



DISEÑO DE REDES DE ACCESO ÓPTICAS PARA COMUNICACIONES 5G BASADAS EN LA GENERACIÓN FOTÓNICA DE LAS SEÑALES DE ONDA MILIMÉTRICA

Borja González Raga

Tutor: Beatriz Ortega Tamarit

Cotutor: Luis Vallejo Castro

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2020-21

Valencia, 3 de julio de 2021



Resumen

En este trabajo se estudian las redes de acceso ópticas con generación fotónica de señales de ondas milimétricas, como tecnología habilitadora de las actuales y futuras redes 5G/6G. Para ello se evalúa la respuesta del modulador Mach-Zehnder (MZM) en un sistema óptico que transmite dos señales eléctricas en la banda de las ondas milimétricas con modulación 16-QAM sobre una portadora óptica. Además, se estudiará el impacto de la posición del filtro para estas señales en las estaciones de radio remotas (RRH) y si, además, éste permite una mejor recepción de datos que cuando se emplea una modulación con supresión de portadora. El trabajo se ha realizado en orden de complejidad creciente incorporando distintos elementos en el simulador para obtener la caracterización de los sistemas que incorporan la generación de una sola señal con distintos puntos de polarización en el MZM, la utilización de filtros para la supresión de la portadora en sistemas con modulación en cuadratura y finalmente, la generación de dos señales en la banda milimétrica.

Se ha utilizado el software OptiSystem® para llevar a cabo las simulaciones y se ha hecho uso de Matlab® para el tratamiento de datos y de gráficos. Las partes que forman el trabajo responden a la línea temporal utilizada para la obtención de las conclusiones.

Resum

Aquest treball estudia les xarxes d'accés òptic amb generació fotònica de senyals d'ona mil·límetres, com a tecnologia habilitadora per a xarxes 5G/6G actuals i futures. Per a això, s'avalua la resposta del modulador Mach-Zehnder (MZM) en un sistema òptic que transmet dos senyals elèctrics en la banda d'ones mil·limètriques amb modulació de 16-QAM en un portador òptic. A més, s'estudiarà l'impacte de la posició de filtre d'aquests senyals en emissors de ràdio (RRH) remotes i si, a més, permet una millor recepció de dades que quan s'utilitza una modulació amb supressió portadora. El treball s'ha realitzat per ordre de major complexitat incorporant diferents elements en el simulador per a obtenir la caracterització dels sistemes que incorporen la generació d'un únic senyal amb diferents punts de polarització en el MZM, l'ús de filtres per a la supressió del portador en sistemes amb modulació en quadratura i finalment, la generació de dos senyals en la banda mil·límetre.

El programari OptiSystem® s'ha utilitzat per dur a terme les simulacions i Matlab® s'ha utilitzat per al processament de dades i gràfics. Les parts que componen l'obra responen a la cronologia utilitzada per obtenir les conclusions.

Abstract

This paper studies optical access networks with photonic generation of millimeter wave signals, as enabling technology for current and future 5G/6G networks. To do this, the response of the Mach-Zehnder modulator (MZM) is evaluated in an optical system that transmits two electrical signals in the band of millimeter waves with 16-QAM modulation on an optical carrier. In addition, the impact of the filter position for these signals on remote (RRH) radio stations will be studied and whether, in addition, it allows better data reception than when using a modulation with carrier suppression. The work has been carried out in order of increasing complexity incorporating different elements in the simulator to obtain the characterization of the systems that incorporate the generation of a single signal with different polarization points in the MZM, the



use of filters for the suppression of the carrier in systems with modulation in quadrature and finally, the generation of two signals in the millimeter band.

The OptiSystem® software has been used to carry out the simulations and Matlab® has been used for data and graph processing. The parts that make up the work respond to the timeline used to obtain the conclusions.



Índice

Capítulo 1.	Introducción, Objetivos y Estructura	2
Capítulo 2.	Fundamentos teóricos.....	4
2.1	Redes C-RAN.....	4
2.2	Transmisión de Radio sobre fibra.....	5
2.3	Sistemas de transmisión en la banda de ondas milimétricas.	5
2.4	Técnicas de generación fotónica de señales mmW.	5
2.4.1	Optical Injection Locking (OIL).....	6
2.4.2	Generación de microondas basadas en un modulador externo.	6
2.4.3	Optical Phase Lock Loop (OPLL).....	7
2.4.4	Optical Injection Phase Locking (OIPL).....	8
2.4.5	Generación de microondas a partir de un laser de doble longitud de onda.	9
Capítulo 3.	Generación fotónica de señales mmW basada en multiplicación óptica de frecuencia.	10
3.1	Descripción del software.....	10
3.2	Modulación en el punto de supresión de la portadora.	11
3.3	Modulación en el punto de cuadratura con filtrado óptico de la portadora.....	17
3.3.1	Optimización del filtro.	19
3.3.2	Filtrado en la Unidad de Banda Base (BBU).....	20
3.4	Modulación en el punto de supresión de portadora para transmisión de dos señales eléctricas.....	24
Capítulo 4.	Conclusiones y líneas futuras.	30
Capítulo 5.	Bibliografía.....	32

Capítulo 1. Introducción, Objetivos y Estructura

Desde que se inventó internet, las tecnologías de telecomunicaciones para la utilización de este se han ido sucediendo de manera más o menos estructurada, se podría decir incluso que hay una regla no escrita por la que cada 10 años aproximadamente, surge una nueva tecnología. La última en aparecer ha sido el 5G, es decir, la quinta generación de tecnologías de telecomunicaciones. Hoy en día, estas redes ya han llegado a bastantes países incluido España. La quinta generación de redes de telecomunicaciones aporta diferentes ventajas respecto a las tecnologías anteriores: 3G y 4G, como la velocidad de transmisión de datos, mejor latencia, mayor ancho de banda o la provisión de servicios Internet of Things (IoT).

Siendo más concretos se habla de una velocidad de transferencia de datos de hasta 35 Gbps, que comparado con las redes 4G aumentan esta velocidad casi 10 veces, además también permitiría poder conectarse a internet incluso viajando en vehículos que vayan a 300 km/h [1] y lo más importante y novedoso son las aplicaciones que este puede aportar a la sociedad como por ejemplo el IoT (Internet-of-Things), con el cual se pretende interconectar absolutamente todo, desde una casa hasta una ciudad entera, la industria 4.0, la cual dotaría a las plantas de producción industrial de una tecnología capaz de hacerlas más autónomas, flexibles y eficientes, incluso la posibilidad de tener coches autónomos, esto son algunos de los ejemplos que permitiría el 5G. Estas ventajas se adaptan a las necesidades de la población actual, la cual demanda más rapidez en el acceso a la información, más conexiones entre sus dispositivos y además el aumento del tráfico de datos.

Aun así, no hay que perder de vista el futuro próximo, donde ya existen rumores del desarrollo del 6G (Tabla 1). Al igual que el 5G, el 6G es la sexta generación de redes de telecomunicaciones, la cual ya se está probando en algunos países utilizando frecuencias muy altas (95 – 3000 GHz) [2].

Tabla. 1. Frecuencias para el 6G. [2]

Banda	Frecuencia
F	90 GHz – 140 GHz
D	110 GHz -170 GHz
G	140 GHz -220 GHz
G	170 GHz -260 GHz
G	220 GHz -325 GHz
Y	325 GHz -500 GHz
Y	500 GHz -750 GHz
Y	750 GHz -1100 GHz

Aunque previsiblemente la implementación total de esta tecnología (6G) no llegará antes del 2040, esta aportará muchísimas ventajas a la hora de realizar enlaces y transmisiones de datos. Es precisamente por ello por lo que este trabajo se basa en la explotación de ellas, utilizando una transmisión multibanda de 2 señales milimétricas a través de un enlace óptico, haciendo uso de las frecuencias del 5G y comprobando cómo se puede optimizar a través del uso de filtros, todo ello utilizando una topología de red C-RAN (Centralized Radio-Access-Network).

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es estudiar diferentes metodologías o esquemas para la generación fotónica de señales de longitud de onda milimétrica propias del estándar 5G y de las futuras redes 6G y la transmisión de datos sobre fibra óptica. Se ha evaluado el funcionamiento de un modulador Mach-Zehnder (MZM) en diferentes puntos de polarización optimizando la calidad de la señal recibida mediante el uso de filtros optimizados. Finalmente se explora la posibilidad de emplear estas estructuras para transmitir varias frecuencias simultáneamente.

La Figura 1. muestra el diagrama temporal y las fases que ha cubierto la realización de este trabajo.

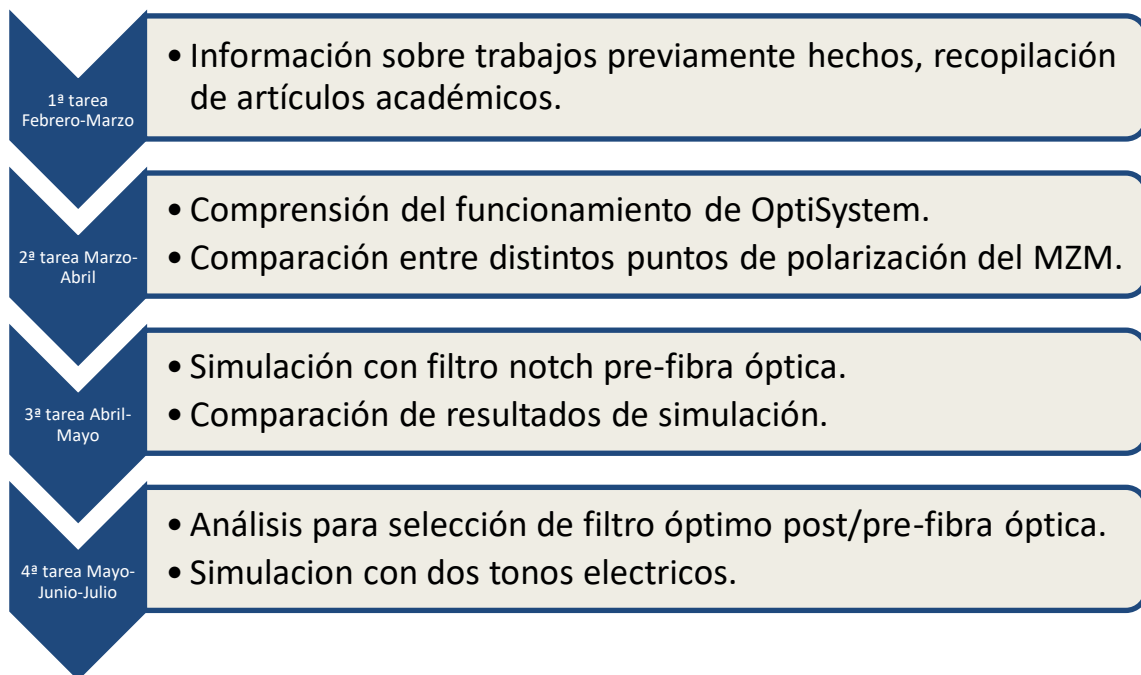


Figura 1 Diagrama temporal seguido en el trabajo.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos.

2.1 Redes C-RAN

Uno de los motivos fundamentales para la aparición de nuevas tecnologías de internet es, como se ha visto en el capítulo anterior, las nuevas demandas de los usuarios. Esto pone en jaque algunas tipologías de red utilizadas hoy en día, que, con las crecientes demandas de la sociedad, pueden quedarse obsoletas o no dar el servicio correctamente cumpliendo estas demandas.

Unas de las tipologías de red que prometen alcanzar estas demandas son las llamadas redes C-RAN (Centralized/Cloud-Radio Access Network), esto se debe a que esta tipología despliega pequeñas celdas a partir de una topología centralizada, lo que permitiría un mayor soporte de transporte a nivel de datos.

Las redes C-RAN están formadas por dos partes muy definidas, la Unidad de Banda Base (BBU) y las Estaciones de Radio Remotas (RRH). Estas dos partes están conectadas a través del enlace fronthaul (Figura.2.).

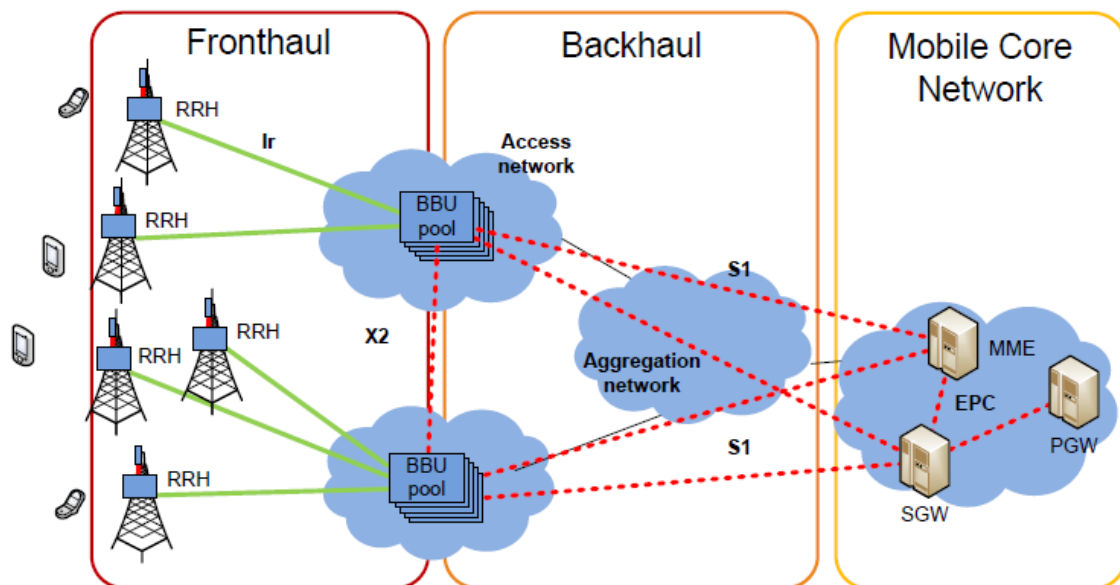


Figura. 2. Arquitectura C-RAN [3].

Como se puede apreciar en la Figura 2, la arquitectura C-RAN se basa en una estación centralizada que se conecta a través del enlace fronthaul a diversas estaciones de radio adjuntas a la estación base. Además, las estaciones base se conectan a la red troncal a través del Backhaul.

Las primeras arquitecturas de fronthaul se diseñaron para dar servicio a las redes LTE-A (Long Term Evolution-Advanced), es decir, en redes 4G, que son capaces de ofrecer una velocidad a usuarios de entre 100 Mbps y 1 Gbps [4].

Por lo tanto, es necesario adaptar la arquitectura de red según la demanda que surge en el marco de las nuevas redes 5G.

2.2 Transmisión de Radio sobre fibra

Como se ha comentado en el apartado anterior, la conexión desde la estación banda base hasta las estaciones de radio remota se realiza mediante los enlaces fronthaul, que no es más que un enlace de fibra por donde se van a transmitir los datos. Para ello se emplea la tecnología de radio sobre fibra (Radio-over-Fiber, RoF), que consiste en transmitir una portadora óptica modulada con una señal de radiofrecuencia.

Esta tecnología surgió en la década de los 80 principalmente para enlaces de TV mediante la multiplexación de la portadora. Hoy en día y con la llegada de las nuevas tecnologías como el 5G y el 6G en un futuro, que incluyen la conexión sin cable (Wireless), estos enlaces aportan un campo aun por explotar como es el aprovechamiento del ancho de banda generado por las ondas milimétricas, además de la poca atenuación que ofrece la fibra óptica, siendo en esta 0,2 dB/Km, independientemente de la banda y frecuencia que se esté utilizando.

Otras de las muchas ventajas que tiene la transmisión de radio sobre fibra son la mayor capacidad debido a las altas frecuencias que transportan los datos, mayor flexibilidad ya que se permiten infraestructuras multi servicio, el hecho de que la misma infraestructura que sirve para RoF puede ser utilizada para otros servicios y la asignación dinámica de los recursos ya que puede modificarse el formato de modulación desde la estación central [5].

2.3 Sistemas de transmisión en la banda de ondas milimétricas.

Como se ha visto antes, la actual demanda de transmisión de datos con el consecuente incremento del tráfico en la red requiere unas bajas latencias y sobre todo una no saturación de la red, hasta la llegada del 4G (LTE) con sus respectivas tecnologías, OFDM, MIMO, etc... se empezaron a utilizar las frecuencias desde 3GHz hasta 30GHz, banda conocida como Super High Frequency (SHF).

Con la actual llegada del 5G y la segura llegada de su predecesor 6G se puede seguir utilizando la banda espectral llamada Extremely High Frequency (EHF), que comprende desde 30 hasta 300GHz. Estas dos bandas, SHF y EHF comparten características similares y se les conoce en conjunto como banda de ondas milimétricas ya que sus longitudes de onda no sobrepasan de los 100mm.

Debido a esta característica, los sistemas que utilizan esta banda son capaces de alcanzar velocidades de transmisión muy altas. De hecho, la transmisión de ondas milimétricas es considerada junto con la fotónica de microondas y la conformación de haces como tecnologías habilitadoras de las redes 5G.

2.4 Técnicas de generación fotónica de señales mmW.

La tecnología RoF, comparado con la tradicional transmisión de la señal eléctrica presenta mayor ancho de banda, menor atenuación y permite el uso de ondas milimétricas. Sin embargo, los componentes electrónicos que permiten generar señales a dichas frecuencias tan elevadas presentan importantes limitaciones.

Es por esto por lo que muchos estudios se han interesado en las técnicas para la generación fotónica de señales de longitudes de onda milimétricas. Una de las técnicas más utilizadas para esto es la utilización de un heterodinaje óptico en la cual dos señales ópticas de diferentes longitudes de onda se batan en el fotodetector óptico, a partir de aquí se genera una señal eléctrica a la salida con la longitud de onda correspondiente al espaciado que hay entre las dos señales ópticas. Las dos ondas ópticas vienen dadas por las ecuaciones (1) y (2).

$$E_1(t) = E_{01} \cos(w_1 t + \phi_1) \quad (1)$$

$$E_2(t) = E_{02} \cos(w_2 t + \phi_2) \quad (2)$$

donde E_{01} y E_{02} son las amplitudes de las señales, w_1 y w_2 son las frecuencias angulares y ϕ_1 y ϕ_2 son las fases de las señales ópticas.

La señal a la salida del fotodetector vendrá determinada por:

$$I_{RF} = A \cos[(w_1 - w_2) + (\phi_1 + \phi_2)] \quad (3)$$

donde A viene determinada por E_{01} y E_{02} y la responsividad del fotodetector [6].

Esta técnica es capaz de generar una señal eléctrica hasta la banda de los THz, solamente limitada por el ancho de banda (BW) del fotodetector. Cuando se mezclan dos señales ópticas se consigue una señal de microondas con un alto ruido de fase, ya que las fases de las dos señales mezcladas no están correladas.

Para mitigar este alto nivel de ruido de fase a continuación, se explican brevemente algunas de las técnicas que se han propuesto y demostrado en la literatura previa.

2.4.1 *Optical Injection Locking (OIL).*

OIL es una técnica de sincronización de fase y frecuencia óptica basada en la interacción de fotón-fotón cuando una luz externa ilumina la cavidad del láser. Para generar una señal de microondas o milimétrica de calidad las fases de las dos señales ópticas usadas por el heterodino tienen que ser coherentes. Debido a la frecuencia que se aplica en el láser principal, a la salida de este se genera una portadora y bandas ópticas de diferente orden.

En general la técnica OIL se aplica cuando se tienen fuentes con una potencia muy elevada a la salida y deben combinarse con ruido de baja potencia o ruido de fase. Esto suele ser más difícil de alcanzar en láseres de alta potencia ya que tienden a ser más sensibles a ruidos y vibraciones mecánicas, además de que puede influir también el ruido térmico [7].

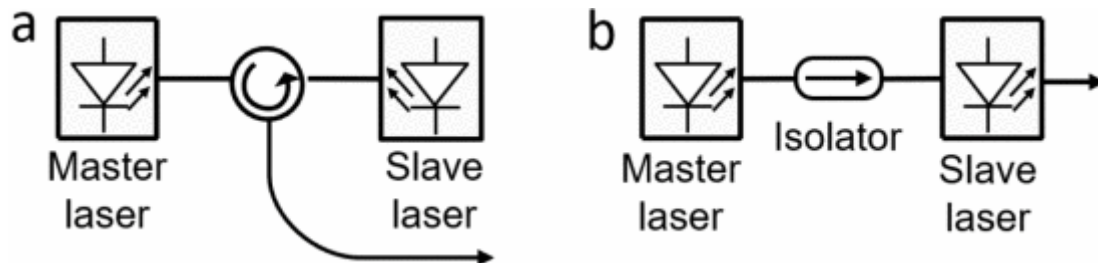


Figura 3. OIL basada en reflexión (a) y transmisión (b)

La luz es inyectada en un circulator (Figura 3 a) o un aislador (Figura 3 b) para evitar cualquier reflexión hacia el láser principal. Cuando la frecuencia de este último está cerca de la frecuencia en campo libre del segundo laser, este se ve forzado a sincronizarse con el láser principal. En comunicaciones ópticas los láseres sincronizados son utilizados como osciladores, reduciendo así la latencia del sistema [8].

2.4.2 *Generación de microondas basadas en un modulador externo.*

Este método de generación fue ya propuesto en 1992, en él una señal eléctrica de doble frecuencia se genera a partir de la modulación con un modulador Mach-Zehnder para suprimir las bandas

laterales ópticas de la señal. Se genera una señal de 36GHz cuando el modulador trabaja a una frecuencia de 18GHz. [9]

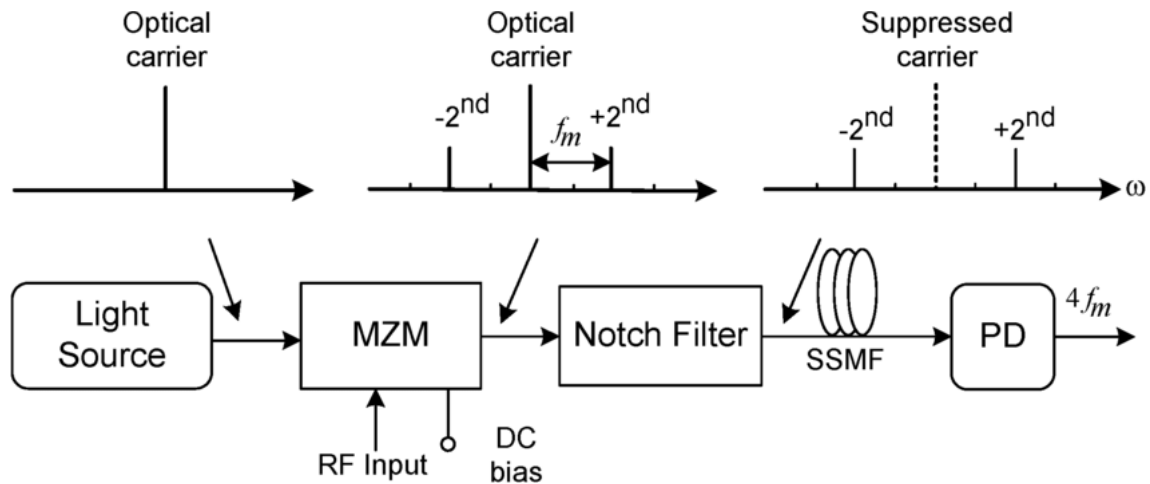


Figura 4. Generación de mmW basado en modulador externo

En 1994 otro método fue propuesto, pero esta vez se utilizaba la modulación en el punto de cuadratura del modulador óptico, generando así una señal a 60 GHz mientras que al modulador se le aplica una señal de 15 GHz [10]. Para asegurar un espectro limpio a la salida del fotodetector se utilizaba un filtro, con un rango espectral (FSR) equivalente a la separación entre las bandas laterales de segundo orden, para eliminar las componentes ópticas que no se querían [11].

Recientemente otro estudio muestra que se puede utilizar un modulador de fase óptico para generar una señal eléctrica cuádruple. En él se utiliza un filtro Fabry-Perot para seleccionar las dos señales de bandas laterales de segundo orden. Una vez seleccionadas estas dos señales se batan en el fotodetector, generando así una señal eléctrica cuya frecuencia es cuatro veces la de la señal de entrada [12].

La ventaja de estos dos métodos es que se pueden generar señales de 60 GHz modulando una de 15 GHz, aunque se deben de utilizar filtros ópticos que aumentan el coste de todo el sistema y lo hace más complejo.

2.4.3 Optical Phase Lock Loop (OPLL)

Otra técnica para la generación de señales mmW es la OPLL, esta técnica necesita que los láseres tengan fluctuaciones de fase solo a frecuencias bajas, para conseguir esto el ancho de línea de estos debe de ser bastante estrecho.

La arquitectura básica para la OPLL se muestra en la Figura 5.

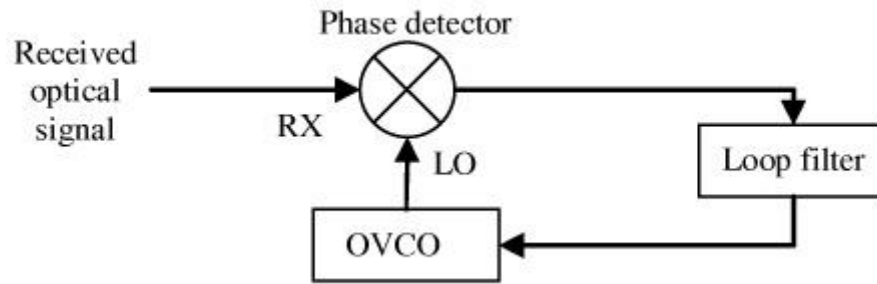


Figura 5. Arquitectura de una OPLL básica

Donde se utilizan tres únicos elementos, un detector de fase, un filtro loop y un oscilador óptico de voltaje (OVCO) En él la fase de la señal recibida se compara con la del oscilador local y devuelve una señal eléctrica proporcional al error de fase [13]. Se sabe que utilizando dos láseres tipo YAG se pueden generar señales microondas desde 6 hasta 34 GHz partiendo de un ancho de línea en estos menor de 1 MHz [14].

2.4.4 Optical Injection Phase Locking (OIPL).

El diagrama de un OIPL se muestra en la Figura 6. Consiste en un láser principal, un láser secundario, un modulador externo, un fotodetector y un sistema de detección de fase (recuadro punteado)

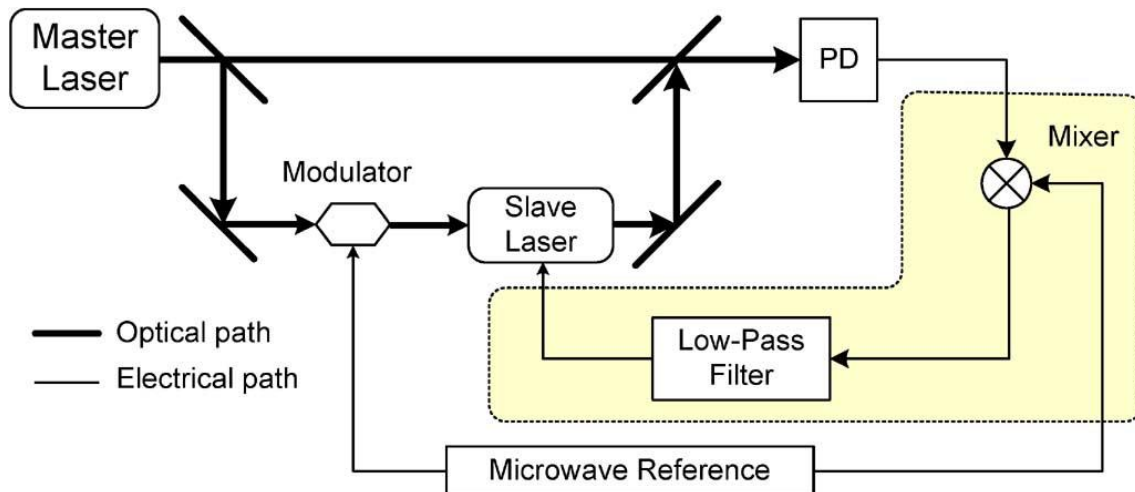


Figura 6. Diagrama OIPL.

La luz proveniente del láser principal se divide en dos canales, un canal se conecta directamente al modulador antes de introducirse en el láser secundario. Este láser tiene un bloqueo para trabajar en una sola banda lateral de la señal modulada entrante, esto forma la parte de OIL del sistema.

El otro canal se combina con la salida del láser secundario y se baten en el fotodetector junto con la salida del filtro paso bajo para alcanzar el bloqueo de fase para la longitud de onda del láser principal.

Se ha demostrado experimentalmente que este sistema ofrece un ruido de fase menor que el OPLL [15].

2.4.5 Generación de microondas a partir de un láser de doble longitud de onda.

Las señales microondas se pueden generar a partir de un láser de doble longitud de onda, separando estas a la frecuencia deseada. Es diferente de algunas técnicas como OIL u OPLL, las dos longitudes de onda no están bloqueadas en fase.

La ventaja de utilizar este tipo de láser es que el sistema se simplifica al no requerir una fuente de referencia de microondas, lo que reduce significativamente su coste. Para asegurarse de que las dos longitudes de onda trabajan a un modo longitudinal simple, se utiliza un filtro ultra estrecho de doble banda Figura 7.

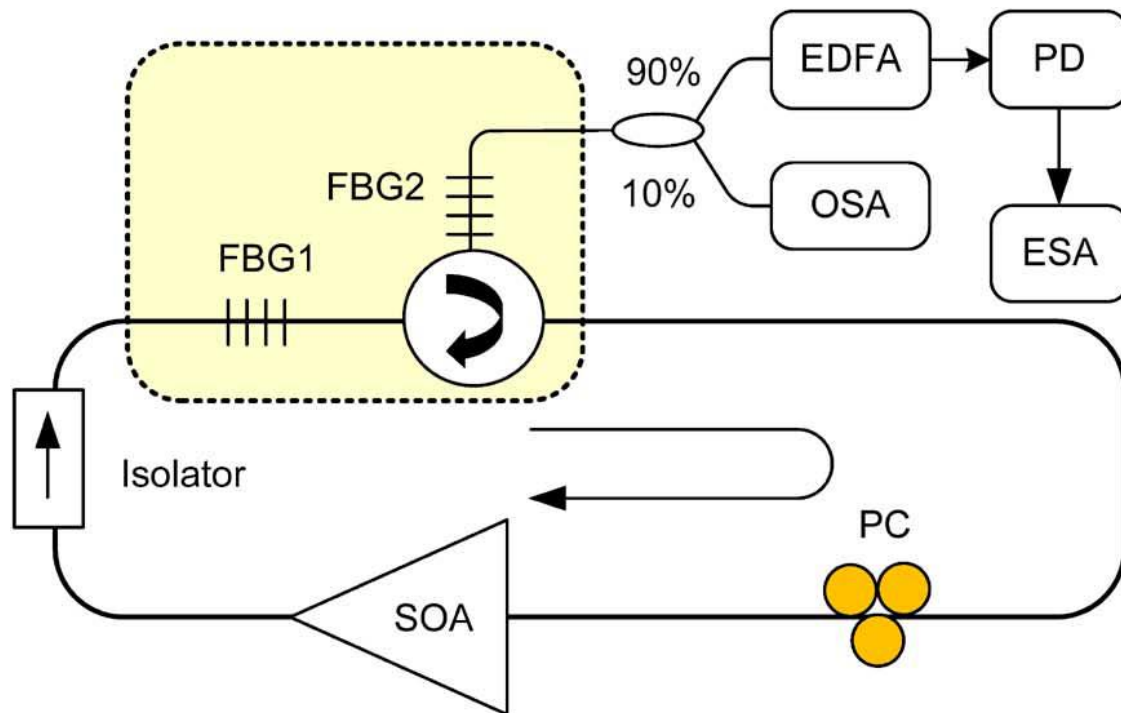


Figura 7. Esquema de un láser de doble longitud de onda.

La clave de esta técnica está en el filtro ultra estrecho. En la fabricación de este se consigue que existan menos fluctuaciones de fase comparado con el método de cambio de fase, en el cual la fibra o la máscara de fase deben de poder moverse lateralmente. Además, el cambio equivalente de fase (EPS) puede ser controlado de manera más precisa ya que solo requiere una precisión del orden de micrómetros en vez de una precisión de nanómetros la cual se utiliza para el método de cambio de fase [16].

Capítulo 3. Generación fotónica de señales mmW basada en multiplicación óptica de frecuencia.

3.1 Descripción del software.

El programa utilizado como se ha comentado antes ha sido el OptiSystem, cuya pantalla principal se muestra en la Figura 8. Se puede observar que el programa cuenta con varias pestañas. La librería de componentes permite elegir los componentes a utilizar, casi todos los componentes no específicos (véase fibra óptica, por ejemplo) se pueden utilizar en el espectro eléctrico u óptico, es decir, la librería de filtros permite elegir tanto filtros eléctricos como filtros ópticos.

En lo que respecta a la barra de herramientas, se tienen las herramientas propias del proyecto, como la generación de un nuevo layout, copiar el mismo layout o borrarlo, además del botón de simulación el cual permite simular el esquema creado, siempre y cuando no haya errores.

Simulación del layout, añadir un nuevo layout y duplicar el mismo, nombre del layout.

Añadir iteraciones y numero de la iteración actual.

Parámetros del layout.

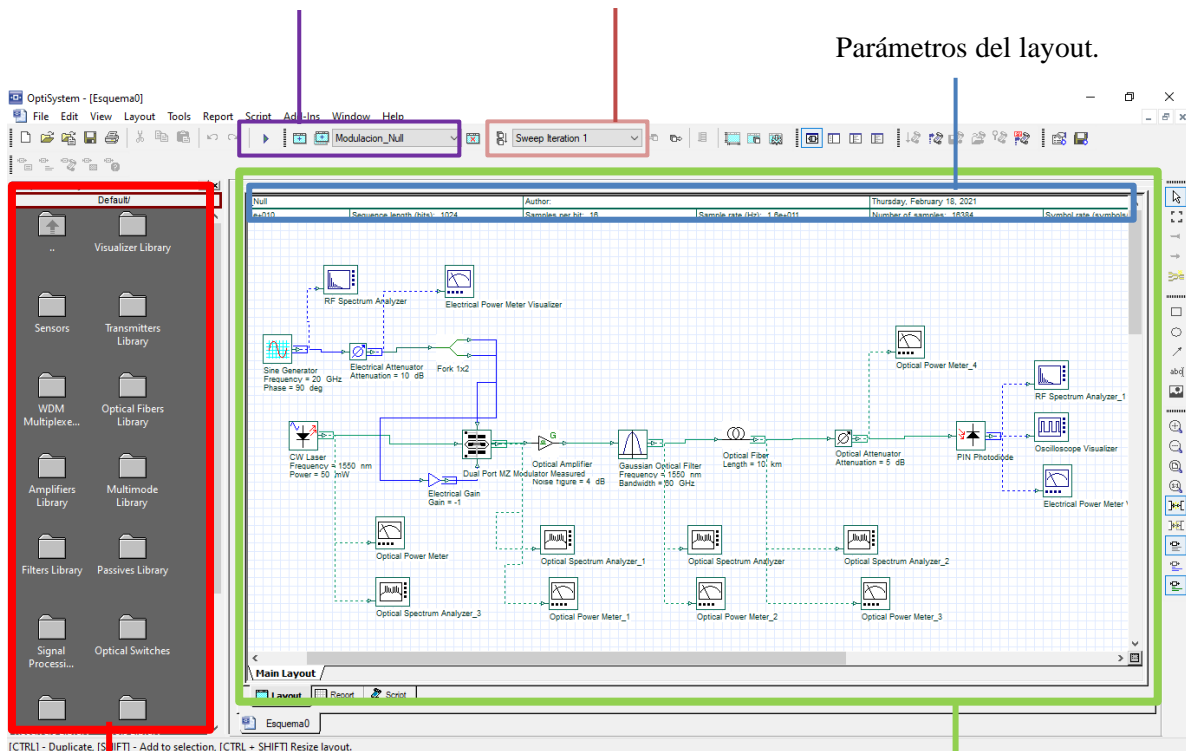


Figura 8. Pantalla del OptiSystem®.

Librería de componentes.

Layout activo.

A la hora de simular el programa permite simular todo el proyecto, por ejemplo, si se tienen varios esquemas creados dentro del mismo proyecto, simular todas las iteraciones del esquema activo o simular solo una iteración de este.

Para las herramientas propias del layout se tiene la creación de iteraciones o sweeps, esto permite realizar un barrido en la simulación, siempre y cuando se tenga algún parámetro en forma de sweep, por ejemplo, se puede tener un sweep en un atenuador que barra desde 0 a 10 dB.

Pasando al layout, donde se colocan los componentes, se tienen dos partes, la primera son los parámetros, esta nos permite definir los parámetros del layout, como, por ejemplo, muestras por segundo, longitud de la secuencia en bits, número de muestras, etc. así como poner el nombre del autor del layout y la fecha.

En cuanto al esquemático, es la zona donde se colocan los componentes, esta funciona con un patrón de colores, verde para conexiones ópticas, azul para conexiones eléctricas.

Una vez entendido el programa con el que se va a trabajar se pasa al desarrollo y explicación de los diferentes puntos estudiados

3.2 Modulación en el punto de supresión de la portadora.

Para utilizar la modulación en supresión de portadora o modulación “NULL” se tiene que variar los parámetros de polarización (bias) del modulador Mach-Zehnder (MZM) para conseguir así que este actúe suprimiendo la portadora.

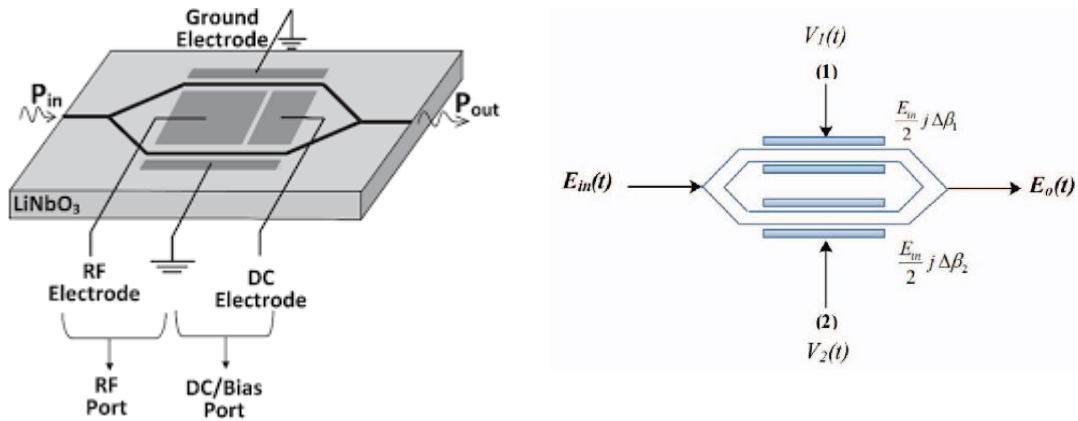


Figura 9. Estructura del Mach-Zehnder: (a) Single-Drive [16], (b) Dual-Drive [18].

La Figura 9 (a) representa un Mach-Zehnder balanceado en configuración single-drive donde se pueden comprobar las conexiones que se tienen, así como el tipo de sustrato utilizado, la Figura 9 (b) muestra el MZM dual-drive que es el utilizado en este trabajo, donde se aprecia el desfase entre una señal del brazo y la otra.

El campo óptico de salida se obtiene como:

$$E_o(t) = \frac{E_{in}(t)}{10^{\frac{IL}{20}}} \cdot \left[\gamma \cdot e^{\left(\frac{j\pi v_2(t)}{V_{\pi RF}} + \frac{j\pi v_{bias2}}{V_{\pi DC}} \right)} + (1 - \gamma) \cdot e^{\left(\frac{j\pi v_1(t)}{V_{\pi RF}} + \frac{j\pi v_{bias1}}{V_{\pi DC}} \right)} \right] \quad (4)$$

donde $E_{in}(t)$ es la señal óptica de entrada, IL son las pérdidas de inserción del propio modulador, $v_1(t)$ y $v_2(t)$ son los voltajes eléctricos de entrada para los brazos superior e inferior del MZM respectivamente, v_{bias1} y v_{bias2} son los puntos de polarización del MZM, $V_{\pi RF}$ es el voltaje de modulación del MZM, $V_{\pi DC}$ es el voltaje de polarización del MZM y γ es el ratio de potencia de la división de las dos guías de onda del MZM.

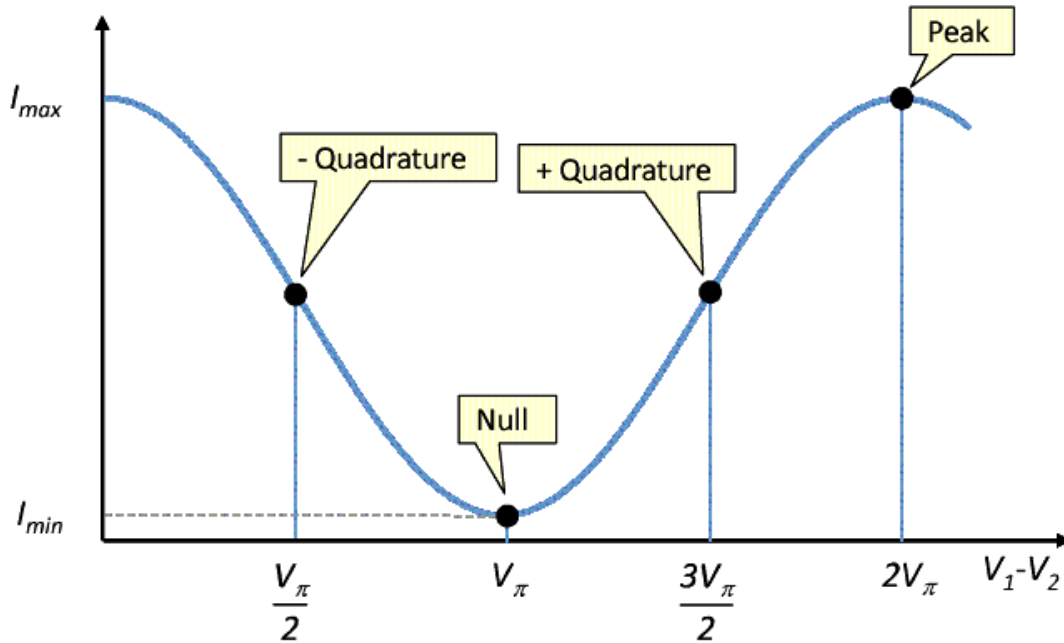


Figura 10. Puntos de polarización típicos del MZM

La Figura 10 representa los 3 puntos de polarización típicos del MZM. En él se pueden apreciar 3 puntos: Supresión (Null), Cuadratura (Quadrature) y Pico (Peak).

Se puede apreciar también los valores de intensidad respecto del voltaje en el funcionamiento del MZM. Si se desarrollara (1) basándose en la Figura 10 los valores de polarización en el MZM serían los siguientes:

Tabla 2. Valores de bias en el MZM para diferentes modulaciones.

Parámetros	NULL	PEAK	CUADRATURA
$V_{\pi DC}$	4	4	4
$V_{\pi RF}$	4	4	4
v_{bias1}	-2	0	-1
v_{bias2}	2	0	1

En este punto se va a utilizar la supresión de portadora (Null). Por tanto, los valores de polarización a incluir dentro del MZM serán de -2 para el punto 1 y 2 para el punto 2 de voltaje de polarización.

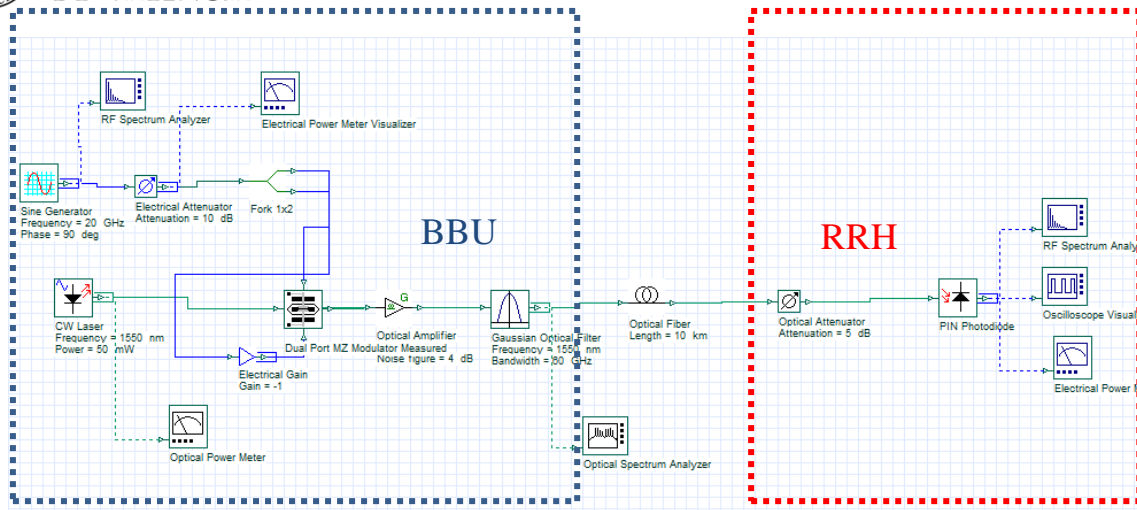


Figura 11 Esquema utilizado en OptiSystem

Una vez montado todo el esquema se procede a incluir los valores que se requieran en los distintos componentes.

La Figura 11 representa el esquema diseñado para comprobar la simulación de la portadora. En él se puede apreciar lo que será la BBU que llegaría hasta el filtro paso banda gaussiano, la fibra óptica y la RRH que estaría formada por el atenuador óptico y el fotodetector.

Detallando un poco más la BBU, está formada por un generador de ondas senoidales, en este caso un tono con $f_0 = 20$ GHz, un atenuador para rebajar la potencia de entrada al MZM y evitar así romper o sobrecalentar el componente y un splitter ya que para que el MZM utilizado es un dual-drive donde cada brazo inserta una desfase producido por la señal eléctrica, para convertir el comportamiento del MZM a single-drive (Figura 11) se introduce un desfase entre de 180° entre ambos brazos consiguiendo que $-v_1(t) = v_2(t)$.

Los componentes ópticos se conforman con; un Laser centrado a 1550 nm, en tercera ventana, generando la portadora óptica, el MZM, una etapa de preamplificación típica formada por un amplificador óptico (erbium doped filter amplifier EDFA) y un filtro óptico gaussiano paso banda (optical pass band filter OPBF).

Una vez vista la parte de generación, la parte de transmisión está formada por distintas longitudes de fibra óptica para el transporte de datos. Por último, la parte de recepción (RRH) está formada por un atenuador óptico y un fotodetector donde se genera la señal eléctrica mediante la conversión óptica-eléctrica.

Tabla 3 Parámetros del MZM para una modulación Null

Extinction ratio	40 dB
Switching bias voltage	4 V
Switching RF voltaje	4 V
Insertion loss	5 dB
Bias voltage1	-2 V
Bias voltage2	2 V

En este caso los valores del MZM hacen referencia a la modulación en el punto de supresión de la portadora Tabla 3, como se ha indicado en la Tabla 2.

Tabla 4 Parámetros amplificador óptico

Gain	5 dB
Noise figure	4 dB

Para el amplificador se ha dejado por defecto la figura de ruido (NF) típica de 4 dB y se utiliza una ganancia respectiva de la longitud de la fibra óptica para así, contrarrestar las pérdidas de esta (0.2 dB/Km) Tabla 4. Una vez en el filtro, Tabla 5, se centra en una frecuencia central donde va a estar nuestra señal $f_0 = 1550$ nm y se elige un ancho de banda suficiente para el cual no elimine ninguna parte de nuestra señal, OptiSystem permite poner la frecuencia en Hz, GHz y THz, así como su equivalente en longitud de onda.

Tabla 5 Parámetros filtro gaussiano.

Frequency	1550 nm
Bandwidth	62 GHz
Insertion loss	0 dB

Para mostrar el funcionamiento y las herramientas de las que dispone OptiSystem se van a representar los espectros con las propias imágenes del simulador. En la Figura 12 se puede ver la señal eléctrica generada a 20 GHz con una potencia de aproximadamente 25 dB.

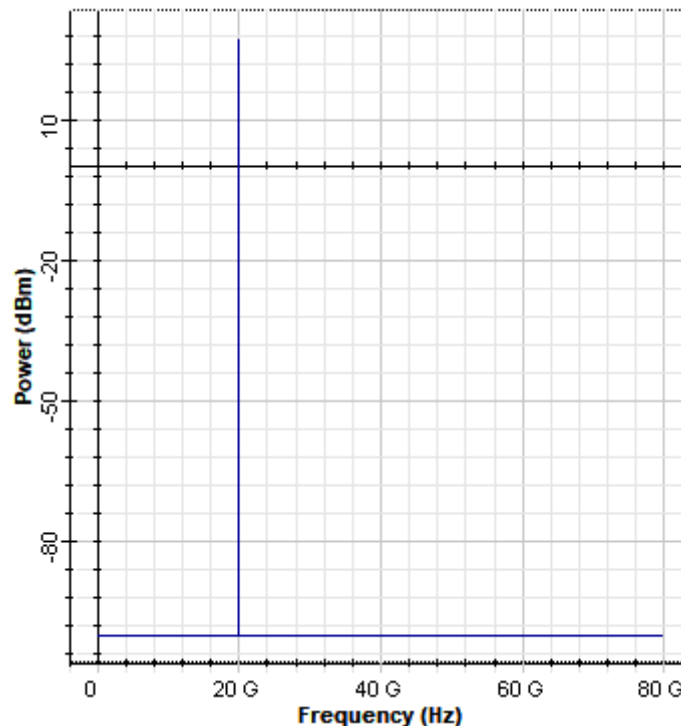


Figura 12 Señal eléctrica generada en 20 GHz (RBW = 10 KHz).

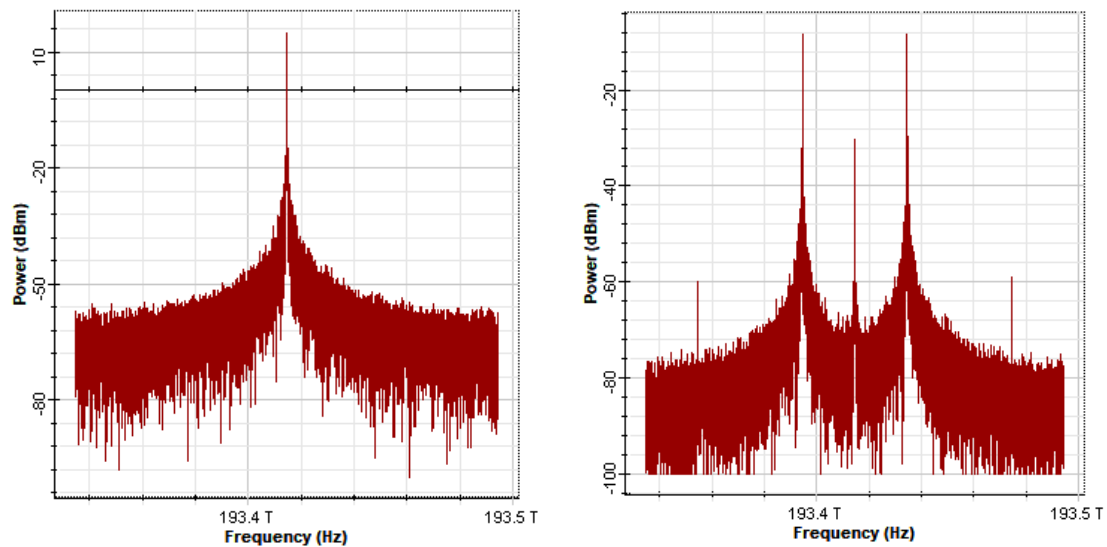


Figura 13 (a) Portadora eléctrica centrada en 1550 nm y (b) Señal modulada en supresión de portadora (RBW = 0.01 nm).

La portadora óptica mostrada en la Figura 13 (a) está centrada en 1550 nm es decir unos 193.4 THz aproximadamente.

Como se había indicado anteriormente, el punto de polarización es en supresión de portadora (Null) y funciona correctamente ya que se puede ver que en la Figura 13 (b) la portadora a 1550 nm tiene un nivel de rechazo respecto a las bandas separadas por 20 GHz de 22 dB, provenientes de la señal eléctrica. En este caso el comportamiento del MZM no es ideal ya que en el caso ideal la portadora quedaría totalmente suprimida y solo quedarían las bandas eléctricas. La potencia de salida del MZM es de -3.17 dBm.

Una vez pasado el bloque de preamplificación óptica (EDFA+OBPF) resulta un espectro óptico como en la Figura 14, donde se puede apreciar que no se ha eliminado ninguna banda interesante pero sí que hay un corte abrupto debido al OBPF con una banda de transmisión 80 GHz, el cual tampoco es ideal.

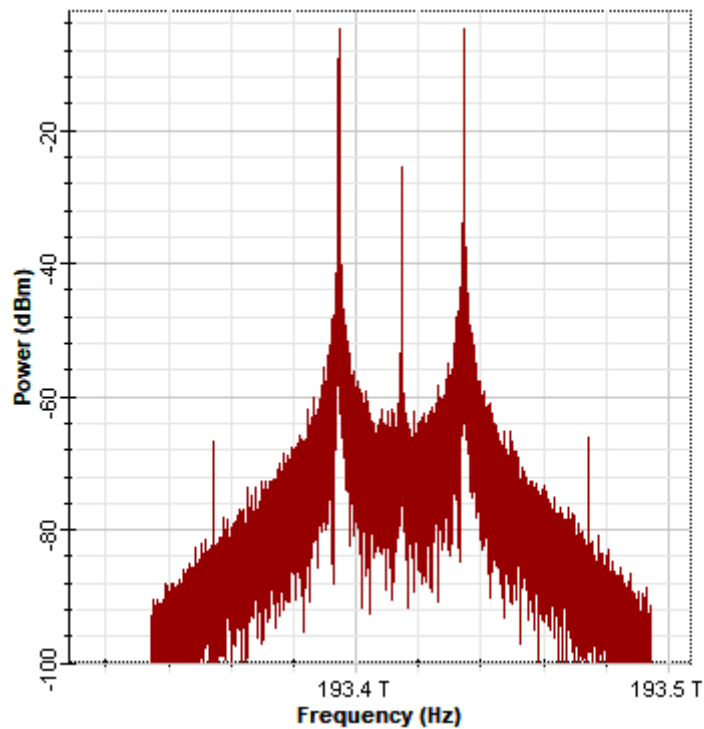


Figura 14. Espectro óptico después del OBPF (RBW = 0.01 nm).

Finalmente, a la salida de la fibra óptica con una longitud de 10 km y tras el atenuador que está situado a la entrada del fotodetector (PD). La potencia óptica recibida (received optical power RoP) resultante es, aproximadamente, de -6.5 dBm. La Figura 15 muestra el espectro de la señal eléctrica recuperada tras la detección óptica donde se observa el resultado del batido de las dos ramas separadas por 20 GHz respecto a la portadora suprimida produciendo la generación de una señal a 40 GHz con una potencia 14 dB mayor que la señal de 20 GHz.

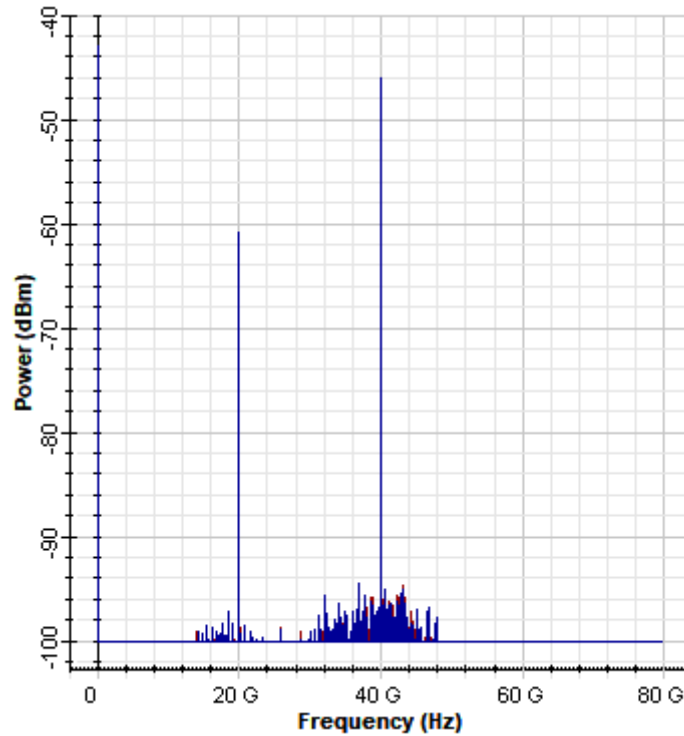


Figura 15 Señal eléctrica en recepción (RBW = 10 KHz).

3.3 Modulación en el punto de cuadratura con filtrado óptico de la portadora.

En este caso se utiliza el mismo esquema que en el apartado anterior como se puede observar en la Figura 16, que está formado por un láser que se utiliza como portadora y la señal eléctrica a modular, esta se modula a través de un MZM, pero, a diferencia con el apartado anterior, cambia el punto de polarización del modulador el cual tiene la polarización en el punto de cuadratura (positiva). Una vez modulada se pasa por un filtro Notch donde se suprime la portadora y después de eso un amplificador óptico junto con un filtro paso banda y el sistema de transmisión de fibra óptica, llegando a un atenuador óptico variable y finalmente un fotodetector.

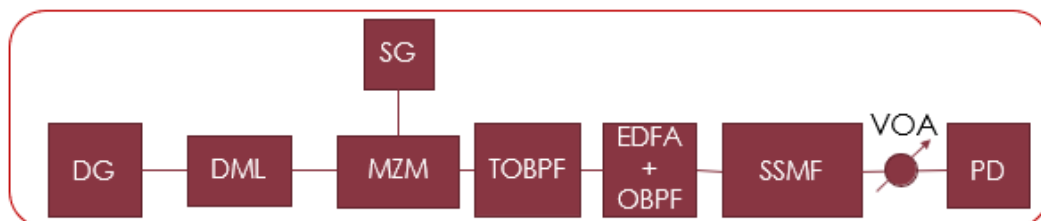


Figura 16 Esquema utilizado para modulación en cuadratura.

El objetivo es comparar los resultados de las diferentes simulaciones, por ello se estudia ahora el comportamiento de la modulación en cuadratura y además la utilización de un filtro para la supresión de la portadora. Para comprobar el punto de cuadratura se reutilizan todos los parámetros anteriores, pero cambiando únicamente el punto de polarización del MZM (bias) siguiendo los valores de la Tabla 2, pero en este caso se observan que esos valores son para una

modulación en cuadratura negativa por lo tanto habrá que cambiar de signo si queremos una modulación en cuadratura positiva Tabla 6.

Tabla 6 Parámetros MZM para una modulación en Cuadratura

Extinction ratio	40 dB
Switching bias voltage	4 V
Switching RF voltage	4 V
Insertion loss	5 dB
Bias voltage1	-1 V
Bias voltage2	1 V

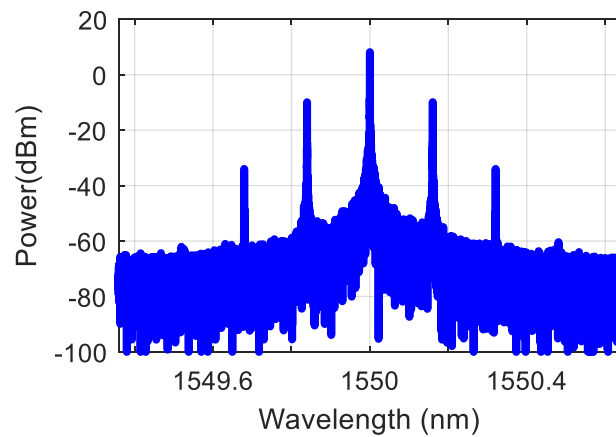


Figura 17 Espectro óptico en cuadratura a la salida del MZM (RBW = 0.01 nm).

En la Figura 17 a diferencia de la modulación Null la portadora tiene un valor más alto que las bandas, 10 dBm.

Finalmente, en la Figura 18 se muestra el espectro eléctrico obtenido después del PD, donde se puede observar que el tono en 20 GHz tiene un nivel mayor que el espectro en Null y, además, aparece otro tono en 60 GHz debido a la modulación de las distintas bandas.

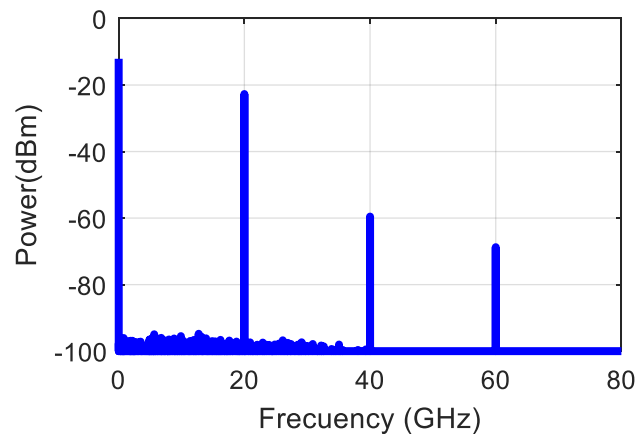


Figura 18 Señal eléctrica en recepción (RBW = 10 KHz).

Además, debido al mayor nivel de ruido que se recibe, aumenta considerablemente la potencia eléctrica recibida del sistema, -22.262 dBm, en comparación con la modulación en punto de supresión de portadora.

Aun así, el tono en 20 GHz tiene aproximadamente 40 dBm más de amplitud que el tono con menor amplitud (60 GHz), es por eso por lo que se va a insertar un filtro invertido para suprimir la portadora.

3.3.1 Optimización del filtro.

Con el objetivo de poder suprimir la portadora a través de un filtro notch, habrá que optimizarlo en ancho de banda de forma que se obtenga mínimo error en recepción (EVM). Para ello se ha simulado el primer esquema junto con los datos.

El EVM no es más que la diferencia entre el voltaje esperado de un símbolo demodulado y el voltaje real del símbolo actual, es decir, cuanto más se acerque el símbolo demodulado al valor ideal establecido, menor EVM y por lo tanto mejor recepción [18].

El DG (data generator) es un sistema esencialmente para añadir datos a la transmisión y además añadir la constelación que se va a utilizar como referencia, en este caso 16-QAM Figura 19. Para la modulación de los datos se ha utilizado un DML (directed modulated laser).

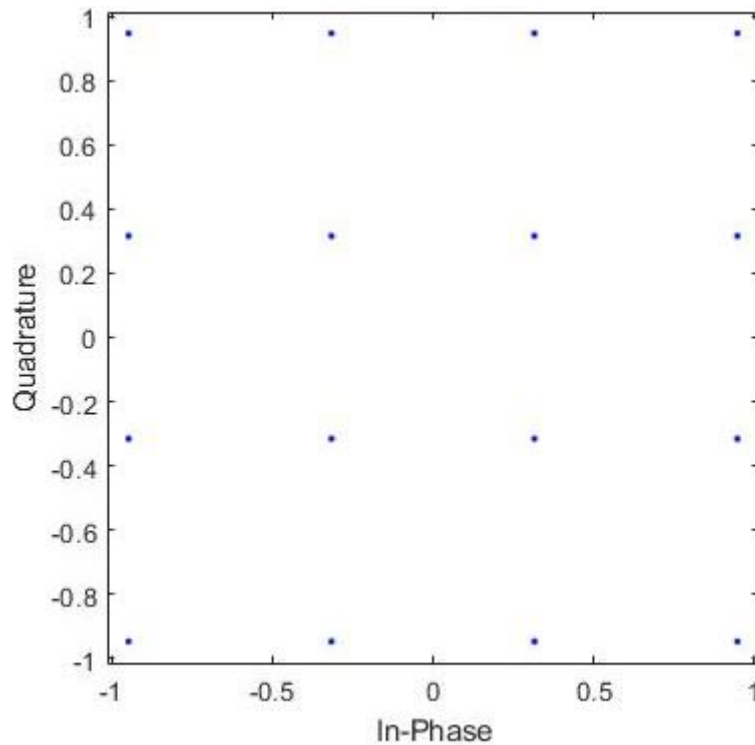


Figura 19 Constelación para 16-QAM.

A su vez también se ha añadido la parte para la demodulación de los datos la cual está formada por los mismos componentes que el DG.

Una vez se ha diseñado todo el sistema, se procede a la transmisión de estos datos, para comparar los resultados. Se han simulado los resultados con 3 tipos de enlace: Optical Back-to-Back (OB2B), 10 km y 25 km de fibra. En cada una de estas simulaciones se ha añadido un sweep (iteraciones) en el atenuador óptico a la entrada del fotodetector, para comprobar como varia la constelación en la recepción respecto a la potencia de entrada en el detector.

Con estas iteraciones, se será capaz de determinar un ancho de banda óptimo para el filtro, el cual nos proporcione un valor adecuado de EVM. Siguiendo la teoría, un EVM aceptable es aquel que

no pasa del 12.5% [19]. Para la optimización del filtro se ha hecho un barrido a diferentes anchos de banda (BW) respecto el EVM. Los barridos han sido realizados para los 3 tipos de enlace Figura 20.

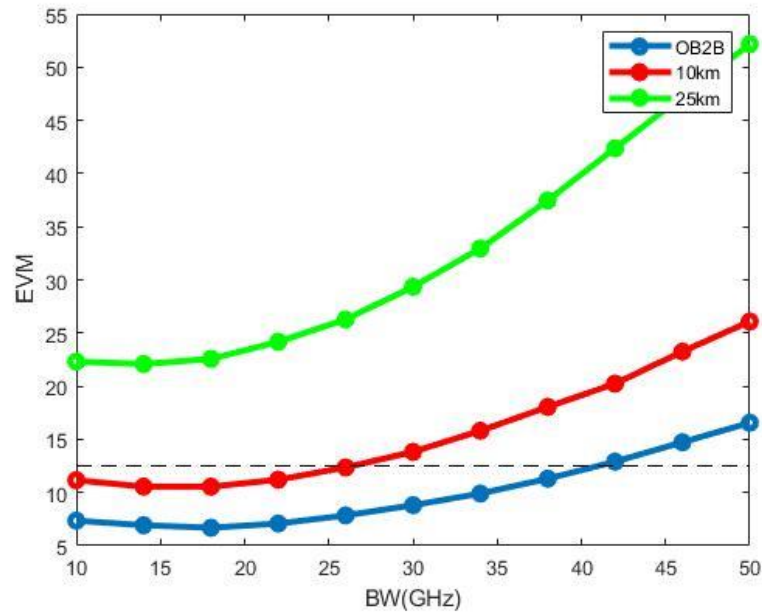


Figura 20 EVM (%) vs BW (GHz) del filtro.

Se puede apreciar en la figura anterior que, para longitudes de fibra, el BW (ancho de banda) óptimo, es decir, el que menor EVM genera se encuentra entre los 14 y 18 GHz, se ha optado por tomar un valor medio entre esta horquilla tomando como valor óptimo $BW = 15$ GHz, el cual será el que se utilice en los próximos apartados. Si observamos la Figura 16, se observa que la anchura de banda estimada para el filtro es correcta y compatible con la separación entre las bandas para garantizar una supresión de la portadora sin afectar a los datos transmitidos por las bandas laterales.

3.3.2 Filtrado en la Unidad de Banda Base (BBU).

Una vez tomado el valor óptimo del ancho de banda, se procede a utilizar el filtro en la Unidad de Banda Base, es decir, antes de que los datos lleguen a la fibra para ello se coloca el filtro gaussiano invertido antes del filtro paso banda, con el objetivo así, de suprimir la portadora, pero en vez de utilizando la propia modulación Null, utilizando el filtro.

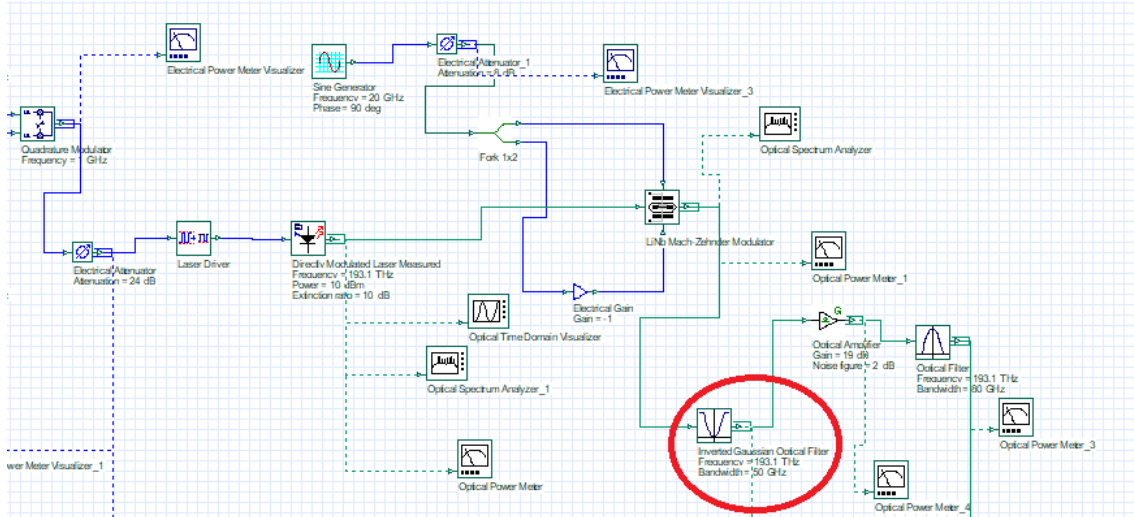


Figura 21 Esquema con filtro invertido en la BBU.

Para poder comparar los resultados y evaluar que técnica es mejor, se ha realizado una simulación con datos en un esquema parecido al de la Figura 16. Evaluando el EVM vs RoP, es decir el error en las constelaciones de recepción contra la potencia óptica en recepción. El resultado se muestra en la Figura 21.

Para que el EVM sea menor que 12,5% el fotodetector necesita tener suficiente potencia para la recepción. Cuanto mayor sea la potencia en el PD mejor EVM se obtendrá. Es por ello por lo que se ha procedido a utilizar un sweep en el atenuador que barre desde 0 a 10 dB de atenuación para poder comparar así diferentes potencias en la recepción.

Para la parte de la transmisión por fibra se ha optado por modificar el EDFA (Amplificador) de manera que contrarreste solo las pérdidas causadas por la fibra óptica (0,2 dB/km).

Se utiliza la medida de EVM y no otras, BER (bit error ratio), OSNR (optical signal-to-noise ratio) debido a que el ruido generado por el sistema es Gaussiano y es preferible utilizar el EVM para la medida de calidad del sistema óptico [20]. Además, el estándar 3GPP establece los límites para el EVM.

Para el filtrado de la portadora se han utilizado los siguientes parámetros en el filtro notch Tabla 7.

Tabla 7 parámetros para filtro invertido

Frecuency	193.1 THz
Bandwidth	15 GHz
Insertion loss	0 dB
Depth	60 dB
Order	1

En cuanto al MZM se utiliza en un punto de polarización donde module la señal en cuadratura.

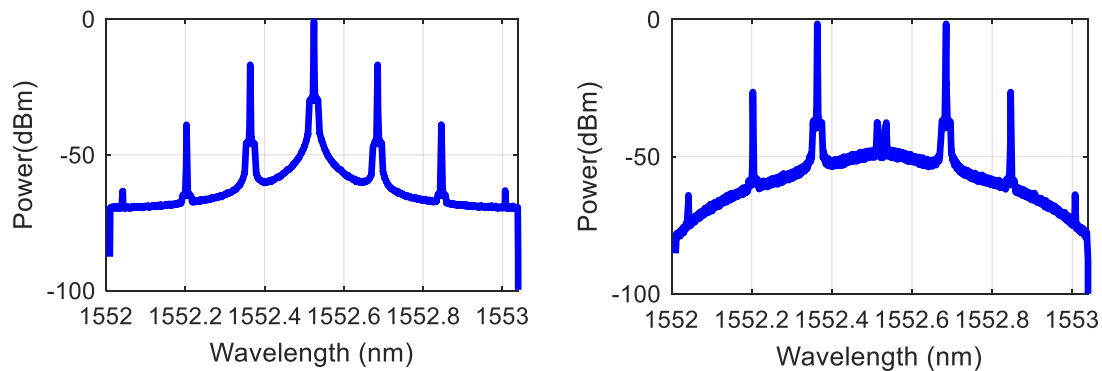


Figura 22 (a) espectro óptico después de MZM a la entrada del PD (RBW = 0.01 nm) (b) espectro óptico después del filtrado invertido. (RBW = 0.01 nm).

Una vez modulada la señal, habiendo pasado por el DML, Figura 22 (a), se introduce por el filtro Notch y el filtro paso banda (Figura 22 b).

Como se puede apreciar en la imagen, el filtro Notch, centrado en la longitud de onda de la portadora realiza su trabajo suprimiendo la portadora y por lo tanto bajando la potencia que recibe el PD, teniendo una potencia de 0.042 dBm.

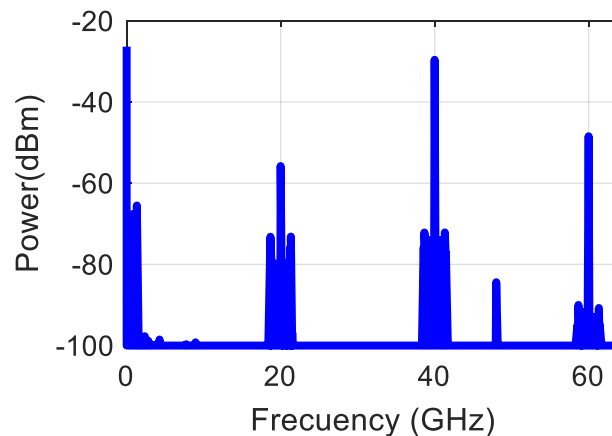


Figura 23 Espectro eléctrico en el PD. (RBW = 10 KHz).

En la Figura 23 se puede observar la señal que se había generado a 20 GHz modulada a distintas frecuencias $2f_0, 3f_0$, etc. Lo importante y a su vez, el objetivo de este punto es comparar si el EVM recibido utilizando este esquema de supresión de portadora mediante filtro invertido es mejor o peor que en esquema anterior donde también se ha suprimido la portadora, pero mediante el modulador variando su polarización.

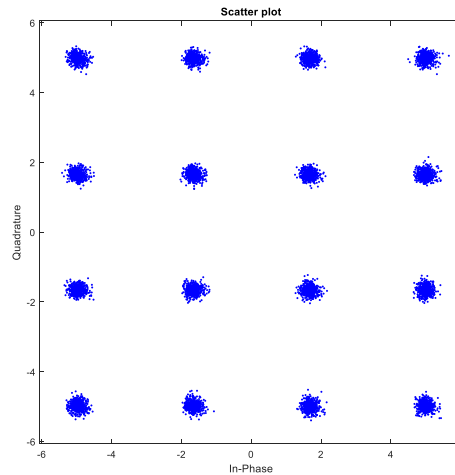


Figura 24 Constelación recibida para OB2B.

La costelación mostrada en la Figura 24 es el que corresponde a un enlace OB2B y una potencia de 10.6 dBm.

Para el estudio del EVM se ha realizado un script en Matlab con la finalidad de comprobar cómo se comporta el EVM a medida que aumenta o disminuye la potencia en el fotorreceptor. Para el estudio y la muestra de estas gráficas, se ha intentado partir desde el mismo punto de inicio, en potencia, para así comprobar que, con la misma potencia y diferentes tipos de enlaces, el EVM se comporta diferente.

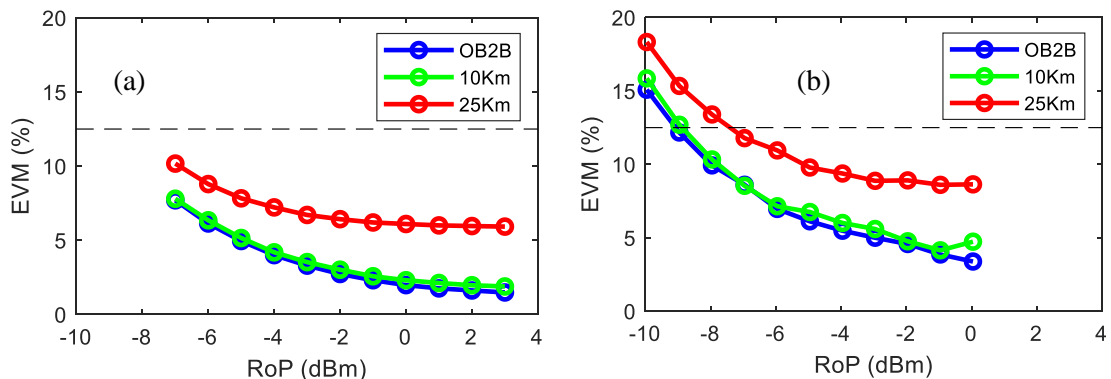


Figura 25 EVM vs RoP (a) para modulación en el punto de supresión de portadora y (b) para supresión de portadora con filtro invertido.

En la Figura 25 (a) se puede observar el EVM resultante de la simulación en el punto de supresión de la portadora. Se puede comprobar la línea punteada que marca el 12,5% máximo para una buena transmisión. Las 3 curvas tienen el mismo comportamiento, pero conforme se va aumentando la longitud del enlace el EVM empeora, aunque se contrarresten las pérdidas por atenuación en la línea estas insertan otros elementos en el sistema que hacen que el % de EVM empeore, como puede ser la dispersión causada por la fibra óptica.

Obviamente, la situación ideal se da cuando se tiene un tipo de enlace OB2B, en estos enlaces no existe fibra óptica ya que actúan como latiguillo y se desprecia la atenuación típica en la fibra, dispersión cromática, etc....

En cuanto al EVM correspondiente al filtrado de la portadora óptica, Figura 25 (b), se tiene un peor porcentaje de EVM, esto puede ser debido a el propio filtro, ya que este introduce algunos componentes que generan menos potencia en el PD, además del propio filtrado de la portadora.

Se puede apreciar que cuando se llega a una potencia menor a unos -9 dBm aproximadamente, el porcentaje de EVM supera el recomendado para transmisión del 12,5%, se tienen EVM del orden de 15 hasta 18%. Las 3 curvas se comportan prácticamente igual y solo empeora el porcentaje a medida que la longitud de este aumenta.

Una vez comparadas las dos graficas se puede concluir que para una transmisión de datos utilizando este esquema lo más recomendable para que esta sea una óptima transmisión, es utilizar la modulación en el punto de supresión de portadora, ya que permite potencias más bajas en el fotodetector y además garantiza la transmisión por debajo del porcentaje establecido en las potencias utilizadas.

Es por esto por lo que, para el último punto de este trabajo, se va a utilizar el método de modulación en el punto de supresión de la portadora para la transmisión de dos señales eléctricas a diferentes frecuencias.

3.4 Modulación en el punto de supresión de portadora para transmisión de dos señales eléctricas.

En este punto se ha utilizado el mismo esquema que para las primeras simulaciones del trabajo, con la diferencia de que, en vez de generarse una sola señal eléctrica, se han generado dos señales que se introducían por los dos brazos del MZM Figura 26.

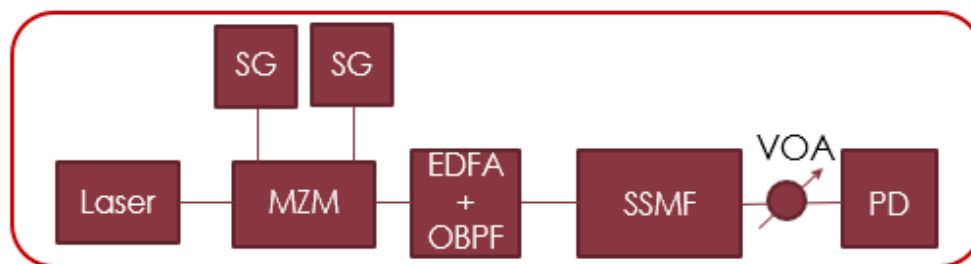


Figura 26 Esquema utilizado para la transmisión de dos señales eléctricas.

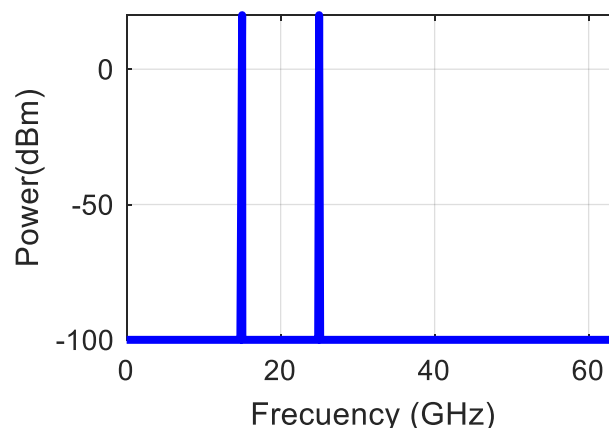


Figura 27 Doble señal generada (RBW = 10 KHz).

Las dos señales se han generado a distintas frecuencias (Figura 27) e intentando que estén suficientemente separadas para facilitar la recepción, en este caso la simulación se ha realizado con señales generadas a 15 y 25 GHz.

En cuanto al MZM se ha utilizado un punto de polarización para supresión de portadora con los siguientes parámetros Tabla 8.

Tabla 8 parámetros del MZM para modulación en Cuadratura

Extinction ratio	40 dB
Switching bias voltage	4 V
Switching RF voltaje	4 V
Insertion loss	3 dB
Bias voltage1	0 V
Bias voltage2	4 V

En este caso no se han utilizado los mismos datos que en el primer esquema para punto de supresión de portadora en cuanto a bias se refiere, pero sí que sigue siendo punto de supresión de portadora debido a que para la modulación Null $V_1 - V_2 = V_\pi$ y por lo tanto esta condición se cumple ya que $V_\pi = 4$.

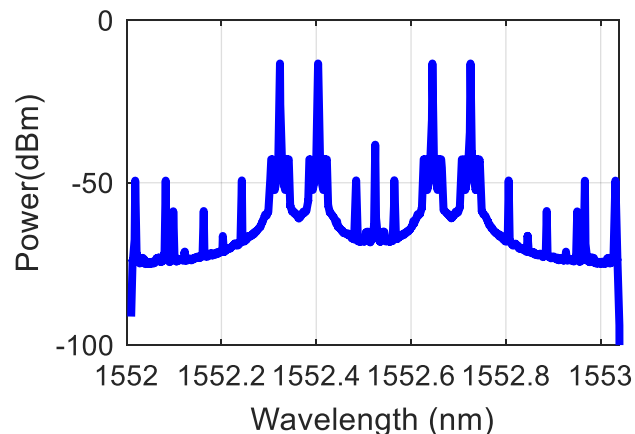


Figura 28 Espectro óptico después de MZM (RBW = 0.01 nm).

En la Figura 28 se pueden observar las dos señales generadas a diferentes frecuencias moduladas y la supresión de portadora generada por el MZM. Entre las bandas generadas y donde se ha centrado la señal existen 15 y 25 GHz respectivamente, así que entre las bandas laterales existen 30 GHz y 50 GHz.

Una vez modulada la señal, esta pasa por un amplificador donde se ha seguido la misma metodología hasta ahora utilizada, configurarlo de manera que contrarreste las pérdidas aplicadas por la fibra óptica para que a la entrada del fotorreceptor se tenga una potencia de unos 4 dBm aproximadamente en el mejor caso.

Los parámetros utilizados para el filtro paso banda se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9 Parámetros utilizados para el filtro paso banda

Frequency	193.1 THz
Bandwidth	80 GHz
Insertion loss	1.3 dB

Una vez en el receptor, se tiene una señal eléctrica como la de la Figura 29, donde se puede observar que existen las señales de las bandas 30 y 50 GHz con potencias de -30 dBm y -32 dBm respectivamente y diferentes productos de intermodulación como $f_1 - f_2$, $f_1 + f_2$, etc.

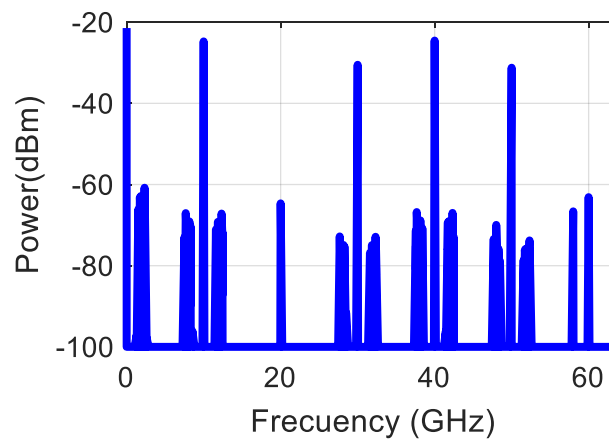


Figura 29 Señal eléctrica recibida en el fotodetector para OB2B (RBW = 10 KHz).

Una vez pasado el fotodetector, se utiliza un filtro paso banda rectangular con el fin de filtrar el tono que se quiere y evitar así los productos de intermodulación anteriormente mencionados. En este caso se ha optado por generar dos señales a 15 y 25 GHz, por lo tanto, los tonos que se querrán filtrar son los de 30 y 50 GHz.

Con el objetivo de comprobar el comportamiento en la recepción de la señal y su EVM se ha procedido de la siguiente manera: Se activan los dos generadores de señal y se filtra el tono, después del fotodetector, en 30 o 50 GHz. El otro procedimiento es similar, pero en vez de activar los dos generadores de señal se activa solo el de la señal que se desee, aun así, se sigue filtrando para evitar intermodulaciones.

Utilizando esta metodología se puede estudiar qué manera de transmitir datos proporciona mejor EVM y por lo tanto mejor recepción.

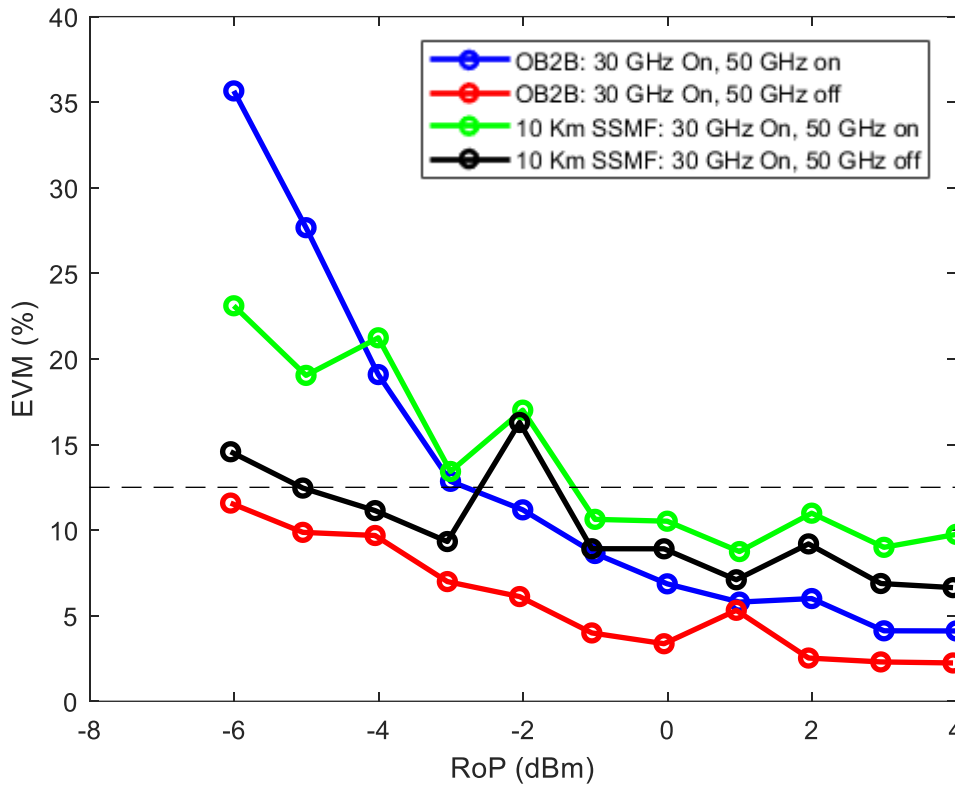


Figura 30. EVM vs RoP (OB2B y 10 Km SSMF) para la señal transmitida a 30 GHz cuando solo se transmite ésta y cuando además se transmite otra señal a 50 GHz.

En la Figura 30 se puede apreciar el EVM (%) proporcionado en la recepción del tono de 30 GHz. Como se ha explicado antes, las curvas azul y verde corresponden al filtrado de este tono con los dos generadores de señal activos. A su vez las curvas roja y negra corresponden al filtrado de este tono, pero solo con el generador de señal a 15 GHz activado. La modulación en el punto de supresión de portadora es altamente no lineal, por ese motivo, cuando se introducen dos señales en distintos canales se genera un deterioro de la señal, pero si se tiene cierto margen de RoP aún es posible transmitir la señal.

Para RoP bajas, alrededor de -5 dBm, el EVM es mucho mejor cuando se tiene un único generador activado que cuando se filtra el tono con los dos generadores activos, entre 10% y 20% menor. En cambio, para RoP altas se tiene un comportamiento bastante parejo, obviamente para un tipo de enlace OB2B se tiene menor EVM (%) que para un enlace de 10 Km.

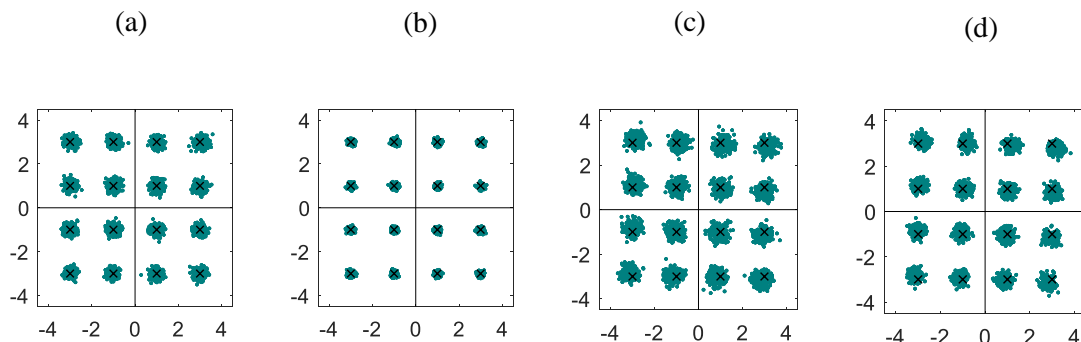


Figura 31. Constelaciones recuperadas para la señal 16-QAM sobre 50 GHz: (a) OB2B (se transmite solo 50 GHz), (b) OB2B (se transmite señal a 30 y 50 GHz), (c) 10 km SSMF (se transmite solo 50 GHz), (d) 10 Km SSMF (se transmite señal a 30 y 50 GHz),

En la Figura 31 se pueden apreciar las constelaciones para la recepción del tono de 30 GHz donde se ha filtrado el tono con los dos generadores activos (a) y (c) se obtiene una peor constelación que para el filtrado del tono con el generador de señal a 15 GHz activado (b) y (c). Esto concuerda con la Figura 30, donde el EVM (%) para estos casos es mejor.

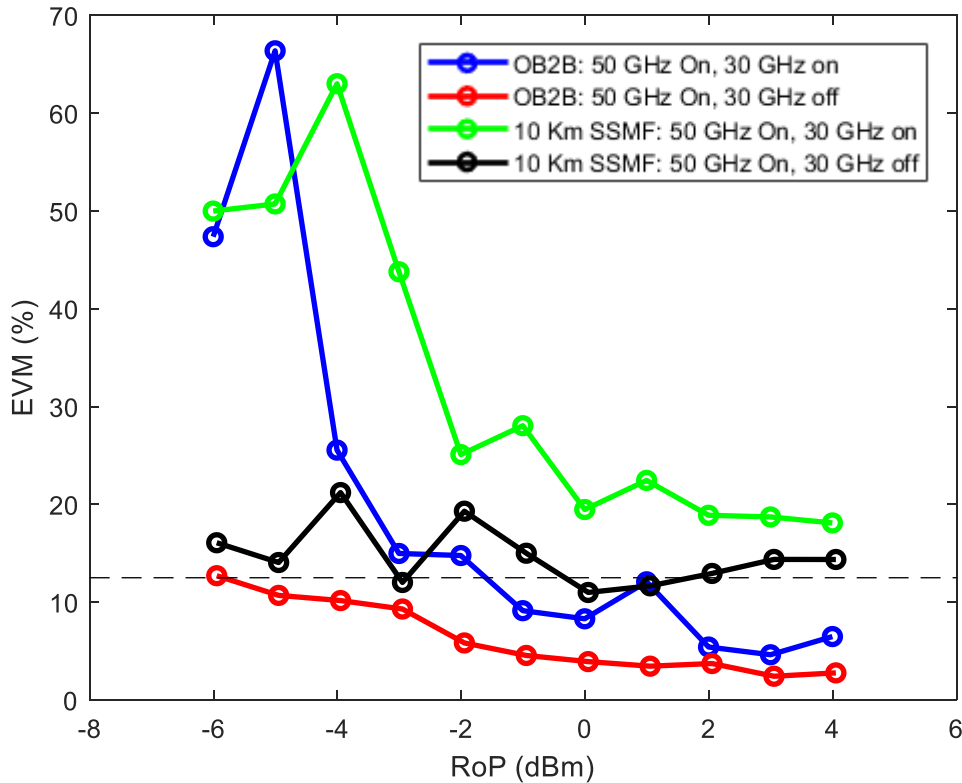


Figura. 32. EVM vs RoP (OB2B y 10 Km SSMF) para la señal transmitida a 50 GHz cuando solo se transmite ésta y cuando además se transmite otra señal a 30 GHz.

En la Figura.32 se tiene el EVM (%) vs RoP (dBm) pero para el caso del tono a 50 GHz, al igual que pasaba en la Figura 30. El EVM para las señales con un solo generador activo, es mucho mejor que cuando se tienen los dos generadores activos, alrededor de un 35%.

Se puede apreciar que la falta de muestras por bit en la simulación afecta más a tonos de frecuencias más altas.

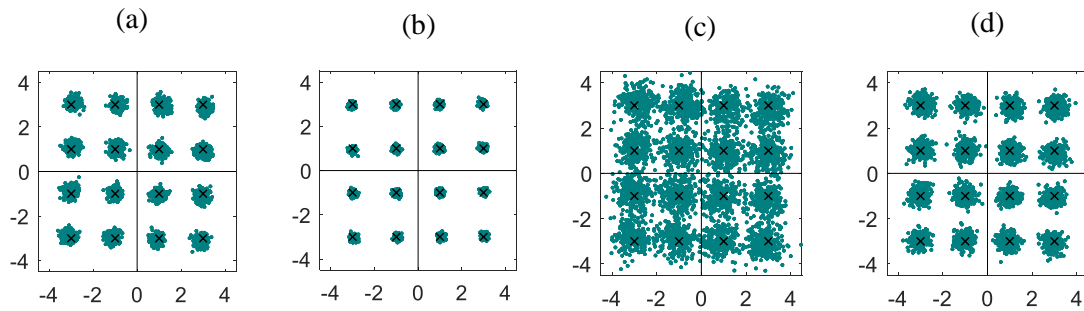


Figura. 33. Constelaciones recuperadas para la señal 16-QAM sobre 50 GHz: (a) OB2B (se transmite solo 50 GHz), (b) OB2B (se transmite señal a 30 y 50 GHz), (c) 10 km SSMF (se transmite solo 50 GHz), (d) 10 Km SSMF (se transmite señal a 30 y 50 GHz).

Para este tono se ha procedido de la misma manera que con el tono de 30 GHz, debido a la frecuencia más alta del tono, generación de más dispersión, etc., las constelaciones son bastante peores que para frecuencias más bajas Figura 33.

Capítulo 4. Conclusiones y líneas futuras.

Haciendo un balance general de todos los resultados obtenidos a lo largo del trabajo, donde se han estudiado diferentes metodologías y esquemas para la generación fotónica de señales de longitudes de onda milimétrica para su uso en el estándar 5G. Donde también se ha evaluado el funcionamiento del MZM en diferentes puntos de polarización, así como el uso de filtros optimizados para la recepción de los datos con el objetivo de optimizar la calidad de señal recibida (EVM) se pueden tomar las siguientes conclusiones.

Ante la transmisión de los datos sobre fibra óptica, cuanto mayor sea la potencia en el fotodetector mejor será la recepción de los datos, generando un EVM (%) bastante bajo, pero siempre teniendo en cuenta las limitaciones de potencia que tiene el fotodetector de manera que no se le introduzca mucha potencia y no se llegue a romper.

En el caso de la transmisión de un tono generado no es eficiente utilizar un filtro Notch para la supresión de la portadora, ya que genera un EVM peor, alrededor de 2% más alto, que cuando se utiliza la modulación en el punto de supresión de portadora.

En cuanto a la transmisión de dos tonos generados simultáneamente, hay que diferenciar la calidad de la señal recibida cuando se filtra un tono con los dos generadores activos y cuando se filtra con solo un generador. Se tiene una mejor calidad en el segundo caso ya que al generar dos tonos, se genera mayor potencia de ruido y se pueden generar también más productos de intermodulación rebajando hasta un 35% el EVM y rebajando la calidad de la recepción. También cabe destacar que cuanto más alto sea el tono en frecuencia, peor EVM se tendrá en la constelación recibida.

En cuanto al 5G se está comprobando que el espectro óptimo para todas las aplicaciones que se quieren incorporar está por encima de los 30 GHz. Ya existe un estándar final del 5G llamado "Release 15" definido por la organización 3GPP donde se establece que los fabricantes de chips, industrias y fabricantes de móviles podrán empezar a desarrollar esta tecnología como apoyo para el LTE de manera que vayan preparando la tecnología para dentro de unos años poder llevarla al consumidor final como tecnología independiente.

El 5G traerá una mejora a las comunicaciones debido a sus mejoras tanto de latencia, como ancho de banda, además de todas las implementaciones posibles como el IoT, conectividad, sistemas autónomos ya sea en automóviles, fabricas e incluso las propias viviendas (domótica).

Todo esto sumado al mayor ancho de banda sobre las tecnologías LTE permitirá al 5G mayor capacidad de transmisión de datos y menor colapso en el tráfico de las comunicaciones permitiendo estar mucho más conectados de manera mucho más rápida.

Aunque se han vertido varias hipótesis sobre el 5G que hacen dudar a la población de si todos los beneficios desde un punto de vista tecnológico compensan los posibles perjuicios que pueda ocasionar su uso, como, por ejemplo, frecuencias más altas que podrían tener efectos adversos para la salud, aun no hay ninguna demostración medica que afirme esto, ya que en un principio las frecuencias a utilizar no generan radiación ionizante.

Además, la llegada del 5G obligara a una renovación prácticamente total en los equipos y dispositivos actualmente en uso, como por ejemplo la utilización de más nodos para conseguir una máxima cobertura, además de la preparación de los nuevos dispositivos electrónicos para que sean capaces de interactuar con la nueva tecnología. Otra de los problemas a la hora de la utilización de esta nueva tecnología será la llegada de esta a las poblaciones más rurales, como actualmente pasa con el 4G-LTE.

Estando el 5G tan cerca de la vida cotidiana y habiendo visto todas las ventajas y avances tecnológicos que promete esta tecnología, mirando al futuro hay muchos campos donde aún no se ha indagado suficiente y los cuales podrían mejorar más si cabe el estándar, campos interesantes para el estudio serian la transmisión multibanda utilizando el punto de polarización lineal del MZM, ya que el Mach-Zehnder es el modulador externo más conocido. También se



podría estudiar la capacidad para aumentar el número de bandas incorporando esta nueva tecnología, además los diferentes montajes simulados en este trabajo se podrían llevar a un escenario más experimental realizando el montaje de estos.

Capítulo 5. Bibliografía.

- [1] S. Ivanov, “Todo lo que debes saber sobre el 5G”, in “N+1,Ciencia que suma”, Dic. 2018. [Online]. Available: <https://nmas1.org/material/2018/12/01/5g-explicacion>.
- [2] “What is 6G? | 6G Radio Frequency”, *Millimeter Wave Products / Waveguide Products / MM Wave Components*, 2021. [Online]. Available: <https://www.miww.com/what-is-6g/>. [Accessed: 23- March- 2021].
- [3] R. Sánchez Martín, “Las redes cRAN (Cloud Acces Network)”, in “Master en ingeniería de comunicaciones móviles”, Oct. 2019. [Online]. Available: <http://micm.es/noticias/las-redes-cran-cloud-radio-access-network/>.
- [4] *Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital - LTE (4G)*. (s. f.). Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital - Digitalización e Inteligencia Artificial - Telecomunicaciones e Infraestructuras Digitales. <https://advancedigital.mineco.gob.es/banda-ancha/tecnologias/movil/Paginas/LTE.aspx>
- [5] J. Beas, G. Castañón, I. Aldaya, A. Aragon-Zavala, and G. Campuzano, “Millimeter-Wave Frequency Radio over Fiber Systems: A Survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp 314-315, (2013).
- [6] J. Yao, “Microwave Photonics”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp 314-315, (2009).
- [7] R. Paschotta, article on 'injection locking' in the *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*, 1. edition October 2008, Wiley-VCH, ISBN 978-3-527-40828-3.
- [8] Z. Liu and R. Slavík, "Optical Injection Locking: From Principle to Applications," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 43-59, 1 Jan.1, 2020, doi: 10.1109/JLT.2019.2945718.
- [9] J. J. O'Reilly, P. M. Lane, R. Heidemann, and R. Hofstetter, “Optical generation of very narrowlinewidth millimeterwave signals,” *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 25, pp. 2309–2311, 1992.
- [10] J. J. O'Reilly and P. M. Lane, “Fiber-supported optical generation and delivery of 60 GHz signals,” *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 16, pp.1329–1330, 1994.
- [11] J. Yao, “Microwave Photonics”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp 316-317, (2009).
- [12] P. Shen, N. J. Gomes, P. A. Davies, W. P. Shillue, P. G. Huggard and B. N. Ellison, “High-purity millimeter-wave photonic local oscillator generation and delivery,” in *Proc. Int. Microw. Photonics Topical Meeting*, Sep. 10–12, 2003, pp. 189–192.
- [13] V. Ferrero and S. Camatel, "Optical Phase Locking techniques: an overview and a novel method based on Single Side Sub-Carrier modulation," *Opt. Express* **16**, 818-828 (2008)
- [14] K. J. Williams, “6–34 GHz offset phase locking of Nd: YAG 1319 nm nonplanar ring lasers,” *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 18, pp. 1242–1243, Aug. 1989.
- [15] J. Yao, “Microwave Photonics”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp 315-316, (2009).
- [16] J. Yao, “Microwave Photonics”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 3, pp 317-318, (2009).
- [17] H.K.Shankarananda, Shreyas S S, Guruprasad B “External Modulators and Mathematical Modeling of Mach-Zehnder Modulator”,vol 3, no 12, pp 217-218, Dec. 2016.
- [18] M. A. Elsherif and A. Malekmohammadi, "Performance improvement of Mapping Multiplexing Technique (MMT) using Dual-Drive Mach-Zehnder Modulator at 40 Gb/s," 2014



23rd Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), 2014, pp. 1-6, doi:
10.1109/WOCC.2014.6839937.

[19] Rohde & Schwarz, O. Werther, and R. Minihold, "LTE System Specifications and their Impact on RF & Base Band Circuits," Rohde Schwarz App Note, p. 37, 2013.

[20] B. Nebendahl *et al.*, "EVM as new quality metric for optical modulation analysis," 2013 *Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference*, 2013, pp. 1-4, doi:
10.1109/SIEPCPC.2013.6551002.