

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA**  
**INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:**  
**ANÁLISIS DE LA CONVERGENCIA DE FBMC Y LTE EN REDES DE ACCESO**  
**ÓPTICO**

**AUTOR:**  
**OTTO ALEJANDRO FONSECA ROJANO**

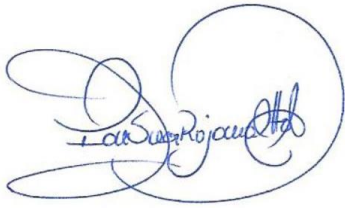
**TUTOR:**  
**MILTON NAPOLEÓN TIPÁN SIMBAÑA**

**Quito, julio del 2020**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Otto Alejandro Fonseca Rojano, con documento de identificación N° 1720815578, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “ANÁLISIS DE LA CONERGENCIA DE FBMC Y LTE EN REDES DE ACCESO ÓPTICO”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELECTRÓNICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Otto Alejandro Fonseca Rojano

CI: 1720815578

Quito, julio del 2020

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Milton Napoleón Tipán Simbaña, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Artículo Académico, “ANÁLISIS DE LA CONERGENCIA DE FBMC Y LTE EN REDES DE ACCESO ÓPTICO” realizado por Otto Alejandro Fonseca Rojano, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio del 2020



Milton Napoleón Tipán Simbaña

CI:1713583126

## **DEDICATORIA**

A Dios por ponerme en una maravillosa familia. A mis padres Otto Fonseca y María Rojano porque siempre estuvieron apoyándome y brindándome sus consejos a lo largo de mi formación profesional, porque me enseñaron valores para ser un gran ser humano y que con esfuerzo se pueden alcanzar las metas. A mis hermanos Lorena y Diego por confiar en mí y ser parte importante en mi vida. Este logro que hoy estoy cosechando es por y para ustedes.

Gracias familia.

Otto Alejandro Fonseca Rojano

# ANÁLISIS DE LA CONVERGENCIA DE FBMC Y LTE EN REDES DE ACCESO ÓPTICO

## FBMC AND LTE CONVERGENCE ANALYSIS IN OPTICAL ACCESS NETWORKS

Otto A. Fonseca<sup>1</sup>

### Resumen

En este artículo se probó experimentalmente la transmisión conjunta de las señales de datos FBMC y LTE en una única longitud de onda sobre una red de acceso óptico de 25 Km. FBMC fue dejada en banda base mientras que la señal LTE fue centrada en frecuencia de 1.5 GHz. Después se caracterizó las señales de onda midiendo parámetros de desempeño como BER y EVM, posteriormente fue optimizada la potencia RF de la señal LTE. Ambas señales fueron detectadas correctamente con un único fotodiodo. Se obtuvo sensibilidades en el receptor de -25 dBm y -27 dBm con un BER  $10^{-3}$  para las señales FBMC y LTE respectivamente. Los resultados muestran que es posible la convergencia de las señales antes mencionadas y además que la técnica de multiplexación de frecuencia RF puede ser empleada para la convergencia de datos cableados e inalámbricos.

**Palabras Clave:** Convergencia, FBMC, LTE, Radio sobre fibra, Redes de acceso óptico.

### Abstract

In this article, we experimentally transmitted jointly an FBMC data and LTE signal in a single wavelength within an optical access network of 25 Km. FBMC was left at baseband while LTE signal was centered at frequency of 1.5 GHz. Then the waveforms were characterized by measuring performance parameters such as BER and EVM, the RF power of the signal LTE was subsequently optimized. Both signals were correctly detected with a single photodiode. Receptor sensitivities of -25 dBm and -27 dBm were obtained with a BER of  $10^{-3}$  for FBMC and LTE signal respectively. The results show that the convergence of the signals is possible, and the RF frequency multiplexing technique can be used for the convergence of wired and wireless data.

**Keywords:** Convergence, FBMC, LTE, Radio over fiber, Optical Access Network.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Electrónica (Mención en Telecomunicaciones)-Universidad Politécnica Salesiana Campus Sur

## 1. Introducción

La demanda de ancho de banda ha incrementado constantemente en los últimos años especialmente en la región de acceso debido al aprovisionamiento de servicios multiple-play que incluyen navegación web, video streaming, compartición de archivos y telefonía IP con un alto número de usuarios [1][2]. Por lo tanto, las redes de acceso necesitan ofrecer una combinación de alta capacidad, flexibilidad y baja atenuación para transmitir varios servicios simultáneamente [3]. Radio sobre fibra (RoF, Radio over Fiber) permite la convergencia de redes cableadas e inalámbricas [4]. RoF es muy útil para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda del usuario debido a sus características de baja atenuación y amplio ancho de banda [5].

Las comunicaciones móviles han crecido rápidamente en los últimos años. Recientemente 4G fue empleado y ahora ya se empezó las pruebas de la nueva generación de comunicaciones inalámbricas 5G [6]. Esta nueva generación tendrá que hacer frente a un alto grado de heterogeneidad en términos de servicio y requerimientos con la capacidad de enlazar varios servicios a las mejores combinaciones de frecuencia y recursos de radio [7]. Se espera que 5G use nuevas tecnologías como la modulación por banco de filtros multiportadora (FBMC, Filter Bank Multicarrier). FBMC es una forma de modulación multiportadora en la que cada subportadora es filtrada para brindar una mejor eficiencia espectral [8][9]. Además, está diseñado para reducir los lóbulos laterales en el dominio de la frecuencia y consecuentemente proporcionar un nivel bajo de potencia pico fuera de banda (OOB, Out of Band) [10][11].

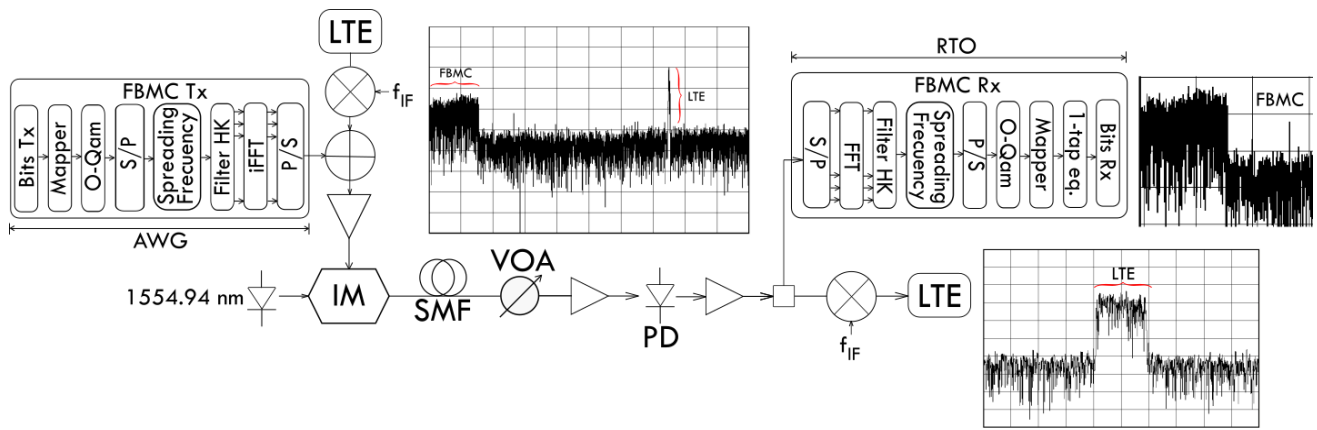
En este artículo se propone la transmisión conjunta de las señales de datos FBMC y evolución a largo plazo (LTE, Long Term Evolution) en una única longitud de onda. Además, la señal LTE esta desplazada a una frecuencia intermedia para evitar la superposición espectral. Para reducir la complejidad del sistema una modulación por intensidad (IM, Intensity Modulation) en conjunto con detección directa (DD, Direct Detection) fue empleada. Se detectaron correctamente ambas señales con un único

fotodiodo (PD, Photodiode) mostrando sensibilidades de -25 dBm y -27 dBm para FBMC y LTE respectivamente con una tasa de error de bit (BER, Bit Error Rate) de 10<sup>-3</sup>. Estos valores representan un presupuesto de potencia que permitirá servir a aproximadamente 16 usuarios a una distancia de 25 Km, logrando una convergencia con las redes ópticas pasivas legadas y las nuevas señales inalámbricas de la quinta generación [12].

## 2. Configuración Experimental

La señal FBMC fue generada en banda base, un total de 10240 bits aleatorios, los cuales fueron mapeados en modulación de amplitud en cuadratura 4-QAM (QAM, Quadrature Amplitude Modulation), ya que dicha modulación es robusta frente al ruido y permite una adecuada comparación con la señal LTE. Se envió los símbolos complejos en subcanales pares e impares para evitar la superposición. Estos símbolos en serie se convierten en símbolos en paralelo para ingresar al bloque de la transformada de Fourier rápida inversa (IFFT, Inverse Fast Fourier Transform) de 2048 puntos. Para ingresar a la IFFT los símbolos fueron arreglados con simetría hermítica para obtener una señal de valores reales. La salida de la IFFT fue transformada de símbolos en paralelo a símbolos en serie. Las muestras finales fueron cargadas en el generador de ondas arbitrario (AWG, Arbitrare Wave Generator) a una frecuencia de trabajo de 1.25 GSa/s que es la más alta frecuencia disponible en el equipo.

En el caso de LTE, la señal fue producida por un generador de señales vectorial (VSG, Vector Signal Generator). La señal eléctrica LTE fue cargada a una frecuencia de portadora ( $f_{IF}$ ) de 1.5 Ghz para evitar la interferencia con la señal FBMC. Ambas señales fueron moduladas y combinadas por un láser de retroalimentación distribuida (DFB, Distribute Feddback Laser) mediante un modulador en intensidad, el cuál operó en su punto de cuadratura tal manera que las señales de radio frecuencia (RF, Radio Frequency) se amplificaron para ocupar la región lineal. La potencia de la señal óptica fue enviada a 0 dBm ya que permite un nivel de referencia para el cálculo del presupuesto de pérdidas del enlace y su comparación con los estándares actuales a través de un enlace de fibra óptica monomodo (SMF, Single Mode Fibre) de 25 Km. Un atenuador óptico variable (VOA, Variable



**Figura 1.** Esquemas experimentales de configuración. Las figuras muestran los espectros (i) en la fibra con datos FBMC y LTE, (ii) FBMC, y (iii) Señal eléctrica Rx LTE.

Optical Attenuator) limitó la potencia óptica de recepción y simuló las pérdidas por división de la red. El receptor consistía de un pre-amplificador de 10 GHz de ancho de banda (BW, Bandwidth) y un fotodiodo (PD, Photo Diode) p-i-n. La señal eléctrica completa fue amplificada y detectada con un osciloscopio de tiempo real (RTO, Real Time Oscilloscope) y un analizador de señales vectoriales (VSA, Vector Signal Analyzer) de 2 GHz de ancho de banda. Una frecuencia de muestreo de 5 GSa fue usada en el RTO para recuperar las señales de RF. Posteriormente, las muestras descargadas del RTO fueron procesadas con el software Matlab®, para lo cual un filtro con respuesta finita al impulso (FIR, Finite Impulse Response) con un ancho de banda de 625 MHz fue usado para recuperar la señal de FBMC. Entonces, un proceso de sincronización de la señal y demodulación de los símbolos FBMC fue llevado a cabo.

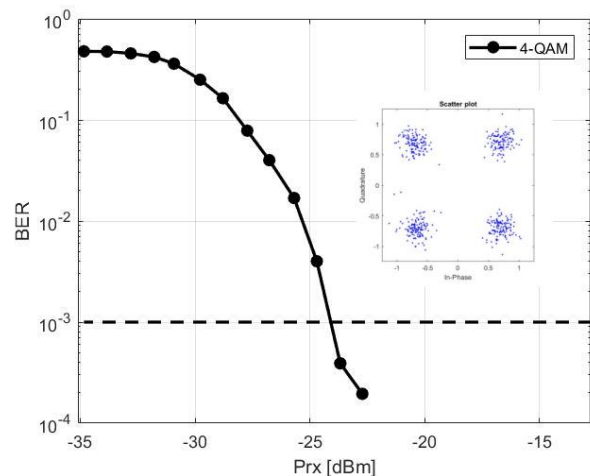
Después, un ecualizador de 1-tap fue usado para compensar la respuesta del canal en la señal recibida. Entonces, las muestras fueron demapeadas y el BER fue calculado con un conteo directo de error. Por otro lado, el VSA tiene un sintonizador interno RF el cual fue centrado en ( $f_{IF}$ ) para detectar solo la señal LTE y calcular la magnitud del error vectorial (EVM, Error Vector Magnitude). El esquema de la configuración de los equipos se muestra en la Figura 1 y muestra además el espectro de frecuencia de las señales detectadas.

### 3. Resultados y discusión

Inicialmente se ejecutó el programa realizado en Matlab® para detectar correctamente la señal FBMC en un enlace de fibra de 25 Km. El BER versus la potencia recibida (Prx) se muestra en la

Figura 2 para una FFT de 2048 puntos con modulación 4-QAM. Se obtuvo una sensibilidad de para mejorar la señal con técnicas de corrección de -24 dBm con un BER de  $10^{-3}$  el cual es suficiente para mejorar la señal con técnicas de corrección de errores hacia adelante (FEC, Forward Error Correction).

La señal LTE fue generada a una frecuencia  $f_{IF}=1.5\text{GHz}$  y se configuró la potencia eléctrica de salida a 0 dBm. El EVM versus la potencia eléctrica Rx es mostrada en la Figura. 3. Fue considerado un EVM de 28.2% (línea punteada en la Fig. 3) como objetivo que corresponde aproximadamente a un  $\text{BER}=10^{-3}$ [13]. Se observó que la potencia usada fue muy alta ya que no se alcanza el EVM deseado. Para alcanzar dicho objetivo se varió la potencia de transmisión de los datos eléctricos LTE de -30 dBm a 0 dBm y se midió el EVM mientras se mantuvo constante la

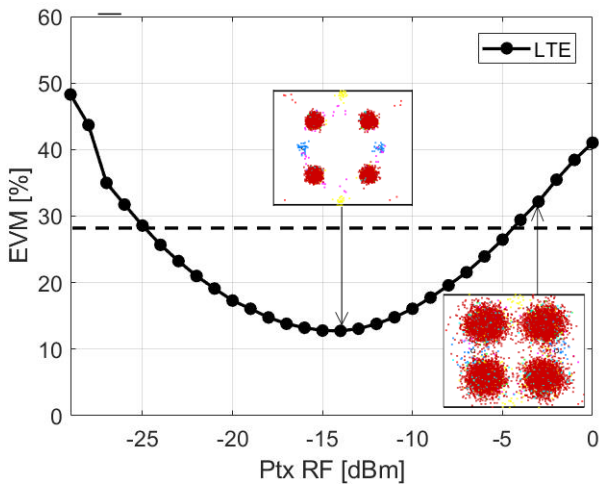


**Figura 2.** BER versus Potencia óptica Rx (Prx) para la señal FBMC después de 25km de fibra óptica monomodo con modulación 4-QAM y 2048 puntos de entrada en la FFT. El diagrama de constelaciones corresponde a un  $\text{BER}=10^{-3}$ .

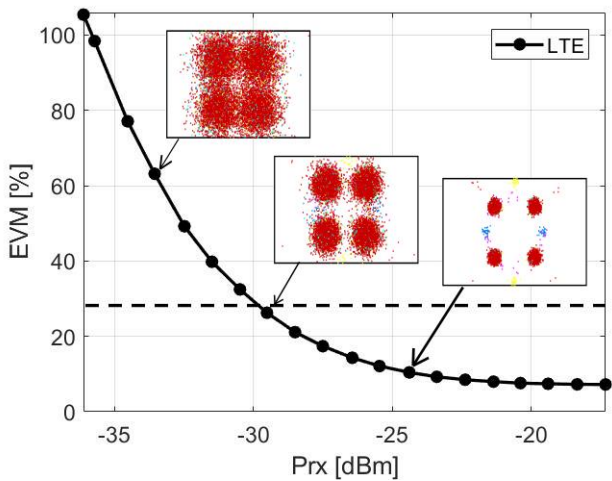
potencia óptica Rx en -27 dBm que fue el punto más bajo como se muestra en la Figura 3.

Se obtuvo un valor óptimo de potencia de salida de radio frecuencia (Ptx RF) de -14 dBm que está claramente por debajo del objetivo EVM como se observa en la Figura 4a.

Con este valor óptimo de potencia de salida, el EVM versus la potencia óptica de salida es medida nuevamente. Los resultados obtenidos de dicha medición se muestran en la Figura 4b. En este caso la sensibilidad obtenida fue de aproximadamente -29 dBm. Aparece un piso de ruido como se observa en los diagramas de constelaciones de la Figura 4.



(a)



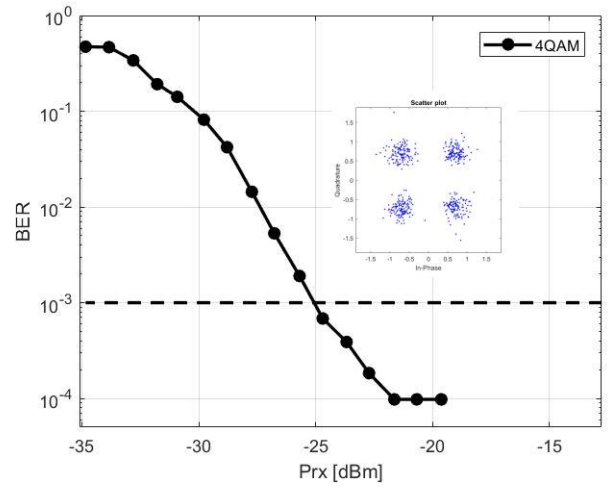
(b)

**Figura 4.** (a) Optimización de la potencia Tx RF de la señal LTE (RF Ptx: potencia eléctrica transmitida); (b) EVM versus la potencia óptica Rx de la señal LTE a -14 dBm de potencia RF en un enlace SMF de 25km.

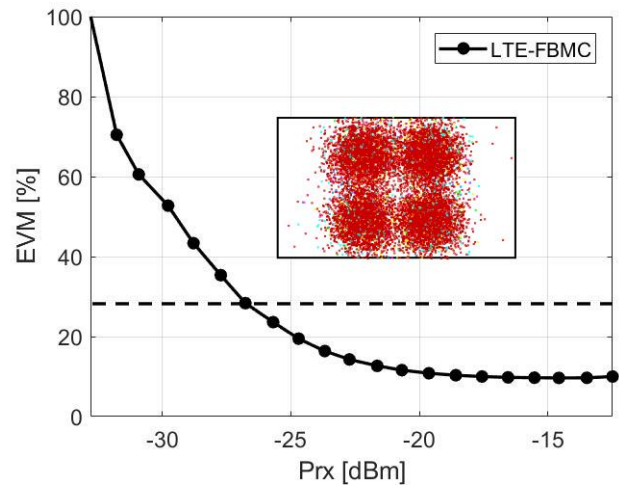
Después de haber transmitido las señales FBMC y LTE individualmente a través del enlace de fibra, se transmitieron juntas las dos señales,

luego fueron moduladas en intensidad por el IM y se configuró la potencia de salida LTE en -14 dBm.

La Figura 5 muestra el rendimiento de la señal FBMC transmitida junto con la señal LTE. La señal FBMC fue correctamente detectada con una sensibilidad de -25 dBm. Un piso de ruido fue apareciendo en la parte LTE, debido a que la potencia óptica fue compartida por las dos señales. Es decir, el ruido provocado por la señal FBMC se fue sumando como ruido de la parte LTE. Por lo tanto, el rendimiento de LTE fue limitado y su potencia fue reducida por la transferencia de energía a la parte FBMC. Finalmente se midió el rendimiento de ambas señales en el enlace de fibra.



(a)



(b)

**Figura 5.** (a) BER y (b) EVM versus la potencia óptica Rx de las señales FBMC y LTE después de un enlace de fibra SMF de 25 Km. El diagrama de constelaciones corresponde al objetivo BER y EVM con modulación 4-QAM para la señal FBMC.

El BER y el EVM versus la potencia óptica Rx se muestra en la figura 5a y 5b respectivamente. En



ambos casos las señales fueron detectadas correctamente.

Para la señal LTE una sensibilidad Rx de -27 dBm fue obtenida para el objetivo EVM la cual representa una penalidad de 2 dB. De igual manera para los datos FBMC una sensibilidad de -25 dBm fue obtenida. De los resultados conseguidos se puede decir que existe una relación entre la potencia eléctrica de las dos señales cuando se transmiten juntas.

## 4. Conclusiones

Una red de acceso óptico que transmite las señales de datos FBMC y LTE fue probada. Primero las señales fueron transmitidas y recibidas individualmente alcanzando sensibilidades Rx de -24 dBm y -29 dBm para FBMC 4-QAM y LTE respectivamente con un BER de 10<sup>-3</sup>. Para poder detectar la señal LTE su potencia RF fue optimizada ya que su desempeño estuvo por encima de un BER de 10<sup>-3</sup>. Después las señales se transmitieron juntas y se obtuvieron sensibilidades de -25 dBm y -27 dBm que representan una penalidad de 2 dBm para LTE y una mejora de 1dB para FBMC.

Estos valores se traducen en la existencia de una relación entre las potencias RF de las señales FBMC y LTE cuando se transmiten conjuntamente por el enlace de fibra. Lo anterior, demuestra parámetros óptimos para la coexistencia de redes legadas con las nuevas tecnologías para 5G en redes de acceso óptico, es más la relación de potencias que existe entre ellas permitiría servir a usuarios a diferentes distancias optimizando las mismas.

## Referencias

- [1] S. Pachnicke, M. H. Eiselt, K. Grobe, and J. P. Elbers, "The frontiers of optical access networks," *Conf. Proc. - 2015 Int. Conf. Opt. Netw. Des. Model. ONDM 2015*, pp. 12–15, 2015, doi: 10.1109/ONDM.2015.7127266.
- [2] C. Rodrigues, A. Gamelas, F. Carvalho, and A. Cartaxo, "Evolution of FTTH networks based on radio-over-fibre," *Int. Conf. Transparent Opt. Networks*, pp. 4–7, 2011, doi: 10.1109/ICTON.2011.5970946.
- [3] I. N. Cano, M. N. Tipán, and G. V. Arévalo, "OFDM and LTE data convergence test in optical access networks," *2015 7th IEEE Latin-American Conf. Commun. LATINCOM 2015*, 2016, doi: 10.1109/LATINCOM.2015.7430118.
- [4] R. Llorente *et al.*, "Radio-over-fiber quintuple-play service provision for deep fiber-to-the-home passive networks," *2013 IEEE Int. Conf. Commun. Work. ICC 2013*, pp. 868–872, 2013, doi: 10.1109/ICCW.2013.6649356.
- [5] A. Seal, S. Bhutani, and A. Sangeetha, "Performance analysis of radio over fiber (RoF) system for indoor applications," *Proc. - 2017 Int. Conf. Tech. Adv. Comput. Commun. ICTACC 2017*, vol. 2017-October, pp. 73–76, 2017, doi: 10.1109/ICTACC.2017.28.
- [6] H. Azzahhafi, M. El Yahyaoui, and A. El Moussati, "Generation and Transmission of FBMC Signal at mm Wave over Fiber for 5G," *Int. Symp. Adv. Electr. Commun. Technol. ISAECT 2018 - Proc.*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/ISAECT.2018.8618763.
- [7] R. Gerzaguet *et al.*, "The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance," *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2017, no. 1, 2017, doi: 10.1186/s13638-016-0792-0.
- [8] A. Hazareena and B. A. Mustafa, "A Survey: On the Waveforms for 5G," *Proc. 2nd Int. Conf. Electron. Commun. Aerosp. Technol. ICECA 2018*, no. Iceca, pp. 64–67, 2018, doi: 10.1109/ICECA.2018.8474641.
- [9] R. Bale, T. S. Seetharamaiah, Y. S. Reddy, A. Dubey, and T. Panigrahi, "OFDM vs FBMC: A comparative analysis for broadband-PLC," *2018 10th Int. Conf. Commun. Syst. Networks, COMSNETS 2018*, vol. 2018-Janua, no. 4, pp. 480–483, 2018, doi: 10.1109/COMSNETS.2018.8328249.
- [10] F. Schaich and T. Wild, "Waveform contenders for 5G - OFDM vs. FBMC vs.

UFMC,” *ISCCSP 2014 - 2014 6th Int. Symp. Commun. Control Signal Process. Proc.*, pp. 457–460, 2014, doi: 10.1109/ISCCSP.2014.6877912.

- [11] J. Rodríguez-Piñeiro, T. Domínguez-Bolaño, P. Suárez-Casal, J. A. García-Naya, and L. Castedo, “Affordable evaluation of 5G modulation schemes in high speed train scenarios,” *WSA 2016 - 20th Int. ITG Work. Smart Antennas*, pp. 476–483, 2019.
- [12] H. Kimura, T. Matsumoto, S. Shimazu, S. Yamashita, and J. Yamasaki, “Optical power budget enhancement technologies for long-reach GE-PON system,” *NTT Tech. Rev.*, vol. 9, no. 10, 2011.
- [13] Agilent, “8 Hints for Making and Interpreting EVM Measurements Application Note,” *Appl. Note*, 2005.