmitted over a 12.5 km optical fronthaul, followed by a 1.5 m FSO access link. The system performance was evaluated in terms of the EVM_{RMS} as a function of the throughput for different modulation orders. The results demonstrate the possibility of achieving a total throughput of 5.12 Gbit/s using the eight available channels.

Keywords— 5G, 6G, BS-ILC, Photonic integrated circuits (PICs) and RoF.

I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e padronização dos sistemas de comunicação sem fio de quinta geração (5G) e as recentes pesquisas sobre os sistemas de comunicação sem fio de sexta geração (6G) têm promovido avanços significativos nas áreas de informação e comunicação [1]. Particularmente, o 5G tem, como principais cenários, a banda larga móvel aprimorada (eMBB - *enhanced mobile broadband*), as comunicações massivas entre máquina (mMTC - *massive machine type communications*) e as comunicações de baixa latência

e ultra confiáveis (URLLC - *ultra-reliable and low latency communications*) [2]. Além destes, o cenário de comunicações aprimoradas em áreas remotas (eRAC - *enhanced remote areas communications*) também foi considerado potencial para ser incluído nos próximos lançamentos do 3rd *Generation Partnership Project* (3GPP), voltados para áreas remotas e de longo alcance [3]. Paralelamente, as redes 6G, previstas para 2030, contemplam serviços em qualquer lugar de forma integrada, com conectividade sem fio, serviços e aplicativos inteligentes. Além disso, as aplicações emergentes na área de inteligência artificial (IA), robótica, indústria 4.0 e Internet de tudo (IoE - *Internet of everything*) irão proporcionar um aumento extremamente elevado dos dados gerados por dispositivos móveis, tornando a operabilidade dos sistemas sem fio cada vez mais desafiadora [3], [4].

Adicionalmente, as redes de acesso de rádio (RANs - *radio access networks*) têm evoluído para suportar as demandas e recursos das redes 5G e além (B5G - *beyond 5G*). Nesse contexto, as tecnologias fotônicas têm sido consideradas potenciais para englobar as futuras redes, possibilitando maiores níveis de autonomia, além de combinar as vantagens dos sistemas ópticos e sem fio em uma única arquitetura [5], [6]. Particularmente, as soluções de rádio sobre fibra (RoF - *radio-over-fiber*) têm sido amplamente empregadas em arquiteturas RAN centralizadas (C-RAN - *centralized RAN*) para comunicação entre a central de operações (CO) e as unidades de rádio remotas (RRUs) por meio de enlaces de *fronthaul* baseados em fibra óptica [7]. Complementarmente, a tecnologia de comunicação óptica-sem fio (OWC - *optical wireless communication*), chamada óptica em espaço livre (FSO - *free-space optics*) [8], tem emergido como candidata promissora para a próxima geração de RANs com largura de banda na ordem de grandeza de GHz. Dentre as variações das OWCs que têm sido abordadas para cenários internos, podem ser destacadas a comunicação por luz visível (VLC - *visible light communication*) e a comunicação infravermelha, especificamente a comunicação de luz infravermelha com feixe direcionado (BS-ILC - *beam-steered infrared light communication*). Além disso, os circuitos integrados fotônicos (PICs - *photonic integrated circuits*) têm emergido como uma tecnologia chave para maior redução de custos e *footprint*, aumentando a vazão de dados do sistema [9].

Na literatura, transmissores fotônicos baseados em arranjos de lasers de modulação direta (DMLs - *directly modulated laser*) operando até 34 Gbit/s por canal foram relatados

Matheus Seda Borsato Cunha, Lab. WOCA/LabTel, Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)/Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Santa Rita do Sapucaí/Itajubá - MG, e-mail: matheusseda@gee.inatel.br; Eduardo Saia Lima e Arismar Cerqueira S. Jr., Lab. WOCA, INATEL, Santa Rita do Sapucaí - MG, e-mail: elima@get.inatel.br e arismar@inatel.br; Nicola Andriolli, *Institute of Electronics, Information Engineering and Telecommunications*, Conselho Nacional de Pesquisa, Pisa - Itália, e-mail: nicola.andriolli@ieiit.cnr.it; Danilo Henrique Spadoti, LabTel, UNIFEI, Itajubá - MG, e-mail:spadoti@unifei.edu.br; Felipe Bizerra Fideles e Juliano Oliveira, *Technology office, Idea! Electronic Systems*, Campinas-SP, e-mail: felipe.fideles@idea-ip.com e juliano.oliveira@idea-ip.com; Giampiero Contestabile, *TeCIP Institute, Escola Superior Sant'Anna*, Pisa - Italy, e-mail: contesta@sssip.it; Evandro Conforti, *DECOM, Universidade de Campinas (UNICAMP)*, Campinas-SP, e-mail: conforti@ieee.org.

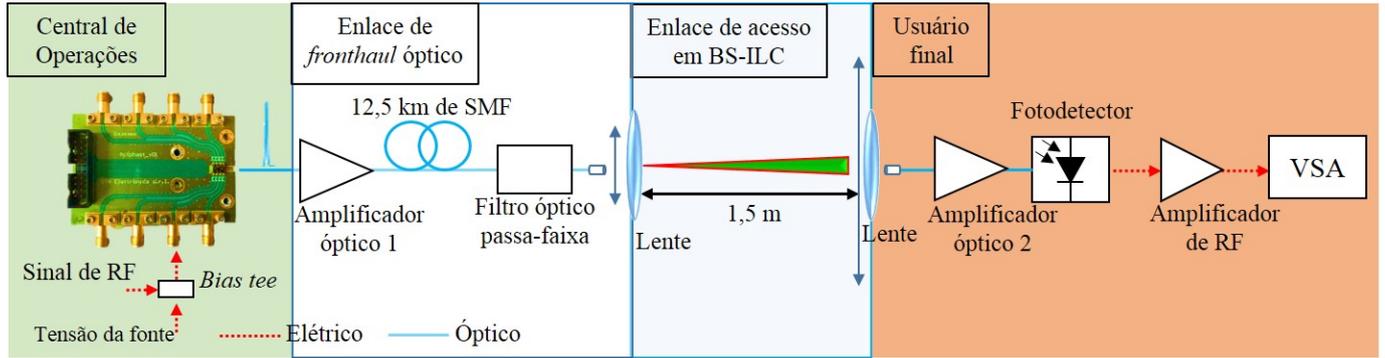


Fig. 1. Diagrama em blocos do sistema de RoF/FSO proposto baseado em BS-ILC.

em [10], [11]. Em [12], utilizando o transmissor de múltiplos comprimentos de onda (MWT – *multiwavelength transmitter*) integrado relatado em [11] foi implementado pela primeira vez um *fronthaul* móvel óptico com compartilhamento entre as tecnologias 4G e 5G. Os experimentos foram realizados por meio de dois cenários, sendo o primeiro cenário baseado em multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *wavelength division multiplexing*), transmitindo cada sinal de RF em uma portadora óptica diferente, e o segundo cenário baseado em multiplexação por subportadora (SCM – *subcarrier multiplexing*), combinado os sinais de RF no domínio elétrico e os transmitindo em um único laser. Validou-se uma taxa de transmissão máxima de 1,04 Gbit/s, usando dois sinais no padrão 5G NR e um sinal no padrão LTE, por meio de um de fibra óptica de 12,5 km. Em seguida, relatou-se, em [13], um sistema *fiber-wireless* (FiWi) utilizando novamente o MWT integrado para transmissão dos sinais no domínio óptico. Três sinais de RF foram transmitidos utilizando WDM por um enlace de RoF de 12,5 km de comprimento e propagados em enlaces sem fio em ambiente interno com alcance de 10 m e externo de 115 m. As taxas de transmissão máximas de 1,36 Gbit/s e 230 Mbit/s foram validadas experimentalmente, nos cenários de 10 m e 115 m, respectivamente. Por fim, em [14] foi proposto a implementação de *fronthaul* de fibra óptica seguido de um enlace FSO, caracterizando um sistema RoF/FSO, empregando o MWT integrado combinado com o uso da BS-ILC. Nesses experimentos foi realizada a transmissão de um sinal M-QAM um enlace de 12,5 km de fibra óptica monomodo seguido por um enlace em FSO de 1,5 m. O sistema de RoF/FSO alcançou uma taxa de bits máxima de 160 Mbit/s usando apenas 20 MHz de largura de banda.

Este trabalho apresenta de uma evolução dos resultados apresentados em [14], que consistiu em uma prova de conceito da operação do sistema RoF/BS-ILC baseado em óptica integrada. No presente trabalho, o MWT integrado é usado para geração da portadora óptica, o sinal de RF é transmitido em 550 MHz, nas modulações QPSK, 16-, 64- e 256-QAM, e foram testadas larguras de banda de transmissão de 20 a 200 MHz. O objetivo dessa abordagem é implementar uma arquitetura de redes visando ambientes internos, levando a comunicação a taxas de Gbit/s da CO até o dispositivo do usuário. O enlace de comunicação é formado por uma fibra monomodo (SMF – *single mode fiber*) de 12,5 km, seguido

por um enlace de acesso de BS-ILC de 1,5 m. A análise de desempenho foi conduzida em termos de magnitude vetorial de erro quadrático médio (EVM_{RMS} – *root mean square error vector magnitude*), de acordo com as especificações 3GPP *Release 15*, além de constelação e espectros medidos. O manuscrito está estruturado em quatro seções. A Seção II apresenta a descrição do sistema RoF/BS-ILC implementado. A Seção III relata os resultados experimentais, enquanto as conclusões e trabalhos futuros são descritos na Seção IV.

II. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ROF/BS-ILC

A Fig. 1 mostra o diagrama de blocos do sistema de RoF/BS-ILC, cujo objetivo foi apresentar a aplicabilidade de um sistema híbrido com possibilidade de atender as redes 5G e 6G em ambientes internos. Na central de operações, o MWT integrado, discutido e caracterizado em [12], foi utilizado para a geração e modulação das portadoras ópticas com o sinal de RF, por meio de modulação direta.

Primeiramente, transmitiu-se um sinal de RF com largura de banda de 20 MHz na frequência portadora de 550 MHz a fim de validar a arquitetura proposta. Os esquemas de modulação empregados foram o QPSK, 16-, 64- e 256-QAM, gerados por um gerador de formas de onda arbitrárias (AWG – *arbitrary waveform generator*) M9505A e um gerador de sinal vetorial N5172B, ambos da Keysight. A escolha da frequência portadora de RF em 550 MHz foi definida em uma região da resposta em frequência do MWT mais plana, que é obtida em frequências mais baixas, conforme apresentado em [12]. O sinal de RF foi ajustado com uma potência elétrica de 5 dBm e um conector de polarização em T (*bias-tee*) foi usado para unir o sinal de RF com a tensão de polarização para alimentar os DMLs através do conector SMA. A fonte de alimentação foi configurada para 5,4 V, gerando uma portadora óptica em torno de 1554 nm. O sinal na saída MWT foi lançado em um cordão óptico com uma potência óptica máxima de -20 dBm, com o auxílio de um micro-posicionador de 3 eixos, usado para melhorar o acoplamento à fibra e minimizar as atenuações causadas por desalinhamento e vibrações.

Um amplificador a fibra dopada com Érbio (EDFA – *Erbium-doped fiber amplifier*) foi usado para compensar as perdas de acoplamento, e do enlace SMF e do filtro óptico subsequentes, além de alcançar uma potência óptica de 10 dBm na saída do cordão óptico para a transmissão em

FSO. Posteriormente, o sinal óptico foi transmitido através de um *fronthaul* de SMF de 12,5 km e um filtro óptico sintonizável com largura de banda de 0,8 nm foi usado para eliminar parte do ruído de emissão espontânea amplificada (ASE - *amplified spontaneous emission*) inserida pelo EDFA antes de emitir o sinal no ar. Após o filtro, o cordão óptico de saída foi posicionado para emitir o feixe infravermelho no centro de uma lente plano-convexa com distância focal de 25,4 mm e diâmetro de 25,4 mm para realizar a transmissão em um enlace de acesso BS-ILC de 1,5 m. Vale ressaltar que o deslocamento mecânico do ponto de incidência do feixe na lente possibilita o direcionamento do feixe para alguma outra posição na recepção, resultando em uma área de cobertura específica.

No usuário final, uma lente semelhante à utilizada na transmissão foi empregada para focalizar e re-acoplar o feixe em fibra com potência óptica medida de -12 dBm. A perda de 22 dB se deve ao enlace FSO, pois o alinhamento foi realizado de forma manual para acoplar o feixe óptico. Dessa forma, uma segunda amplificação óptica foi feita pelo Amplificador Óptico 2, proporcionando um ganho de 15 dB. O EDFA usado neste ponto da implementação, é um PIC da empresa “Idea! Electronic systems”. Um medidor de potência óptica foi empregado para monitorar a entrada do fotodetector e a potência recebida foi de aproximadamente 3 dBm. O fotodetector utilizado foi o dispositivo PIN InGaAs com largura de banda de 12,5 GHz. O sinal de RF fotodetectado foi amplificado em 45 dB usando uma cascata de amplificadores de RF, de modelo ZX60-83LN12+, antes da demodulação. Por fim, um analisador vetorial de sinais DSAV084A, da Keysight, foi utilizado para avaliar o sinal recebido, em função dos requisitos de EVM_{RMS} do 3GPP Release 15.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Como prova de conceito, implementou-se um *fronthaul* óptico de 12,5 km seguido de um enlace de acesso de 1,5 m baseado em BS-ILC, com o objetivo de chegar ao usuário final. A Fig. 2 apresenta as fotografias da montagem experimental, que estão de acordo com o diagrama de blocos descrito na Fig. 1. A Fig. 2 (a) mostra o lado da CO, incluindo o enlace

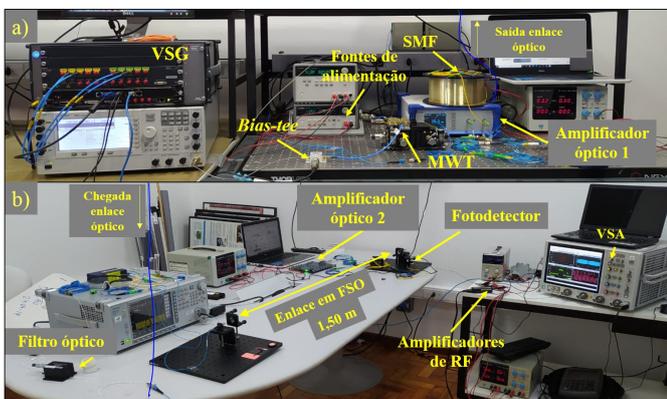


Fig. 2. Fotografias do arranjo experimental. (a) Central de operações, incluindo os transmissores de RF e óptico b) Enlace em FSO e lado da recepção.

de fibra óptica, os transmissores de RF e ópticos, enquanto a Fig. 2 (b) reporta o enlace FSO, a recepção e análise do sinal. O desempenho geral do sistema foi avaliado com base em medições EVM_{RMS} máximo do 3GPP Release 15, sendo 17,5%; 12,5%; 8%; 3,5% para as modulações QPSK, 16-, 64- e 256-QAM, respectivamente [15].

A primeira investigação do sistema foi realizada na saída da cadeia de amplificadores elétricos e consistiu em validar o funcionamento do sistema transmitindo um sinal de RF na frequência de 550 MHz, nas quatro ordens de modulação propostas com largura de faixa de 20 MHz. A Fig. 3 exibe a análise de desempenho do sistema em termos de constelação e espectro empregando QPSK, 16-, 64- e 256-QAM, com valores ótimos de EVM_{RMS} de 2,9%; 2,4%; 2,3% e 2,2%; respectivamente, para uma potência óptica recebida no fotodetector de -9 dBm. Pode-se distinguir os símbolos recebidos e observar que não há distorções de fase e magnitude perceptíveis em cada uma das transmissões. Além disso, os espectros medidos são planos e sem desvanecimento prejudicial, desta forma optou-se apenas por apresentar um único espectro.

Na segunda análise, avaliou-se o sinal transmitido em termos do EVM_{RMS} , mas em função da taxa de transmissão. A variação da taxa de transmissão foi feita através da alteração da

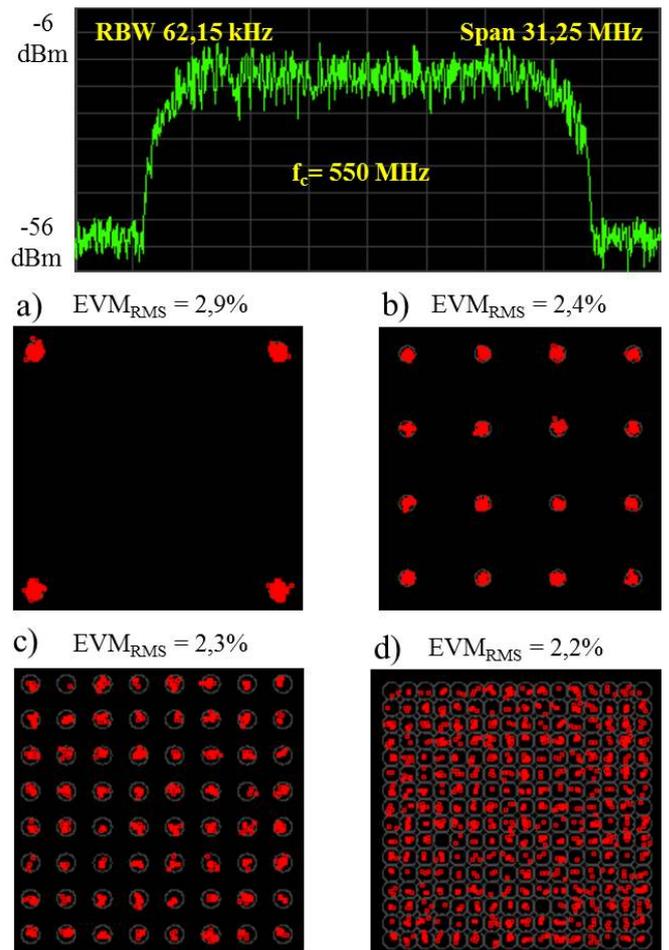


Fig. 3. Validação de desempenho do sistema em termos de constelação e espectro. (a) QPSK. (b) 16-QAM. (c) 64-QAM. (d) 256-QAM.

largura de faixa do sinal transmitido, a qual foi excursionada com valores entre 20 e 200 MHz. A Fig. 4 mostra as curvas de desempenho do comportamento do EVM_{RMS} com a variação da taxa de transmissão para cada uma das ordens de modulação configuradas. Nota-se que há uma degradação nos valores do EVM_{RMS} com o aumento da taxa de transmissão. Isso ocorre devido à alteração crescente da largura de faixa de transmissão, que causa uma diminuição na relação sinal-ruído (SNR - *signal-to-noise ratio*), dado que a potência de RF do sinal transmitido tenha sido mantida constante. Vale destacar que o aumento da ordem de modulação não necessariamente reflete no aumento da taxa de transmissão, pois é preciso sempre atentar-se aos limiares do EVM_{RMS} .

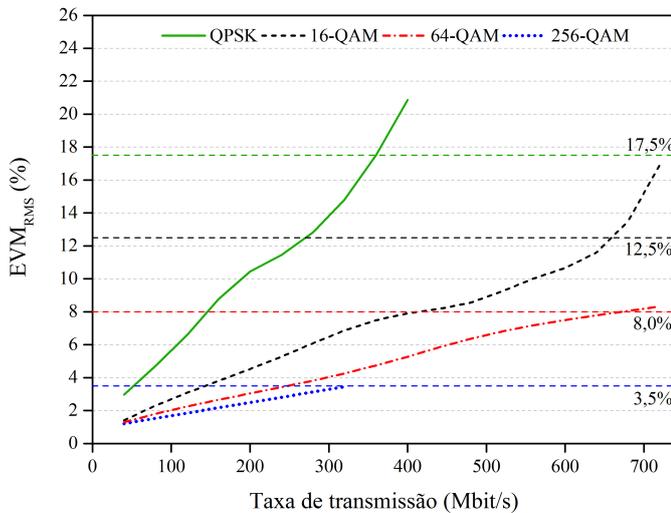


Fig. 4. Análise do desempenho do sistema RoF/BS-ILC em termos do EVM_{RMS} em função da taxa de transmissão.

A Tabela I resume os resultados obtidos empregando -9 dBm de potência óptica no fotodetector, abrangendo o esquema de modulação, a taxa de transmissão máxima por canal e a largura de faixa do sinal, e o valor EVM_{RMS} . No geral, a taxa de transmissão máxima alcançada foi de 640 Mbit/s com a ordem de modulação de 16-QAM. Considerando-se a capacidade do MWT, que possui 8 canais para transmissão, o sistema RoF/BS-ILC foi capaz atingir uma vazão total de 5,12 Gbit/s, demonstrando a viabilidade do sistema para integração do núcleo móvel com um usuário final, empregando a tecnologia FSO.

TABELA I

RESUMO DAS VAZÕES MÁXIMAS PARA CADA ORDEM DE MODULAÇÃO.

Ordem de Modulação	Largura de Faixa (MHz)	Taxa de Transmissão (Mbit/s)	EVM_{RMS}
QPSK	180	360	17,3%
16-QAM	160	640	12%
64-QAM	100	600	7,6%
256-QAM	40	320	3,4%

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma evolução dos resultados alcançados para o sistema RoF/BS-ILC proposto, o qual emprega

um transmissor de múltiplos comprimentos de onda baseado em óptica integrada. Além do transmissor, a segunda etapa de amplificação óptica foi realizada utilizando um PIC que demonstra a possibilidade do sistema transmitir um maior número de sinais com pequeno *footprint* e baixo custo. Nesse contexto, relatou-se a transmissão de um sinal M-QAM por um *fronthaul* de fibra óptica de 12,5 km, seguido por um enlace de acesso baseado em BS-ILC de 1,5 m. O desempenho do sistema foi avaliado e atendeu os requisitos de EVM_{RMS} definidos pelo 3GPP, visando a próxima geração de RANs com altas larguras de banda. Os testes foram realizados variando a largura de banda do sinal entre 20 e 200 MHz e, conseqüentemente, variando as taxas de transmissão, para diferentes ordens de modulação. Os resultados experimentais atingiram uma vazão máxima de 640 Mbit/s utilizando um único canal do transmissor de múltiplos comprimentos de onda, sendo possível alcançar uma vazão total de 5,12 Gbit/s utilizando os oito canais disponíveis simultaneamente. Os trabalhos futuros dizem respeito à transmissão do sinal 5G *new radio* (NR) usando o sistema RoF/BS-ILC, bem como avaliar a área de cobertura da implementação proposta.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01245.010604/2020-14, sob o projeto Sistemas de Comunicações Móveis de 6ª Geração (6G) do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil. Os autores também agradecem com o apoio financeiro da FAPESP 15/24517-8, além do CNPq, da CAPES, da FINEP e da FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] 3GPP, "5G; NR; Overall description; Stage-2," *TS 38.300 version 15.3.1 Release 15*, vol. 15.3.1, 2018.
- [2] S. Dang, O. Amin, B. Shihada, and M.-S. Alouini, "What should 6G be?" *Nature*, vol. 3, pp. 20–29, 01 2020.
- [3] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, 2014.
- [4] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
- [5] S. J. Nawaz, S. K. Sharma, S. Wyne, M. N. Patwary, and M. Asaduzaman, "Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 46 317–46 350, 2019.
- [6] D. Zhang, M. Matthé, L. L. Mendes, and G. Fettweis, "A study on the link level performance of advanced multicarrier waveforms under mimo wireless communication channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 4, pp. 2350–2365, 2017.
- [7] R. M. Borges, T. R. R. Marins, M. S. B. Cunha, H. R. D. Filgueiras, I. F. da Costa, R. N. da Silva, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, and A. C. Sodré, "Integration of a GFDM-based 5G transceiver in a GPON using radio over fiber technology," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4468–4477, 2018.
- [8] T. Koonen, "Indoor optical wireless systems: technology, trends, and applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 8, pp. 1459–1467, 2017.

- [9] M. Burla, D. A. I. Marpaung, L. Zhuang, M. R. Khan, A. Leinse, W. Becker, M. Hoekman, R. G. Heideman, and C. G. H. Roeloffzen, “Multiwavelength-Integrated Optical Beamformer Based on Wavelength Division Multiplexing for 2-D Phased Array Antennas,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 20, pp. 3509–3520, 2014.
- [10] N. Andriolli, F. Bontempi, and G. Contestabile, “Inp monolithically integrated transmitters based on high speed directly modulated dfb lasers,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 5, pp. 1–6, 2020.
- [11] N. Andriolli, P. Velha, M. Chiesa, A. Trifiletti, and G. Contestabile, “A Directly Modulated Multiwavelength Transmitter Monolithically Integrated on InP,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 24, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [12] M. S. B. Cunha, E. S. Lima, N. Andriolli, D. H. Spadoti, G. Contestabile, and A. Cerqueira, “5G NR RoF System Based on a Monolithically Integrated Multi-Wavelength Transmitter,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 27, no. 2, pp. 1–8, 2021.
- [13] M. S. B. Cunha, E. S. Lima, N. Andriolli, D. H. Spadoti, G. Contestabile, and A. Cerqueira S., “Non-Standalone 5G NR FiWi System Based on a Photonic Integrated Multi-Wavelength Transmitter,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 1001–1004, 2021.
- [14] M. S. B. Cunha, E. S. Lima, N. Andriolli, D. H. Spadoti, F. B. Fidèles, G. Contestabile, J. Oliveira, and A. C. S., “RoF/FSO System Based on a Monolithically Integrated Multi-Wavelength Transmitter,” in *2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)*, 2021, pp. 1–4.
- [15] 3GPP, “5G; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies,” *3GPP TR 38.913 Release 14*, vol. 14.2.0, 2017.