

# Coexistência entre 5G NR e LTE-A em Sistemas *Fiber/Wireless*

C. H. S. Lopes, L. A. M. Pereira e Arismar Cerqueira S. Jr.

**Resumo**— Este trabalho apresenta uma análise experimental da coexistência entre os sinais 5G NR (5G New Radio) e LTE-A (Long-Term Evolution Advanced) em sistemas FiWi (Fiber/Wireless). O sistema proposto é composto por uma unidade central 4G/5G, um *fronthaul* móvel óptico de 12,5 km e uma unidade de rádio remota (RRU – Remote Radio Unit). As análises de desempenho foram realizadas em função da magnitude do erro vetorial médio (EVM<sub>RMS</sub>-Error Vector Magnitude) para sinais com largura de faixa de 20 MHz e modulação 16- e 64-QAM. Resultados experimentais comprovam que as tecnologias podem coexistir pacificamente utilizando a mesma infraestrutura de rede.

**Palavras-Chave**—5G NR; coexistência; FiWi; *fronthaul* móvel; LTE-A.

**Abstract**— This work presents an experimental analysis of the coexistence between 5G NR (5G New Radio) and LTE-A (Long-Term Evolution Advanced) signals in FiWi (Fiber / Wireless) systems. The proposed system consists of a central 4G / 5G unit, a 12.5 km optical mobile *fronthaul* and a remote radio unit (RRU). Performance analyzes were performed according to the magnitude of the mean vector error (EVM<sub>RMS</sub>) for signals with a bandwidth of 20 MHz and modulation 16- and 64-QAM. Experimental results show that technologies can peacefully coexist using the same network infrastructure.

**Keywords**—5G NR; coexistence; FiWi; mobile *fronthaul*; LTE-A.

## I. INTRODUÇÃO

A quinta geração das comunicações móveis (5G) foi planejada para suprir as demandas que os atuais sistemas móveis de quarta geração (4G), com tecnologia *Long-Term Evolution Advanced* (LTE-A) não conseguem [1]. Espera-se que o 5G ofereça melhorias significativas em termos de capacidade, flexibilidade, eficiência energética e latência de ponta a ponta [2]. Os principais cenários que o 5G visa atender, de acordo com os padrões da união internacional de telecomunicações (ITU – *International Telecommunication Union*), incluem: comunicação massiva do tipo máquina (mMTC – *Massive Machine Type Communication*); banda larga móvel aprimorada (eMBB – *Enhanced Mobile Broadband*) e comunicação ultra confiável de baixa latência (URLLC – *Ultra-Reliable Low-Latency Communication*) [3]. Além disso, as comunicações em áreas remotas aprimoradas (eRAC - *Enhanced Remote Area Communication*) receberam atenção considerável nos últimos anos [4]. Uma chave para o sucesso do 5G é a utilização do espectro de maneira eficiente e a utilização de faixas espectrais adicionais, principalmente em ondas milimétricas [1]. O órgão padronizador 3GPP (3rd Generation Partnership Project)

definiu as seguintes faixas de frequências para implementações de sistemas 5G [5]: abaixo de 7,125 GHz (FR1 - *Frequency Range 1*) e acima de 24 GHz (FR2 – *Frequency Range 2*).

Os sistemas 5G deverão operar simultaneamente com os sistemas de comunicações legadas, como por exemplo o padrão LTE-A. Por isso, diversos grupos de pesquisa defendem o desenvolvimento de redes 5G compatíveis com redes LTE-A. O 3GPP especificou em dezembro de 2017 o modelo de operação NSA (*non-standalone*), o que representa um importante avanço para incorporar o 5G em redes LTE-A. Portanto, torna-se necessária a avaliação da coexistência entre sinais 4G e 5G, visando o compartilhamento da infraestrutura de rede para transporte e transmissão de sinais de radiofrequência (RF) [6].

A arquitetura de rede de acesso centralizada (C-RAN – *Centralized Radio Access Network*) divide as funcionalidades de rede entre a unidade de banda base (BBU – *Baseband Unit*) e a unidade de rádio remota (RRU – *Remote Radio Unit*) [7]. As unidades de banda base centralizadas realizam o processamento dos sinais em um local comum, enquanto as RRUs realizam o processamento das funções de rádio com menor consumo de energia no local da antena. Tal estratégia requer que as unidades BBU e RRU estejam conectadas por uma rede com elevada vazão de dados, baixa latência e com sincronismo preciso, conhecida como *fronthaul* [8]. Estes pré-requisitos tornam a fibra óptica uma opção atrativa para conectar BBUs e RRUs, visto que possibilita transportar sinais analógicos e/ou digitais, resultando em diferentes esquemas de *fronthaul* móvel [9]. O objetivo da utilização deste tipo de arquitetura é simplificar, centralizando as unidades de processamento de sinais e distribuir as unidades remotas de rádio, tendo em vista a redução de custos de capital (CAPEX – *Capital Expenditure*) e operacional (OPEX – *Operating Expenditure*) para os operadores de telefonia móvel [10].

Nesse contexto, a fotônica de microondas (MWP – *Microwave Photonics*) desempenha um papel importante na integração de sistemas de fibra sem fio (FiWi – *Fiber/Wireless*) para atender as redes 5G. O uso de MWP possibilita gerar, processar e transmitir sinais de RF, aproveitando os benefícios da comunicação sem fio e óptica em um sistema integrado [11]. Particularmente a solução de rádio sobre fibra (RoF – *Radio Over Fiber*) é utilizada para transportar sinais analógicos ou digitais no *fronthaul* óptico usando técnicas de rádio analógico sobre fibra (A-ROF – *Analog Radio over Fiber*) ou rádio digital sobre fibra (D-ROF – *Digital Radio over Fiber*), respectivamente [12]. Atualmente setores da indústria e da academia estudam a utilização de A-RoF para redes 5G, tendo em vista que o padrão de interface de rádio pública comum (CPRI – *Common Public Radio Interface*), amplamente empregada nos sistemas de *fronthaul* para D-RoF, apresentam problemas de escalabilidade. Portanto, a solução A-RoF tem sido considerada atraente, por apresentar melhorias na eficiência espectral e a simplificação da unidade remota [13, 14].

C. H. S. Lopes, L. A. M. Pereira e Arismar Cerqueira S. Jr. Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, MG 37400-000 Brasil (e-mails: celso.lopes@mtel.inatel.br; luiz\_augusto@get.inatel.br; arismar@inatel.br). Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01250.075413/2018-04, sob o projeto Centro de Referência de Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil.

O estado da arte em soluções de *fronthaul* baseadas em RoF para redes 5G inclui a distribuição de formas de ondas candidatas para o 5G [15, 16], transmissão RoF auxiliada por processamento digital de sinais (DSP – *Digital Signal Processing*) [17] e transmissão simultânea de sinais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*) e UF-OFDM (*Universal-Filtered OFDM*) utilizando frequências intermediárias em *fronthauls* óptico [8]. Particularmente, nosso grupo de pesquisa propôs a integração de um transceptor 5G em uma rede óptica passiva com capacidade da ordem de Gbps (GPON – *Gigabit Passive Optical Network*) para aproveitar a capilaridade da rede para distribuição de sinais 5G [19]. Além disso, relatamos recentemente a implantação de um *fronthaul* sem fio múltiplas bandas auxiliadas, por um meio de transporte óptico [20] e um sistema 5G FiWi baseado em forma de onda flexível e processamento digital de sinais para múltiplas aplicações [21].

Neste trabalho propõe-se a implementação de um *fronthaul* óptico móvel C-RAN, aplicados a sistemas FiWi para transmissão de sinais LTE-A e 5G NR (5G *New Radio*), utilizando a mesma infraestrutura de rede. O principal objetivo é atender sites remotos na faixa de 700 MHz simultaneamente com os padrões LTE-A e 5G. Contribuições adicionais referem-se à investigação do espaçamento de frequência mínimo necessário entre as portadoras dos sinais LTE-A e 5G NR, que permita que os sinais coexistam. A Seção II descreve o arranjo experimental do sistema proposto. A Seção III apresenta os resultados da investigação de desempenho digital em termos de magnitude de erro vetorial médio  $EVM_{RMS}$ . Por fim, as conclusões e comentários finais são apresentadas na Seção IV.

## II. ARQUITETURA PROPOSTA

Os sinais LTE-A e 5G NR apresentam configurações físicas de canal semelhantes, incluindo a sincronização primária (P-SS - *Primary Synchronization Signal*), sinal de sincronização secundária (S-SS - *Secondary Synchronization Signal*), canal físico de transmissão (PBCH - *Physical Broadcast Channel*), referência de demodulação (DMRS - *Demodulation Reference Signal*), canal compartilhado de dados físicos (PDSCH - *Physical Downlink Shared Channel*) e PDSCH DMRS. Diferentes formatos de modulação são utilizados para os canais de dados e controle. Por exemplo, sinais de dados com modulação de amplitude em quadratura (*quadrature amplitude modulation*) com 64 símbolos (64-QAM): a modulação por deslocamento de fase binária (BPSK – *Binary Phase Shift Keying*) é empregada para representar os canais P-SS e S-SS. Já a modulação por chaveamento de mudança de fase em quadratura (QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*) é utilizada para o PBCH e DMRS e a 64-QAM é aplicada ao PDSCH [22].

A investigação de desempenho do sistema FiWi proposto considerou o cenário eRAC, operando na faixa de frequência de 700 MHz. A Fig. 1 apresenta o diagrama em blocos do arranjo experimental do sistema FiWi proposto, que explora uma solução A-RoF baseada em modulação externa e detecção direta, conforme definido na tecnologia C-RAN. Em síntese, um gerador EXG (N5171B) da Keysight gerou o sinal LTE-A ( $RF_2$ ) em 778 MHz, o qual é configurado *offline*, por meio do programa Signal Studio. Utilizou-se sinais com largura de faixa de 20 MHz e modulação 16-QAM e 64-QAM. Um gerador de formas de onda arbitrárias (AWG M9505A), em conjunto com o programa Signal Studio, gerou o sinal padrão 5G NR ( $RF_1$ )

em banda base com largura de faixa de 20 MHz e modulações 16- e 64-QAM. Posteriormente, um gerador de sinais vetoriais também da Keysight (PSG E8267D) realizou a conversão do sinal de banda base para a banda de 700 MHz. Esta abordagem possibilita investigar, o quão próximo os sinais LTE-A e 5G NR (*offset* de frequência) podem estar, sem que haja interferência mútua significativa.

Um modulador Mach-Zehnder de acionamento duplo (DD-MZM – *Dual Drive Mach-Zehnder Modulator*) modula uma portadora óptica em 1560 nm com dois sinais de RF distintos, a partir de um laser. O feixe óptico é então lançado em uma fibra monomodo (SMF – *Single Mode Fiber*) com potência óptica de 0 dBm proveniente do laser. Em relação aos níveis de potência, os sinais  $RF_1$  e  $RF_2$  foram transmitidos à -5 dBm, enquanto o fotodetector recebeu potência óptica fixa de -3 dBm. O comprimento do enlace de fibra óptica foi de 12,5 km e na recepção utilizou-se um atenuador óptico variável (VOA – *Variable Optical Attenuator*) e um medidor de potência óptica (OPM – *Optical Power Monitor*) para variar e monitorar, respectivamente, a potência óptica no fotodetector (PD). Após a fotodetecção, os sinais já convertidos para o domínio elétrico, foram demodulados e analisados em função do  $EVM_{RMS}$  utilizando um analisador de espectro Keysight MXA N9020A. De posse dos valores do *offset* de frequência, da potência óptica de recepção e da potência transmitida de RF, realizou-se uma transmissão sem fio de 10 metros, como prova de conceito. Na saída do fotodetector, um estágio de amplificação de 44 dB foi adicionado para compensar as perdas do enlace sem fio. Antenas log-periódica faixa-larga com ganho de 5-dBi foram responsáveis por transmitir e receber os sinais LTE-A e 5G NR. Na recepção, um analisador de espectro Keysight MXA N9020A foi responsável por demodular e analisar os sinais.

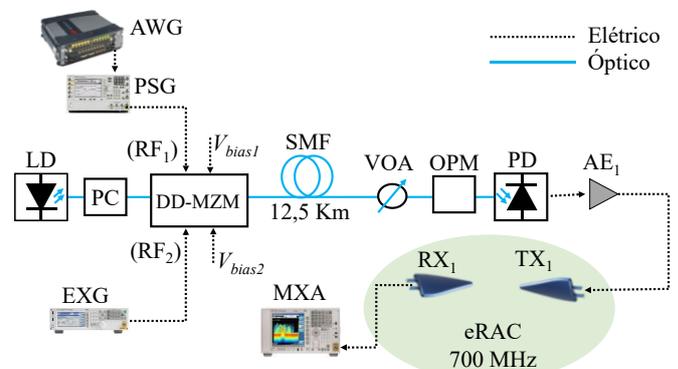


Fig. 1. Diagrama em blocos do sistema FiWi proposto: AWG – *arbitrary waveform generator*; PSG – *signal generator products*; EXG – *X-series signal generator*; LD – *laser diode*; PC – *polarization controller*; DD-MZM – *dual drive mach-zehnder modulator*; SMF – *single mode fiber*; VOA – *variable optical attenuator*; OPM – *optical power monitor*; PD – *photodetector*; AE1 – *electrical amplifier*; MXA – *signal analyser*.

## III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente, realizou-se a caracterização do sistema RoF, em função das tensões de polarização  $V_{bias1}$  e  $V_{bias2}$ , potência óptica recebida e potência elétrica dos sinais  $RF_1$  e  $RF_2$ . Com isto, obteve-se os níveis de grandezas que resultaram em valores ótimos de  $EVM_{RMS}$ . Sequencialmente, realizou-se a análise de coexistência entre os sinais, a qual consistiu em fixar o sinal LTE-A em 778 MHz e deslocar a frequência de portadora do sinal 5G NR, com objetivo de encontrar o espaçamento mínimo

entre os sinais, que não produza interferência mútua significativa. Os valores de  $EVM_{RMS}$  obtidos foram comparados com as especificações do 3GPP para versões de *Release 14* referente ao sinal LTE-A e *Release 15* para sinais 5G NR: valores de 12,5% e 8% [5] para modulação 16- e 64-QAM [7], respectivamente.

A Fig. 2 apresenta uma investigação experimental do desempenho de  $EVM_{RMS}$  em função do deslocamento de frequência entre os sinais LTE-A e 5G NR na faixa de 700 MHz. Para análise de coexistência, utilizou-se níveis de potência óptica e de RF de -3 e -5 dBm, respectivamente, valores estes que apresentaram melhor desempenho para esta análise. A frequência central do sinal 5G NR foi variada entre 760 e 758 MHz. Para *offset* de frequência de 18 MHz ocorreu uma sobreposição espectral de 2 MHz entre os sinais, resultando em níveis de  $EVM_{RMS}$  acima de 19% o que ultrapassa os limites especificados pelo 3GPP, tornando o sistema inadequado para 16- e 64-QAM. Essa sobreposição de 2 MHz afeta a coexistência entre os sinais, sobretudo devido à forma em que as subportadoras foram alocadas na banda do sinal.

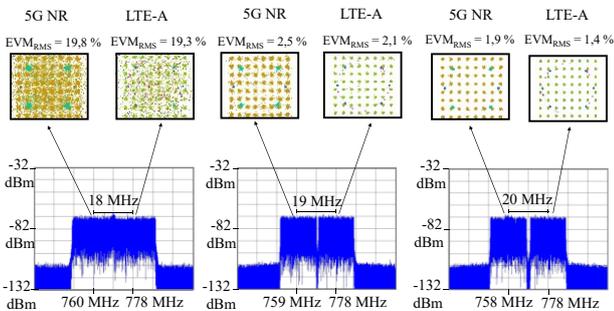


Fig. 2. Análise de coexistência entre os sinais LTE-A e 5G NR em função do deslocamento em frequência entre as portadoras dos sinais em um sistema RoF na faixa de 700 MHz.

As subportadoras que continham dados foram extremamente afetadas decorrentes desta sobreposição, tendo em vista a constelação de baixa qualidade para o canal PDSCH dos sinais 5G NR e LTE-A, apresentados na Figura 2. Por outro lado, um *offset* de 19 MHz garante que os níveis de  $EVM_{RMS}$  estejam abaixo de 3%. Para este deslocamento, ocorre sobreposição espectral de 1 MHz entre os sinais, no entanto esta sobreposição não afeta significativamente a qualidade dos sinais após o *fronthaul* óptico. O deslocamento de 20 MHz apresenta níveis de  $EVM_{RMS}$  ainda menores da ordem de 1,9% e 1,4% para os sinais 5G NR e LTE-A respectivamente. Vale ressaltar a clareza com que é apresentada a constelação referente ao canal PDSCH modulado em 64-QAM para ambos os sinais, comprovando a possibilidade de convivência pacífica entre 4G e 5G para aplicações de longo alcance, operando em UHF.

A Fig. 3 apresenta os resultados de  $EVM_{RMS}$  em função da potência óptica no fotodetector para os sinais LTE-A e 5G NR espaçados de 19 MHz entre as portadoras. A potência de RF de transmissão manteve-se em -5 dBm para ambos sinais, enquanto que a potência óptica de recepção foi variada de -10 a 0 dBm. Para ordem de modulação 16-QAM, os sinais LTE-A e 5G NR apresentaram valores de  $EVM_{RMS}$  abaixo dos limites estipulados pelo 3GPP para potência óptica superior ou igual a -9 dBm. Assim como previsto, o aumento na ordem de

modulação para 64-QAM, exigiu 2 dB adicionais na potência óptica recebida para atender os limites de  $EVM_{RMS}$  do 3GPP.

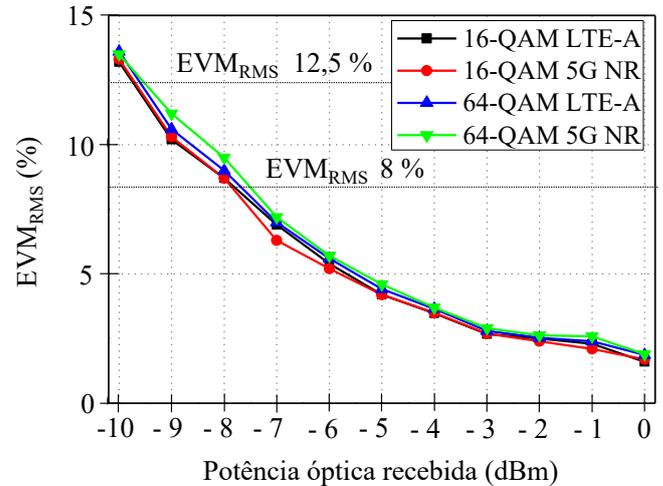


Fig. 3.  $EVM_{RMS}$  em função da potência óptica no fotodetector.

A Fig. 4 relata a caracterização do sistema FiWi em função da potência de RF de transmissão para potência óptica de 0 dBm fixa na recepção. Para variações de potência de RF entre -20 a 5 dBm, observou-se que para sinais modulados em 16-QAM, os níveis de potência acima de -18,5 dBm resultaram em valores de  $EVM_{RMS}$  em concordância com as especificações do 3GPP para os sinais LTE-A e 5G NR. O aumento na ordem de modulação para 64-QAM demandou potência elétrica adicional de pelo menos 4 dB para atender às especificações do 3GPP. Com isso, conseguiu-se aumentar a vazão de 67,2 Mbps para 100,8 Mbps para o sinal LTE-A e de 54 Mbps para 83 Mbps para o sinal 5G NR. O nível de potência de RF de 0 dBm apresentou níveis de  $EVM_{RMS}$  de apenas 1,9% e 1,4% para os sinais 5G NR e LTE-A, respectivamente.

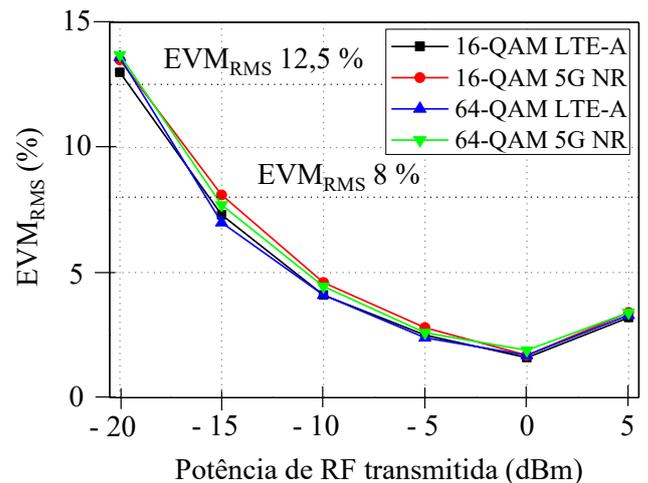


Fig. 4.  $EVM_{RMS}$  em função das potências de RF transmitidas.

O sistema FiWi baseado em 4G e 5G foi implementado com nível de potência de RF de -5 dBm para ambas as gerações e 0 dBm de potência óptica no fotodetector. Já o *offset* de frequência foi fixado em 19 MHz e a modulação 64-QAM com 20 MHz de largura de banda, obtendo assim vazão máxima de 182,8 Mbps para os sinais 5G NR e LTE-A. A Fig. 5 apresenta

os espectros obtidos na recepção do sistema FiWi e as respectivas constelações. Nota-se que um espaçamento mínimo de 19 MHz foi suficiente para que as tecnologias coexistam de modo pacífico, utilizando a mesma infraestrutura de rede. As constelações estão claras e com os símbolos bem definidos, perfazendo  $EVM_{RMS}$  de 2,5 % e 2,4 % para 5G NR e LTE-A, respectivamente.

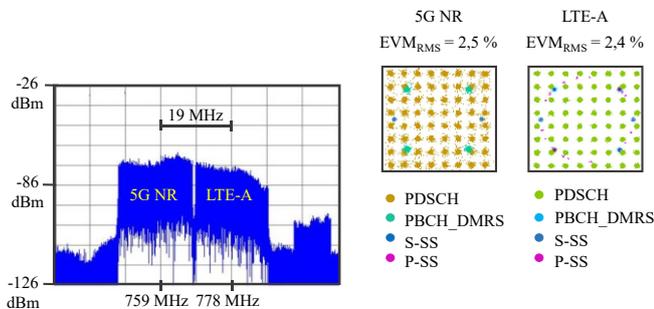


Fig. 5. Análise de coexistência entre os sinais no sistema FiWi para redes 5G e 4G.

#### IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou análises de coexistência entre sinais 5G NR e LTE-A em um *fronthaul* óptico móvel baseado em rádio sobre fibra analógico e operando na banda de 700 MHz. Resultados experimentais comprovaram que as tecnologias podem coexistir pacificamente utilizando a mesma infraestrutura de rede, com a finalidade de contribuir com a transição suave do 4G para o 5G, por meio da redução dos custos de infraestrutura e operacionais. Para tal, deve-se utilizar o modo NSA, o qual foi padronizado no *Release* 14 do 3GPP. Demonstrou-se a necessidade de um *offset* de frequência mínimo de 19 MHz para atender os pré-requisitos do 3GPP. Obteve-se vazão máxima de 182,8 Mbps com modulação 64-QAM no sistema FiWi proposto baseado em um *fronthaul* óptico móvel de 12,5 km e 10 m de alcance sem fio. Como trabalhos futuros, propõe-se uma análise comparativa entre o uso das modulações ópticas direta e externa em sistemas FiWi operando em ondas milimétricas.

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pela RNP, com recursos do MCTIC, Bolsa no 01250.075413 / 2018-04, no âmbito do projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações (Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel), Brasil. Autores também agradecem o apoio técnico da Keysight e o suporte financeiro da CAPES, CNPq, FAPEMIG e FINEP.

#### REFERÊNCIAS

- W. S. H. M. W. Ahmad et al., "5G Technology: Towards Dynamic Spectrum Sharing Using Cognitive Radio Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14460-14488, 2020.
- ITU-R, *IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*, 2015. Recommendation ITU-R M.2083-0, 1-19.
- J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, "What will 5G be?" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.
- I. Philbeck, *Connecting the unconnected: working together to achieve Connect 2020 Agenda targets*, 2017.
- 3GPP, *LTE-A; Overall description; Stage-2, TS 36.141 version 14.3.0 Release 14* (2017).
- S. Parkvall, E. Dahlman, A. Furuskär and M. Frenne, "NR: The New 5G Radio Access Technology," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 24-30, Dec. 2017.
- 3GPP, *5G; NR; Overall description; Stage-2, TS 38.300 version 15.3.1 Release 15* (2018).
- A. Delmède et al., "Performance analysis of analog IF over fiber fronthaul link with 4G and 5G coexistence," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 3, pp. 174-182, March 2018.
- 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, M. Fallgren, *Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project*, *IEEE Communications Magazine* 52 (2014) 26-35.
- A. O. Mufutau, F. P. Guiomar, M. A. Fernandes, A. Lorences-Riesgo, A. Oliveira and P. P. Monteiro, "Demonstration of a hybrid optical fiber-wireless 5G fronthaul coexisting with end-to-end 4G networks," in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 12, no. 3, pp. 72-78, March 2020.
- J. Capmany, D. Novak, *Microwave photonics combines two worlds*, *Nature Photonics* 1 (2007) 319-330.
- D. Wake, A. Nkansah, N. J. Gomes, *Radio Over Fiber Link Design for Next Generation Wireless Systems*, *Journal of Lightwave Technology* 28 (2010) 2456-2464.
- C. I. H. Li, J. Korhonen, J. Huang, L. Han, *RAN Revolution with NGFI (xhaul) for 5G*, *Journal of Lightwave Technology* 36 (2018) 541-550.
- G. Kalfas, C. Vagionas, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, A. Mesodiakaki, S. Papaioannou, P. Maniotis, J. S. Vardakas, C. Verikoukis, N. Pleros, *Next Generation Fiber-Wireless Fronthaul for 5G mmWave Networks*, *IEEE Communications Magazine* 57 (2019) 138-144.
- J. Park, E. Lee, S. Park, S. Raymond, S. Pyo and H. Jo, "Modeling and Analysis on Radio Interference of OFDM Waveforms for Coexistence Study," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35132-35147, 2019.
- M. Morant, A. Trinidad, E. Tangdiongga, T. Koonen, R. Llorente, *Experimental Demonstration of mm-Wave 5G NR Photonic Beamforming Based on ORRs and Multicore Fiber*, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 67 (2019) 2928-2935.
- M. Noweir, Q. Zhou, A. Kwan, R. Valivarthy, M. Helaoui, W. Tittel, F. M. Ghannouchi, *Digitally Linearized Radio-Over Fiber Transmitter Architecture for Cloud Radio Access Network's Downlink*, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 66 (2018) 3564-3574.
- 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, M. Fallgren, *Scenarios for 5G mobile and wireless communications: The vision of the METIS project*, *IEEE Communications Magazine* 52 (2014) 26-35.
- 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, Arismar Cerqueira S. Jr., *Integration of a GFDM-Based 5G Transceiver in a GPON Using Radio Over Fiber Technology*, *Journal of Lightwave Technology* 36 (2018) 4468-4477.
- H. R. D. Filgueiras, R. M. Borges, M. Caldano Melo, T. H. Brandão, Arismar Cerqueira S. Jr., *Dual-Band Wireless Fronthaul Using a FSS-Based Focal-Point/Cassegrain Antenna Assisted by an Optical Midhaul*, *IEEE Access* 7 (2019) 112578-112587.
- R. M. Borges, L. A. M. Pereira, H. R. D. Filgueiras, A. C. Ferreira, M. S. B. Seda, E. R. Neto, D. H. Spadoti, L. L. Mendes, Arismar Cerqueira S. Jr., *DSP-Based Flexible-Waveform and Multi-Application 5G Fiber-Wireless System*, *Journal of Lightwave Technology* 38 (2020) 642-653.
- Y. Zhu, Y. Wu, H. Xu, C. Browning, L. P. Barry and Y. Yu, "Experimental Demonstration of a WDM-RoF Based Mobile Fronthaul with f-OFDM Signals by Using Directly Modulated 3s-DBR Laser," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 16, pp. 3875-3881, 15 Aug. 2019.