



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Transmisión de Señales SSB-OOFDM en Redes Ópticas WDM de Alta Eficiencia Espectral

Autor: Francisco Israel Chicharro López

Director 1: Beatriz Ortega Tamarit

Director 2: José Mora Almerich

Fecha de comienzo: 1/12/2012

Lugar de trabajo: Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas del iTEAM

Objetivos —

El objetivo general del trabajo es la integración en una red óptica WDM de señales OFDM moduladas ópticamente y filtradas para la transmisión de tan solo una banda lateral, con el propósito de una mejora considerable de la eficiencia espectral.

Metodología —

El estudio de la literatura relacionada con las modulaciones ópticas de OFDM abarca la primera parte del trabajo. Una vez se opta por la técnica de modulación externa y detección directa, se realiza la puesta a punto de los equipos AWG y DPO. El procesamiento en generación y recepción se realiza con dos métodos: el software incluido en los equipos AWG y DPO, por un lado, y la implementación que realizamos en Matlab de un generador y un receptor de OFDM. Ambos métodos son comparados en términos de BER y EVM, optando por el método implementado.

Tras el análisis de las estructuras de transmisión OFDM de modulación óptica en doble banda lateral y su demostración experimental, se transmite a través de un enlace óptico para evaluar el efecto de supresión de portadora. Debido a la baja calidad de la señal recibida, se aplica un filtro óptico para la supresión de una de las bandas laterales. En este caso la señal transmitida es SSB-OOFDM, de la cual se evalúa la calidad de la supresión de la banda con los parámetros CFSR y ER, y se certifica su viabilidad a partir del BER y el EVM.

Por último se multiplexan en longitud de onda dos señales SSB-OOFDM y se demuestra su calidad en términos de EVM y BER para longitudes de fibra de 50 y 70 km.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio —

La implementación de los algoritmos en Matlab centran el desarrollo de los prototipos. El programa de generación permite configurar los parámetros de la señal OFDM: número de subportadoras de datos, ancho de banda, métodos de ecualización comb-type y block-type, nivel de clipping, formatos de modulación de los datos, duración de la señal e inclusión de prefijo y postfijo cíclicos. En recepción, se obtiene el espectro recibido, el EVM y el BER para la configuración recíproca a la utilizada en generación.

El trabajo de laboratorio ocupa la mayor parte de este trabajo. En primer lugar se pone a punto el sistema de transmisión y detección OFDM con dos métodos diferentes: por un lado, con el software incluido en los equipos AWG y DPO; por otro, con el prototipo diseñado en Matlab para tal efecto.

Una vez evaluadas las características de la señal a través del enlace eléctrico, se introducen en el enlace óptico. La señal OFDM es modulada externamente a través de un láser DFB y un MZM; la señal a la salida del modulador, en doble banda lateral, es detectada y procesada offline en Matlab. Se transmiten distintas señales OFDM, variando el ancho de banda, la modulación de los datos, la potencia del láser y la potencia de la señal OFDM, comprobando cómo afecta dicha variación a la calidad en recepción. Tras evaluar el efecto de supresión de portadora, introduciendo 70 km de fibra óptica estándar monomodo, se envían las señales con modulación en banda lateral única, para lo cual se filtra la señal en doble banda lateral y, a partir de los valores CFSR, ER, EVM y BER, se evalúa su calidad. Comprobadas las prestaciones de la señal SSB, se desarrolla un sistema de transmisión por multiplexación en longitud de onda, transmitiendo señales SSB-OOFDM dentro de un canal DWDM.

Resultados —

Se ha transmitido una señal OFDM a través del enlace eléctrico ubicada en 7.5 GHz con 1 GHz de ancho de banda, con 99 símbolos de 171 portadoras de datos moduladas en QPSK cada una a una velocidad de 1.50 Gb/s, ecualizada con el método block-type y demodulada con un EVM=7.51 % y BER<2.95·10⁻⁵.

Se ha transmitido sobre un sistema OOFDM una señal a 7.5 GHz, modulando externamente con un láser DFB que emite una portadora óptica a 1550.92 nm. Sobre el sistema se modifican diferentes parámetros, demostrando que se obtienen los mejores resultados para potencias del láser y de la señal OFDM máximas, número de símbolos de la constelación mínimo y ancho de banda de la señal OFDM mínimo.

Se transmite una señal DSB-OOFDM de 1 GHz de ancho de banda a 7.5 GHz, modulada externamente con un láser cuya portadora óptica es de 1550.92 nm, y se incluyen 70 km de fibra óptica para demostrar el efecto de supresión de portadora, siendo paliado con la introducción de un filtro óptico tras el MZM de 0.2 nm de ancho de banda y frecuencia central de 1550.87 nm. Se obtiene una calidad de SSB de CSPR=17.66 dB y ER=25 dB, y una calidad de señal recibida de EVM=18.13 % y BER<2.95·10⁻⁵.

Dos señales SSB-OOFDM se multiplexan en longitud de onda para demostrar la transmisión sobre un sistema WDM-SSB-OOFDM dentro de un canal DWDM de 50 km con portadoras ópticas ubicadas en 1550.881 y 1551.119 nm. Se obtiene una calidad de filtrado de CSPR=22.18 dB y ER=26.05 dB para la banda inferior, y CSPR=18.17 dB y ER=27.60 para la banda superior, siendo la calidad de la señal recibida de EVM=27.60% y BER = 1.18·10⁻⁴ para la banda inferior, y EVM=27.01% y BER=1.77·10⁻⁴ para la banda superior. Para una distancia de 70 km con portadoras ópticas situadas en 1550.884 y 1551.103 nm y un ancho del canal de 43.31 GHz, se obtienen unos valores de EVM de 30.60% y 28.27% y de BER de 4.71·10⁻⁴ y 2.75·10⁻⁴ en las bandas inferior y superior, respectivamente.

Líneas futuras —

Se va a tratar de aumentar las prestaciones de los métodos de ecualización basados en block y comb-type, así como de implementar métodos alternativos. El uso de estructuras FBG permitirá mejorar la etapa de filtrado; con un mayor roll-off se reducirá la separación entre los canales que componen WDM y mejorará la eficiencia espectral. El aumento de la capacidad transmitida pasará por el uso de la multiplexación por polarización. Asimismo se va a estudiar la utilización de SOAs para amplificar la señal y convertir la longitud de onda, así como el uso de RSOAs para transmitir señales OOFDM en el enlace ascendente de esquemas que emplean la centralización de fuentes ópticas. Por último, se evaluará la capacidad de distintas fibras ópticas de plástico para la transmisión de señales OOFDM.

Publicaciones —

- F. CHICHARRO, J. MORA, B. ORTEGA, **SSB-OOFDM Signal Transmission in WDM Highly Spectral Efficient Optical Networks**, Optics Express, (pendiente de envío).

Abstract —

OFDM is a popular technique used for wired and wireless communication systems due to its effectivity against intersymbol interference. Optical OFDM appears because of the need of high data rates, supported by digital signal processing. In this work, Optical OFDM is experimentally demonstrated over two structures. Once electrical OFDM signal is properly transmitted and generated, it is tested on a DSB structure. The addition of a fiber link triggers the carrier suppression effect, therefore a SSB system by filtering optically one of the sidebands is required. Finally, WDM technique is experimentally demonstrated via the composition of two SSB-OOFDM signals whose bandwidth is inside a DWDM channel.

Autor: Chicharro López, Francisco Israel, email: frachilo@upvnet.upv.es

Director 1: Ortega Tamarit, Beatriz, email: bortega@dcom.upv.es

Director 2: Mora Almerich, José, email: jmalmer@iteam.upv.es

Fecha de entrega: 01-12-14

ÍNDICE

I. Sistemas ópticos de transmisión OFDM	6
I.1. Redes ópticas de acceso.....	6
I.2. Estado del arte.....	7
I.3. Técnicas de transmisión de señales OOFDM	7
I.4. Justificación de la estructura WDM-SSB-OOFDM	9
II. Demostración experimental del sistema OOFDM basado en DSB	11
II.1. Enlace eléctrico	11
II.1.1. Generación y recepción en RFXpress y SignalVU	12
II.1.2. Generación y recepción en Matlab.....	14
II.1.3. Figuras de mérito y parámetros de calidad.....	15
II.1.4. Comparativa de los métodos de generación y recepción.....	16
II. 2. Esquema óptico DSB.....	16
II.2.1. Elementos ópticos	17
II.2.2. Verificación experimental del sistema OOFDM basado en DSB	17
II.2.3. Efecto de supresión de portadora	21
III. Transmisor óptico WDM de señales SSB con OFDM.....	24
III.1. Modulación óptica de una sola banda lateral (SSB)	24
III.1.1. Figuras de mérito	24
III.1.2. Establecimiento de los parámetros del filtro óptico SSB	25
III.1.3. Filtrado SSB de señales OOFDM	27
III.2. Multiplexación en longitud de onda de canales ópticos (WDM).....	30
III.2.1. Prestaciones del canal individual	30
III.2.2. Sistema experimental WDM-SSB-OOFDM.....	33
IV. Conclusiones y líneas futuras.....	36
IV.1. Conclusiones.....	36
IV.2. Líneas futuras	36
Agradecimientos	38
Referencias	39

I. Sistemas ópticos de transmisión OFDM

Las telecomunicaciones se han convertido en unos años en una necesidad fundamental para la sociedad. La facilidad con la que las personas pueden interactuar “aquí y ahora” ha provocado que, como muestra la Fig. 1, el tráfico de datos haya incrementado y siga haciéndolo exponencialmente.



Fig. 1. Tráfico de datos mensual el Internet [1]

Es evidente que las redes requieren cada vez tanto de una mayor capacidad como de un uso más eficiente de las mismas. La técnica OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ha adquirido bastante popularidad en los últimos años, gracias a las ventajas que aporta como la modulación de varias portadoras en paralelo, la facilidad de ecualización o la robustez ante desvanecimientos del canal. Debido a sus características, es la técnica de modulación utilizada en los estándares Wi-Fi (802.11a, 802.11n, 802.11ac), WiMAX (802.16), LTE o DVB-T [2].

La necesidad de transmisión de alta velocidad a través de un medio físico con distorsiones lineales inherentes que puedan ser corregidas adecuadamente hace de la fibra óptica uno de los medios más atractivos, en términos de pérdidas por atenuación y altas capacidades [3]. OOFDM (Optical OFDM) reúne las bondades de OFDM y de la fibra, convirtiéndose en una técnica de no muchos años de vida con grandes esperanzas en la carrera por la siguiente generación del transporte de 100 Gbps Ethernet [4].

I. 1. Redes ópticas de acceso.

La parte que conecta la oficina central con los usuarios finales se denomina red de acceso. El incremento de las tasas que se tienen que transmitir ha provocado que la fibra óptica sea una de las soluciones aplicadas para adaptarse a la demanda solicitada, gracias a sus bajas pérdidas y su gran ancho de banda.

La FTTx (Fiber To The x, siendo $x = \{\text{Home, Building, Curb}\}$) está poco a poco implantándose, pues las tecnologías previas no están completamente amortizadas. En la Fig. 2 se muestran los tres tipos de FTTx.

Las PONs (Passive Optical Networks) son una solución interesante para el desarrollo de FTTx, ya que el coste en mantenimiento es bajo y simple, debido a la ausencia de componentes activos.

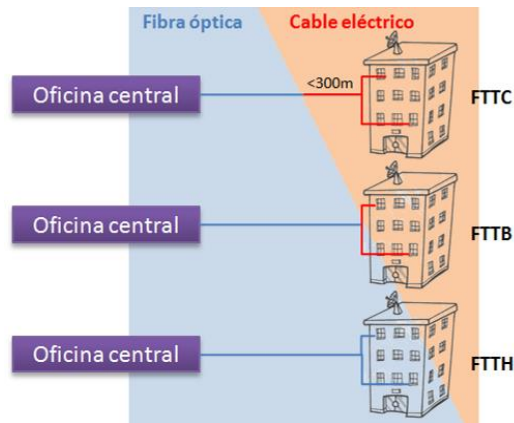


Fig. 2. Estructuras FTTx en PONs.

1.2. Estado del arte.

OOFDM, junto con la EDC (Electronic Dispersion Compensation), se propuso como una técnica para conseguir transmitir señales a lo largo de grandes distancias. Aparecen los primeros artículos con simulaciones en 2006 con detección directa por parte de Lowery y Armstrong [5] o Djordjevic y Vasic [6], y con detección coherente por parte de Shieh y Athaudage [7]. Los sistemas OOFDM con fibra multimodo no van a ser tratados en este documento; no obstante, Tang ha propuesto avances considerables como la modulación adaptativa [8] y demostraciones en tiempo real utilizando FPGAs que se pueden extender a la fibra monomodo [9, 10].

Como señala [11] y se puede observar en la Tabla 1, los primeros artículos fueron difíciles de publicar, de modo que la mayoría consistían en simulaciones. El principal problema radicaba en el uso de cientos de subportadoras que se podrían batir, dando lugar a millones de interferencias producidas por el efecto Kerr. Lowery [12] plantea unas reglas de diseño respecto de la potencia transmitida para evitar las no linealidades que presentaba la fibra, indicando la potencia apropiada para un conjunto de longitudes del enlace. Fonseca [13] en 2006 y Schmidt [14] en 2007 muestran una versión experimental de detección directa, mientras que Jansen [15] hace lo propio en 2007 con la detección coherente.

Referencia	Detección	Experimental / Simulación	Año
[5]	Directa	Simulación	2006
[6]	Directa	Simulación	2006
[7]	Coherente	Simulación	2006
[13]	Directa	Experimental	2006
[14]	Directa	Experimental	2007
[15]	Coherente	Experimental	2007

Tabla 1. Primeros artículos de OOFDM con SSMF Offline.

1.3. Técnicas de transmisión de señales OOFDM

La técnica OFDM, propuesta por Chang en 1966 [16], se clasifica dentro de las modulaciones multiportadora, cuya ventaja principal es la modulación de varias subportadoras en paralelo,

generando varios subcanales que se comportan de manera ideal individualmente. La característica particular de OFDM es la ortogonalidad de sus subportadoras, que permite su superposición de modo que el ancho de banda ocupado es menor. Para evitar la aparición de ISI (InterSymbol Interference) se extiende de forma cíclica el símbolo temporal.

Existen numerosas técnicas de transmisión de señales OOFDM. Estas las podemos clasificar en función de la modulación de la señal RF, del tipo de detección, de la fibra utilizada o del tratamiento digital de la señal, entre otras. La Fig. 3 muestra los diferentes criterios de clasificación.

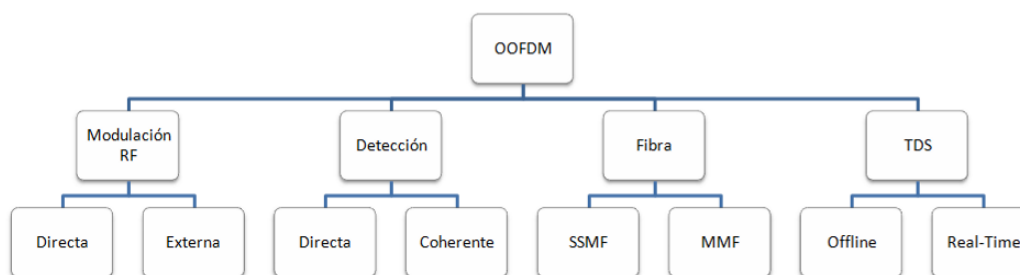


Fig. 3. Clasificación de los sistemas OOFDM.

La señal RF puede modularse de forma directa, a través de un láser, o de forma externa, a través de un láser y un modulador. La modulación directa tiene un bajo coste y es el sistema adecuado para redes metropolitanas y de acceso; no obstante, sus dos problemas principales son su respuesta no lineal y la distorsión que introduce el chirp. Como alternativa está la modulación externa a través de un MZM (Mach-Zehnder Modulator) o un EAM (ElectroAbsortion Modulator), que presenta una mejor linealidad y ancho de banda, a la vez que el chirp puede eliminarse por completo [17, 18]. La modulación externa se realiza habitualmente de dos maneras: utilizando un MZM single-drive, en el que se introduce la señal OFDM en la frecuencia de RF, o utilizando un modulador IQ, comprendido por dos MZM, en el que se introducen las señales real e imaginaria en banda base.

Los sistemas de detección se clasifican en detección directa (DO-OOFDM) y detección coherente (CO-OOFDM). Los primeros tienen un PD (PhotoDetector) simple, pero hay que imponer un ancho de banda de guarda entre la portadora óptica y las subportadoras de OFDM para evitar productos indeseados, lo que reduce la eficiencia espectral. Los segundos requieren de un láser adicional para regenerar la portadora óptica en recepción, y son más sensibles al ruido de fase [19, 20]. Dentro de los detectores coherentes podemos distinguir entre heterodinos, que utilizan una frecuencia intermedia antes de llegar a banda base, y homodinos, en los que se baja directamente a banda base.

Podemos encontrar sistemas que hacen uso de la SSMF (Standard Single-Mode Fiber) y otros que emplean la MMF (MultiMode Fiber). La MMF transporta diferentes modos, es fácil de instalar y manejar, lo que implica un bajo coste, pero sus pérdidas la hacen poco conveniente. La SSMF es

el medio adecuado para situaciones de más largo alcance. Coexisten ambos medios en los últimos experimentos, como se puede ver en [21] para MMF, y en [22] para SSMF.

El último criterio se basa en el procesado de la señal OFDM en generación/recepción. Para trabajar en RT (Real-Time), es necesario el uso de FPGAs y de funcionalidades avanzadas que se recogen en [20]. Los trabajos Offline son más frecuentes en la literatura, con el uso de Matlab como DSP para generar/recibir la señal y su aplicación sobre DAC/ADC para el muestreo.

La Fig. 4 ilustra las diferentes posibilidades que se han recogido en los párrafos anteriores en función de las diferentes clasificaciones.

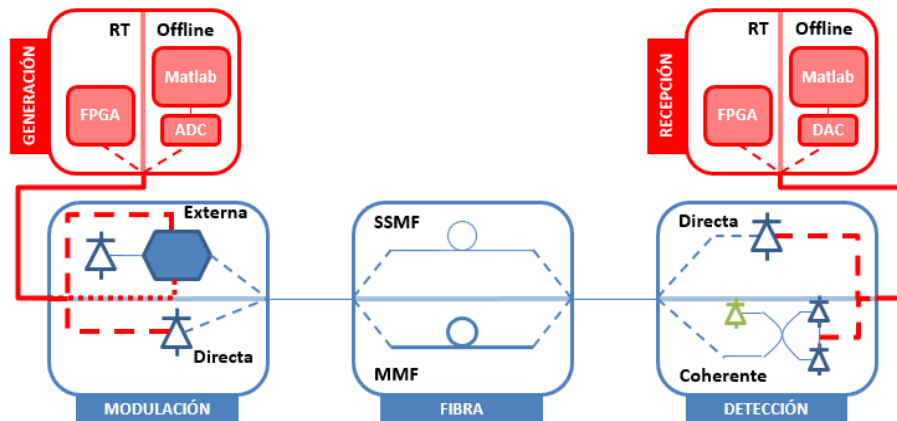


Fig. 4. Esquema de los diferentes tipos de sistemas OOFDM.

1.4. Justificación de la estructura WDM-SSB-OOFDM.

La necesidad del aumento de capacidad en las redes insta al diseño de nuevas técnicas de transmisión. La señal OFDM tiene características inherentes que la hacen adecuada para las transmisiones a lo largo de grandes distancias, tales como la resistencia al desvanecimiento en frecuencia o la facilidad de ecualización de los efectos dispersivos. No obstante, el efecto de supresión de portadora se hace presente, por lo que para superar dicho inconveniente se suele optar por suprimir una de las bandas laterales de la señal modulada, evitando la penalización de potencia y aumentando de forma inmediata la eficiencia espectral. Este método es conocido como SSB-OOFDM.

La aplicación de técnicas de multiplexación favorecen el uso eficiente del ancho de banda disponible. En el caso de la multiplexación por división en longitud de onda (en adelante, WDM), permite la transmisión de diferentes señales SSB-OOFDM dentro de un canal de comunicaciones, tratando de juntar al máximo las señales de modo que no se generen interferencias entre ellas. En las demostraciones experimentales realizadas hasta la fecha, se han conseguido tasas de 10×12.5 Gb/s [23] con un $BER=3 \cdot 10^{-3}$ tras 50 km.

El principal objetivo de este trabajo es la demostración de la técnica de multiplexación WDM sobre señales ópticas OFDM en las que se transmite sólo una de las bandas laterales. Para ello, la

Sección II se centra en la demostración del sistema óptico de transmisión OFDM, dedicando la parte II.1 a la señal eléctrica y la parte II.2 al esquema óptico de modulación. La Sección III abarca el filtrado de una de las bandas de la señal óptica, en la parte III.1, y el multiplexado en longitud de onda de dos señales SSB-OOFDM, en la parte III.2. Por último, la Sección IV resume las conclusiones obtenidas tras las demostraciones experimentales y las líneas futuras de trabajo.

II. Demostración experimental del sistema OOFDM basado en DSB

En la Fig. 5 se ilustra el diagrama de bloques de un sistema OOFDM basado en DSB. Se trata de un sistema con un esquema offline de modulación externa y detección directa, en el que se transmite a través de un enlace de fibra SMF.

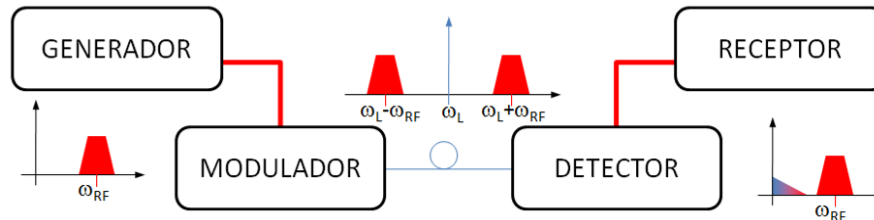


Fig. 5. Diagrama de bloques del sistema OOFDM.

El bloque generador obtiene una señal OFDM centrada en una frecuencia f_{RF} . Dicha señal eléctrica se introduce en un modulador electroóptico externo, obteniendo a la salida una señal óptica en DSB (Double SideBand), que transmite la portadora óptica a la frecuencia óptica f_L y las dos bandas laterales localizadas espectralmente en $f_L \pm f_{RF}$. Tras la propagación a través del enlace de fibra, el fotodetector permite recuperar la señal en el dominio eléctrico. Este proceso de detección, genera una señal en banda base que queda fuera de la banda de interés. Finalmente, el bloque receptor demodula la señal y obtiene los bits transmitidos.

El AWG y el DPO son los equipos con los que vamos a transmitir y recibir la señal OFDM. Para el procesado correspondiente a la generación y la recepción, utilizaremos dos métodos diferentes, uno de ellos basado en el software que incorporan los equipos AWG y DPO y el otro consistente en la implementación de un algoritmo en Matlab. Ambos métodos serán comparados para evaluar la idoneidad del uso de uno u otro.

II.1. Enlace eléctrico.

Para obtener el punto de partida sobre el que valorar las mejoras o las degradaciones que supone en nuestro sistema la introducción de los elementos ópticos, vamos a evaluar las diferentes opciones que se nos presentan en el enlace eléctrico, conectando directamente el generador y el receptor del esquema de la Fig. 5.

Para la generación, disponemos del equipo AWG (Arbitrary Waveform Generator, modelo 7122C, Tektronix), que se muestra en la Fig. 6a. Se trata de un generador de señales con 4 salidas hasta 12 GS/s y de 1 salida hasta 24 GS/s aplicando interleaving. El uso del canal de interleaving permite un rango de amplitud de salida de -2 hasta 4 dBm, con una frecuencia de salida máxima de 9.6 GHz.

En cuanto al equipo receptor DPO (Digital Phosphor Oscilloscope, modelo 72004C, Tektronix), mostrado en la Fig. 6b, permite la recepción de señales de hasta 20 GHz, muestreadas hasta a 100 GS/s. Con 4 canales de entrada, registra hasta 500 MS.



(a) (b)
Fig. 6. Equipos generador AWG7122C (a) y receptor DPO72004C (b).

II.1.1. Generación y detección en RFXpress y SignalVu

El equipo AWG tiene incorporado un software avanzado de creación y edición de señales RF/IF/IQ, RFXpress (en adelante, RFX). Este software permite la generación de señales monoportadora y multiportadora con modulaciones $\{B,Q,8\}$ -PSK y $\{16,32,64,256\}$ -QAM. El software también incluye la opción de generar señales OFDM, en el que están preestablecidos los estándares WiFi (802.11) y WiMAX (802.16), pudiendo acceder a su estructura de forma inmediata.

RFX permite situar la portadora de RF hasta los 12 GHz con una potencia desde -2 a 3.9 dBm. Entre las tramas de bits a transmitir se puede optar por una secuencia PRBS (PseudoRandom Binary Sequence) o por una secuencia de bits predeterminada. En cuanto a las subportadoras, RFX establece el máximo en 65536, pudiendo transportar cada una de ellas información de datos, pilotos o subportadoras anuladas. La sincronización sólo permite el modo comb-type [24], quedando fuera de alcance los modos block-type o personalizado. Por último, para la prevención del ISI, RFX nos permite la inserción de un prefijo cíclico [25], definido temporal o porcentualmente.

El software permite la introducción de hasta 100 símbolos OFDM, cada uno de los cuales contiene la información descrita en el párrafo anterior. En la Fig. 7 se ilustra un esquema de la señal OFDM.

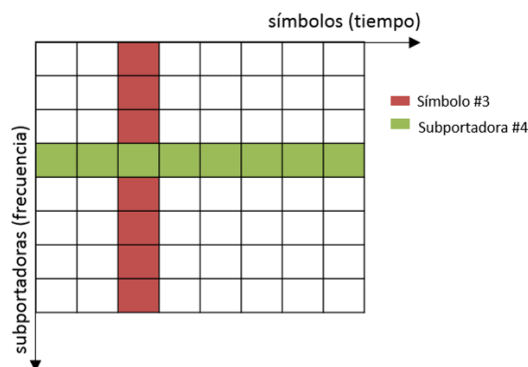


Fig. 7. Esquema temporal-frecuencial de la señal OFDM.

El DPO dispone de un software de medidas avanzadas de RF, SignalVU, que permite la visualización del espectro de la señal, su espectrograma, y características de señales moduladas digitalmente como constelación, EVM (Error Vector Magnitude), diagrama de ojos o la tabla de símbolos demodulados. Asimismo, incluye una opción específica de OFDM para señales dentro de los estándares WiFi y WiMAX; esta posibilidad muestra el EVM respecto de cada subportadora, la potencia respecto de cada subportadora, la tabla de símbolos del estilo del mostrado en la Fig. 9 y la respuesta en frecuencia del canal, además de la constelación ya mencionada previamente. También extrae un resumen de la señal OFDM recibida, en el que se incluyen parámetros como: potencia media, valor promedio del EVM de los datos y pilotos o PAPR (Peak to Average Power Ratio).

Para ilustrar la generación y recepción con el software, transmitimos una señal WiFi, cuyas características se recogen en la Tabla 2.

f_{RF}	2.4 GHz	BW	20 MHz	Modulación	16QAM
Subportadoras de datos	48	Símbolos OFDM	6	Preámbulos	2
Prefijo cíclico	25 %	Postfijo Cíclico	0	Velocidad	26.18 Mb/s
Sampling Rate DAC	14.46 GS/s	Duración señal OFDM	44 μ s	Ecuación	Comb-type 4 pilotos

Tabla 2. Características de la señal WiFi.

La Fig. 8 muestra algunas de las características que SignalVU muestra respecto de las señales OFDM detectadas. En (a) se observa la señal temporal en unidades logarítmicas, que nos permite detectar el comienzo de cada una de las tramas; (b) muestra el espectro de la señal, obtenido digitalmente a partir del procesado de (a). Las imágenes (c) y (d) ilustran la potencia y el EVM de cada una de las subportadoras, de modo que ese puede detectar la ubicación si hay alguna subportadora que sufre penalizaciones. En (e) se observa la constelación de los símbolos recibidos y, por último, en (f) se muestra el resumen OFDM que realiza SignalVU, en el que aparecen los valores de PAPR, la potencia media recibida y el EVM medio, así como los valores de pico.

Configurando el DPO de manera adecuada (a través de un archivo de texto) es posible salirse de los estándares prefijados, de modo que SignalVu puede analizar señales generadas con las características parametrizables que ofrece el software RFX.

La interconexión directa de ambos equipos permite la calibración del canal eléctrico, a través de la posibilidad que nos ofrece el AWG para obtener la repuesta en frecuencia que incluye los efectos del AWG y del DPO.

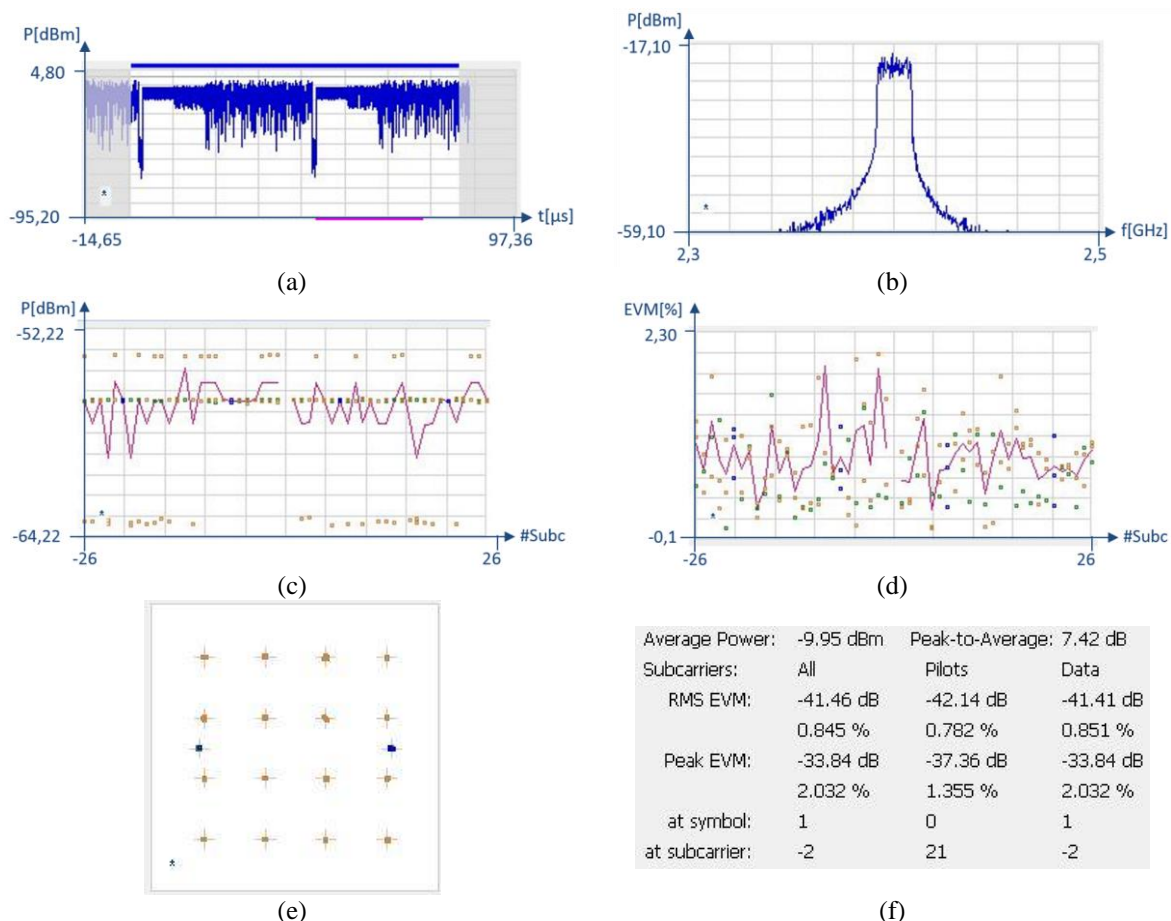


Fig. 8. Características visualizadas en SignalVU: señal temporal (a), espectro (b), potencia vs subportadora (c), EVM vs subportadora (d), constelación (e), resumen (f).

II.1.2. Generación y recepción en Matlab

Para poder controlar todos los parámetros de la señal OFDM, así como para el cálculo de parámetros de calidad como el BER (Bit Error Rate), se genera en Matlab un programa que trata de emular lo que hace RFX, pero teniendo completo control de la señal. La Fig. 9 muestra el diagrama de bloques del generador.

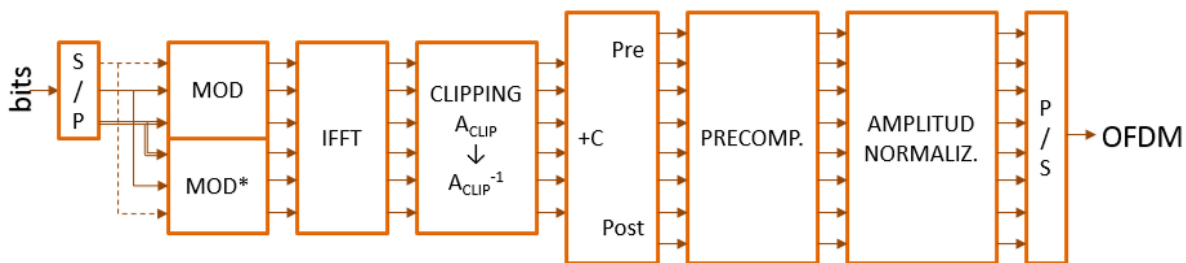


Fig. 9. Diagrama de bloques de la generación de la señal OFDM en Matlab.

Los bits de entrada se paralelizan para trabajar con tantas líneas como subportadoras de datos tengamos, teniendo en cada línea la cantidad de bits correspondiente a la modulación a aplicar. Para poder tener simetría hermítica [26] y que a la salida de la IFFT haya una señal real, los bits se

mapean, saliendo por el modulador superior, y los símbolos ya mapeados se conjugan, saliendo por el modulador inferior. Tras la aplicación de la IFFT a los símbolos, la señal se introduce en el bloque de clipping, que recorta los picos de la señal hasta un nivel deseado; esta modificación permite reducir el PAPR de la señal, así como la potencia que cae fuera de la banda de RF [19]. Para evitar ISI, le añadimos un prefijo (+CPre) y un postfijo (+CPost) cíclicos, que evitarán solapamientos entre los símbolos y mejorarán la sincronización en recepción [27]. Obviemos el bloque de precompensación que analizaremos más adelante. Normalizamos la amplitud A de la señal, con $A \in [-1,1]$ V y la serializamos. La señal la introducimos en el DAC del AWG y ya está lista para ser transmitida.

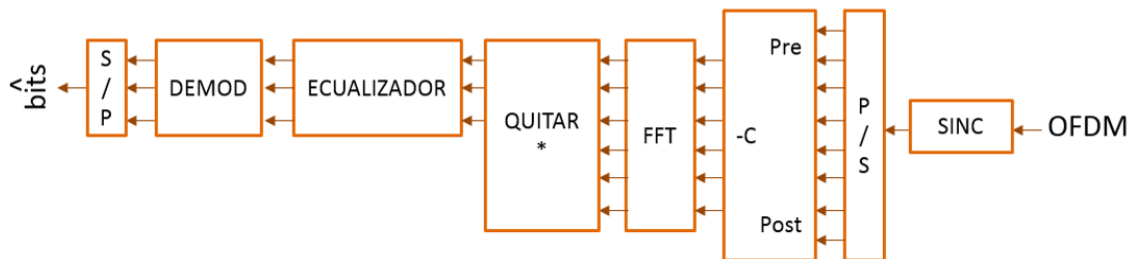


Fig. 10. Diagrama de bloques de la recepción de la señal OFDM en Matlab.

El bloque receptor, mostrado en la Fig. 10, es recíproco al generador. En primer lugar se toma la señal OFDM temporal del ADC del DPO y se sincroniza para poder obtener el inicio y el fin de cada uno de los símbolos, utilizando el máximo de la correlación entre dos símbolos OFDM [4]. A continuación se paraleliza y se eliminan el CPre y el CPost. Tras aplicar la FFT se eliminan los símbolos correspondientes a la simetría hermítica y se introducen en el bloque ecualizador. En función de la estructura que hayamos elegido en generación, obtendremos la ecualización a partir de los pilotos con los métodos comb-type, block-type o diagonal [28]. Los símbolos a la salida del ecualizador se demodulan, recuperando los bits transmitidos.

Previamente a la transmisión de una señal OFDM, se obtienen los coeficientes correspondientes de cada una de las subportadoras que se van a transmitir, de modo que en recepción se puede registrar el efecto que ha tenido el canal eléctrico sobre ellas. Esta parte constituye el bloque de precompensación que se muestra en la Fig. 9.

II.1.3. Figuras de mérito y parámetros de calidad

Los dos parámetros de calidad sobre los que vamos a basar las conclusiones de los resultados experimentales son el EVM y el BER.

La tasa de errores de bit (BER) nos indica la cantidad de bits transmitidos que han sido recibidos erróneamente. En la literatura se establece un valor de $BER=10^{-3}$ como límite superior de errores permitidos, que pueden ser corregidos a posteriori con la técnica FEC (Forward Error Correction).

El EVM nos va a indicar lo dispersos que se encuentran los símbolos detectados respecto de su posición ideal.

II.1.4. Comparativa de los métodos de generación y detección

Para establecer una comparación entre los métodos de generación y detección, se comparan las prestaciones que nos ofrecen los métodos para la señal WiFi, con un ancho de banda nominal de 20 MHz a $f_{RF}=2.4$ GHz; asimismo, aumentaremos el ancho de dicha señal a 1 y 2 GHz, y también modificaremos la ubicación de la portadora, situándola a 7.5 GHz.

En la Fig. 11a se ilustra el EVM en cada una de las situaciones. Se puede observar que a frecuencias bajas ($f_{RF}=2.4$ GHz) se comporta mejor el método de AWG/DPO, mientras que a frecuencias más altas ($f_{RF}=7.5$ GHz) el método Matlab funciona mejor. Asimismo, conforme el ancho de la señal va aumentando, la constelación tiene mejores prestaciones con el método de Matlab que con el AWG. Las Fig. 11b-c representan la constelación de símbolos para los métodos de recepción basados en SignalVU y Matlab, con valores de EVM de 19.77% y 9.76%, respectivamente.

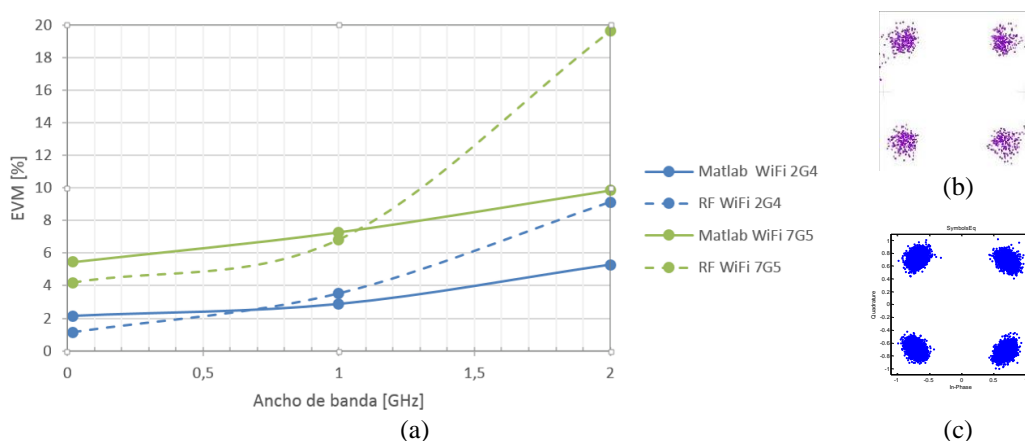


Fig. 11. (a) EVM de la señal recibida al utilizar Matlab (línea continua) o AWG/DPO (línea discontinua) con diferentes anchos de banda y frecuencias portadoras de 2.4 GHz (azul) y 7.5 GHz (verde). Constelación recibida para 7.5 GHz y 2 GHz de ancho de banda con el método SignalVU (b) y con Matlab (c).

Se observa que el método de recepción basado en Matlab mejora las prestaciones que el basado en SignalVU para anchos de banda mayores de 1 GHz. Las señales que se pretenden transmitir en los esquemas ópticos tienen anchos de banda de 1 GHz y mayores, de modo que será el método que utilizaremos.

II.2. Esquema óptico DSB.

La Fig. 5 mostraba el diagrama de bloques del sistema OOFDM que vamos a desarrollar. En la Sección II. 1 hemos desarrollado los bloques que componen la generación y la recepción. En este apartado los bloques de modulación y detección son analizados. La Fig. 12 ilustra su contenido.

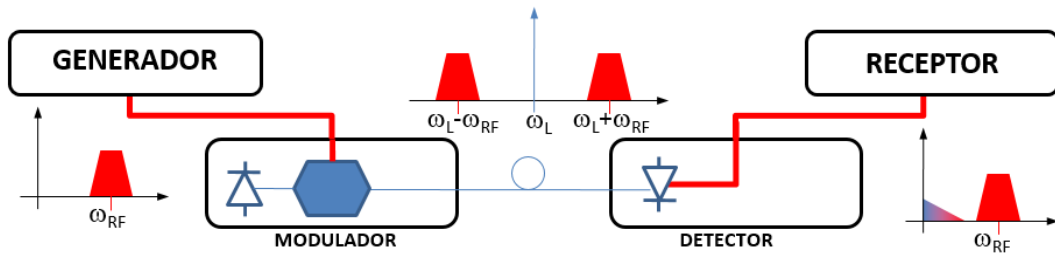


Fig. 12. Esquema experimental del sistema OOFDM.

II.2.1. Elementos ópticos

El esquema de transmisión óptica aplicado consiste en modulación externa y detección directa. Para la modulación requeriremos un láser DFB de 200 MHz de ancho de línea (IQS-2400, EXFO) y un MZM (PowerBit F-10, AVANEX), mientras que para la detección emplearemos un PD (DSC-R402-39-FC/PC-KM, Discovery Semiconductors). Los tres componentes se ilustran en la Fig. 13 y sus principales características se recogen en la Tabla 3.

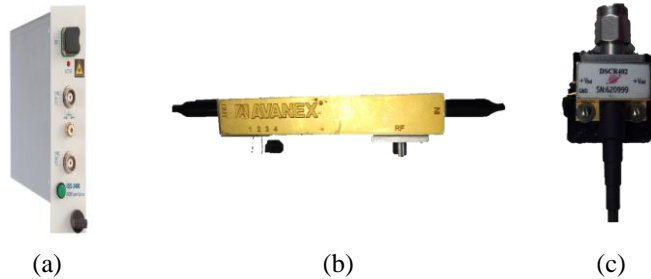


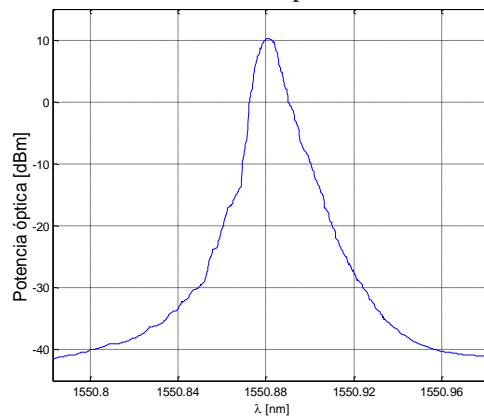
Fig. 13. Láser (a), MZM (b) y PD (c).

Láser		MZM		PD	
$\lambda_{\text{mín}}$	1528 nm	S_{11}	<-17 dB	Responsividad	0.8 A/W
$\lambda_{\text{máx}}$	1565 nm	S_{21}	>-1.5 dB	Ganancia	20 dB
Resolución	± 0.01 nm	Pérdidas inserción	3.5 dB	Ancho de banda	10 GHz
$P_{\text{mín}}$	3 dBm	Ancho de banda	12.5 GHz	Retardo grupo	± 10 ps
$P_{\text{máx}}$	13 dBm	V_{π}	5 V	Ruido	16 pA/Hz ^{1/2}

Tabla 3. Características principales de los elementos ópticos.

II.2.2. Verificación experimental del sistema OOFDM basado en DSB

El láser genera una portadora óptica a 1550.92 nm con una potencia de 13 dBm. Su espectro óptico se



muestra en la

Fig. 14. Dicho espectro, y el resto de espectros ópticos que aparecen en este trabajo, han sido medidos a través de un OSA (Optical Spectrum Analyzer, Advantest) con una resolución de 10 pm y 1001 puntos.

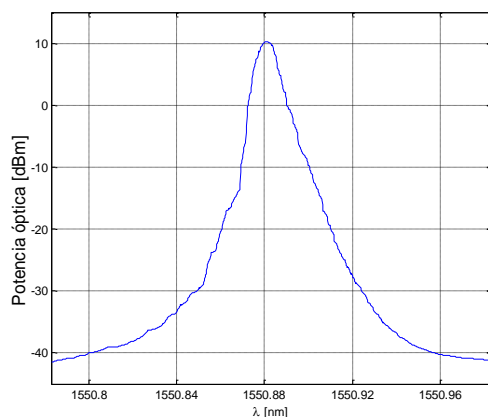


Fig. 14. Espectro óptico del láser.

A continuación analizaremos la respuesta del MZM para diferentes tensiones de alimentación V_{BIAS} , que son las que modifican el punto de polarización. Tras modular externamente una señal OFDM de portadora eléctrica 7.5 GHz y ancho de banda de 1 GHz, variando el punto de polarización, se puede observar la señal modulada en la Fig. 15.

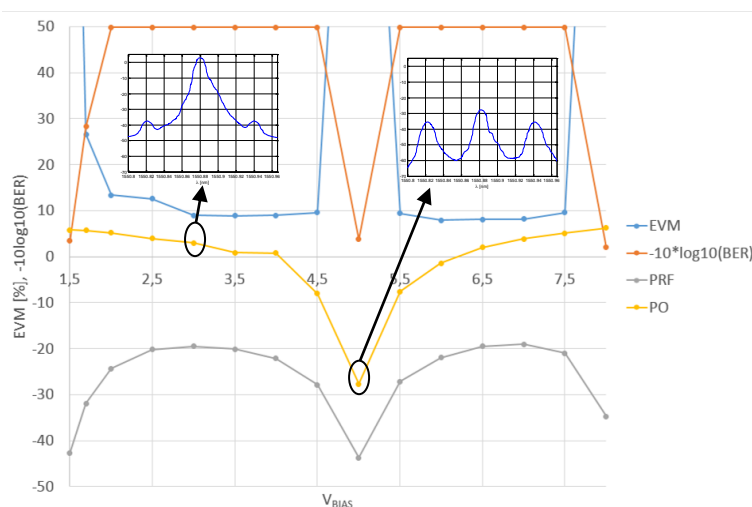


Fig. 15. EVM [%] (azul), BER (naranja), Potencia eléctrica [dBm] (gris) y Potencia óptica [dBm] (amarillo) vs V_{BIAS} . Dentro, espectros ópticos para $V_{BIAS} = \{3, 5\}$ V

Conforme va aumentando V_{BIAS} , pasamos de no tener presencia de la señal RF a que esta tome la misma potencia que la portadora óptica. Cuando ocurre este fenómeno, el PD realiza el batido de la señal pero no tiene suficiente potencia para recuperar la señal RF. Es por ello que trataremos de evitar esta región. Por otro lado, si la señal RF está poco presente no se va a poder demodular adecuadamente, de modo que hay que buscar el punto que establezca el compromiso entre un buen

nivel de potencias óptica y eléctrica. En el rango $V_{BIAS} \in [3.5, 4.2]$ podemos encontrar puntos para los que dicho compromiso se cumple.

Una vez realizado el análisis del MZM y fijado el punto de polarización en $V_{BIAS} = 4$ V, procedemos a analizar el enlace óptico para diferentes tipos de señales OFDM.

Los parámetros de las señales OFDM que se van a transmitir se recogen en la Tabla 4. Sobre esa señal, modificaremos la modulación de los datos, el ancho de banda y la potencia transmitida.

f_{RF}	7.5 GHz	BW	256 MHz	Modulación	QPSK
Subportadoras de datos	238	Símbolos OFDM	98	Preámbulos	2
Prefijo cíclico	25 %	Potencia transmitida	3.9 dBm	Velocidad	390 Mb/s
Sampling Rate DAC	24 GS/s	Duración señal OFDM	127 μ s	Ecuación	Comb-type 4 pilotos

Tabla 4. Parámetros de la señal OFDM transmitida para la verificación de la señal DSB-OOFDM.

El aumento del ancho de banda implica un incremento en la dispersión en la constelación y, por tanto, el valor del BER será peor. La Fig. 16 ilustra el BER y el EVM [%] para señales con anchos de banda de 256 MHz y 2.56 GHz respecto de las potencia eléctrica recibida.

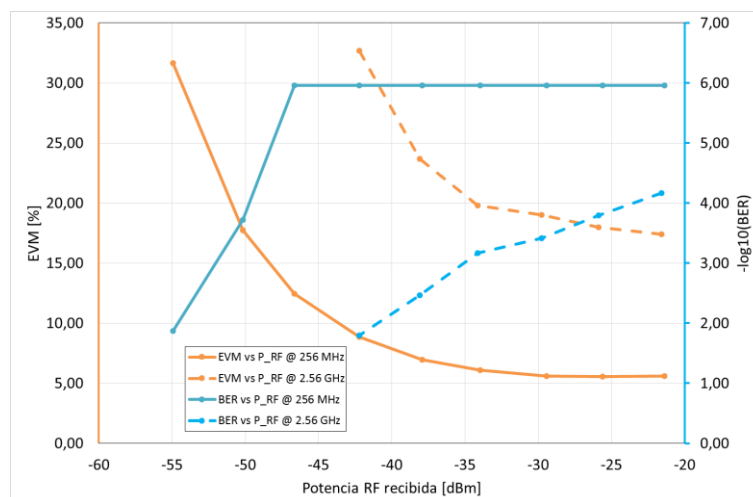


Fig. 16. BER (azul) y EVM [%] (naranja) vs Potencia eléctrica para señales de ancho de banda de 256 MHz (línea continua) y 2.56 GHz (línea discontinua)

El EVM de la señal aumenta conforme se sube el ancho de banda, y esto tiene un efecto inmediato en el BER, pues la señal se degrada más en 2.56 GHz. Interpolando los datos, se obtienen un rango para $BER < 10^{-3}$ de $P_{RF} > -52.03$ dBm en el caso de la señal de 256 MHz; para la señal de 2.56 GHz el rango se cumple para $P_{RF} > -35.08$ dBm.

Las gráficas cuando la señal lleva 252 portadoras moduladas en QPSK son similares, si bien es cierto que los valores interpolados para cumplir un $BER < 10^{-3}$ son, para 256 MHz, $P_{RF} > -51.29$ dBm, y para 2.56 GHz, $P_{RF} > -36.07$ dBm. Los valores de las velocidades de transmisión son de 0.39 Gb/s para la señal de 256 MHz, y de 3.90 Gb/s para la señal de 2.56 GHz.

La modulación utilizada para las subportadoras de datos también afecta sobre el EVM y el BER. La Fig. 17 ilustra estos parámetros para las modulaciones QPSK y 16QAM, en función de la potencia eléctrica. A pesar de que el EVM de la constelación 16QAM es ligeramente mejor que en el caso de QPSK, el BER tiene un comportamiento más crítico, debido a que las regiones de decisión son más restrictivas para modulaciones de 16 símbolos que para las de 4. Es por ello que el BER asociado a QPSK es, para potencias bajas, bastante mejor que el correspondiente a 16-QAM. De nuevo, interpolando obtenemos que las regiones de $BER < 10^{-3}$ se cumplen para señales QPSK en $P_{RF} > -52.03$ dBm, mientras que para señales 16-QAM este rango es $P_{RF} > -43.74$ dBm.

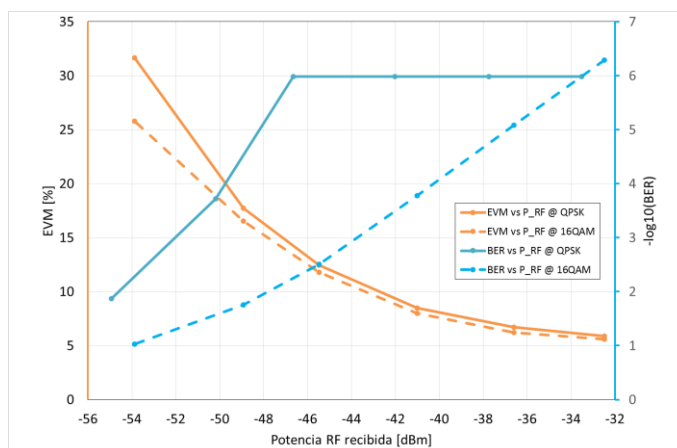


Fig. 17. BER (azul) y EVM [%] (naranja) vs Potencia eléctrica para señales moduladas en QPSK (línea continua) y 16QAM (línea discontinua)

La variación de la potencia que tiene la señal RF (P_T) cuando sale del ADC es el siguiente parámetro a verificar. La Fig. 18 representa estas variaciones para potencias transmitidas de 0, 3 y 3.9 dBm.

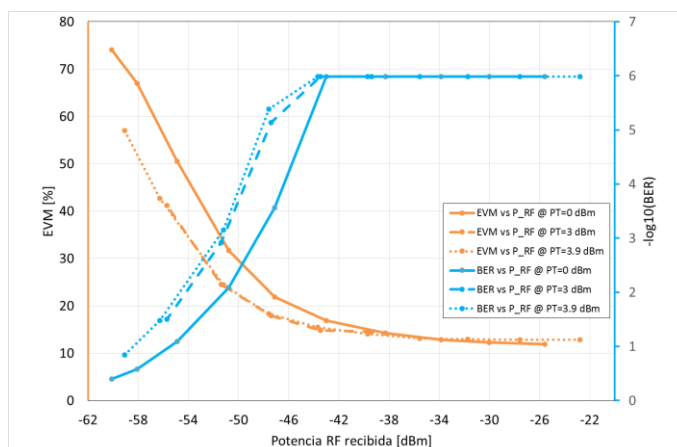


Fig. 18. BER (azul) y EVM [%] (naranja) vs Potencia eléctrica para potencia de RF transmitida de 0 dBm (línea continua), 3 dBm (línea discontinua) y 3.9 dBm (línea punteada).

Las señales con menor potencia tienen mayores problemas en la fase de detección donde se baten la portadora óptica con las bandas eléctricas; por tanto, a menor potencia eléctrica, menor potencia detectada. Su inmediata consecuencia es un aumento en los valores del EVM y del BER. El rango de valores que garantiza cumplir la tasa $BER < 10^{-3}$ son, para potencia eléctrica transmitida

de 0 dBm, $P_{RF} > -48.52$ dB; para transmisión de 3 dBm, $P_{RF} > -51.24$ dB; para señales transmitidas de 3.9 dBm, $P_{RF} > -51.67$ dBm.

Por último, si en lugar de variar un parámetro de la señal OFDM lo que variamos es la potencia del láser P_L , obtenemos los resultados que se representan en la Fig. 19.

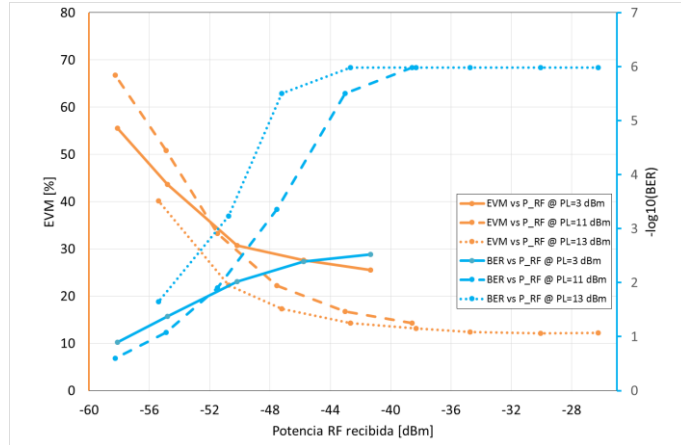


Fig. 19. BER (azul) y EVM [%] (naranja) vs Potencia eléctrica para señales moduladas con láser de potencia 3 dBm (línea continua), 11 dBm (línea discontinua) y 13 dBm (línea punteada).

Podemos observar que para potencias del láser bajas, la señal detectada tiene peor calidad, de manera que en ningún momento se alcanza la tasa de $BER=10^{-3}$. Para potencias similares, como son las de 11 y 13 dBm, el comportamiento mejora ostensiblemente, teniendo los valores más altos las gráficas cuya potencia es mayor, debido al batido que hace el PD al detectar. El rango de valores que hace aceptable la transmisión es de $P_{RF} > -48.52$ dBm para la transmisión con $P_L=11$ dBm, y de $P_{RF} > -51.43$ dBm cuando la potencia del láser es de 13 dBm.

II.2.3. Efecto de supresión de portadora

Uno de los objetivos que persigue la técnica OOFDM es la transmisión de señales a lo largo de grandes distancias. Cuando una señal está modulada en DSB, en la fibra óptica se produce el efecto de supresión de portadora. Como señala [17], cada una de las dos bandas laterales sufre un retardo diferente respecto a la portadora óptica. Al realizar el batido en detección, la amplitud resultante es la suma de las dos bandas, que depende del desfase relativo entre ellas. Si este desfase es de π radianes estamos ante una interferencia destructiva que anula la señal recibida. A partir de la función de transferencia eléctrica del efecto de supresión de portadora

$$H_{RF}(\Omega) = \cos\left(\frac{1}{2}\beta_2 L \Omega^2\right), \quad (1)$$

podemos obtener para un rango de longitudes y frecuencias los puntos en los que se anula la señal recibida. En esta expresión, el parámetro β_2 representa la dispersión de la fibra, L es la longitud de la fibra, y Ω es la frecuencia angular de la señal RF.

Para el caso de un fibra SMF convencional, la dispersión de la fibra es de $\beta_2 = -20.3$ ps²/km. La Fig. 20a representa la amplitud de la función de transferencia eléctrica para un rango de frecuencias

de 0 a 10 GHz, con una variedad de longitudes de 0 a 100 km. Los colores rojos representan pocas pérdidas, mientras que cuanto más se acercan el color al azul, las pérdidas adquieren relevancia. Para enlaces ópticos de aproximadamente 70 km se observa que las señales entre 7.2 y 7.8 GHz van a sufrir una degradación importante.

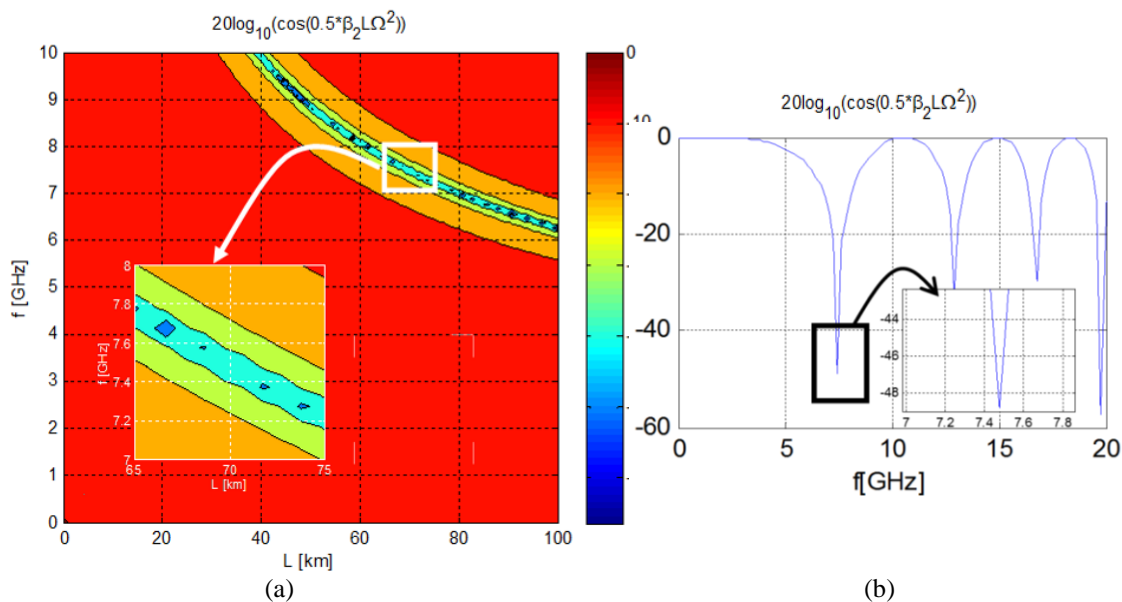


Fig. 20. Amplitud de la señal de RF debida al efecto de supresión de portadora para un rango de longitudes y frecuencias de RF (a). Particularización para longitud del enlace de 70 km (b).

La portadora eléctrica sobre la que se va a transmitir la señal OFDM en este trabajo está ubicada en 7.5 GHz. Atendiendo a la Fig. 20a, la máxima degradación se produciría para un enlace de 70 km. La Fig. 20b representa la función de transferencia a partir de (1) para una longitud de 70 km de fibra. Se observa la supresión de portadora a frecuencias de 7.48 GHz, 12.96 GHz, 16.73 GHz y 19.80 GHz.

Con el fin de mostrar el efecto de supresión de portadora para una frecuencia de 7.5 GHz, transmitimos la misma señal OFDM sin carrete y con él, de acuerdo al esquema de la Fig. 21.

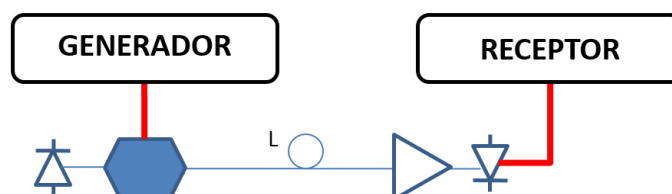


Fig. 21. Esquema para la verificación del efecto de supresión de portadora, con $L=70$ km.

El carrete introducido tiene unas pérdidas aproximadas de 17 dB, de modo que a la salida del carrete amplificamos la señal con un EDFA de 20 dB de amplificación óptica para compensar las pérdidas de la fibra. La Fig. 22 muestra los espectros ópticos y las constelaciones de ambas pruebas. En (a-c) se muestra la señal recibida sin carrete, mientras en (d-f) se representa tras 70 km de fibra. El efecto de supresión de portadora no se puede apreciar en el espectro óptico (a, d), a

pesar de que ambos sean muy similares. Sin embargo, los espectros eléctricos (b, e) evidencian el fenómeno, si bien la prueba definitiva son las constelaciones recibidas (c, f), en la que para transmisión sin fibra el $BER < 2.96 \cdot 10^{-5}$, y tras 70 km el $BER = 0.461$.

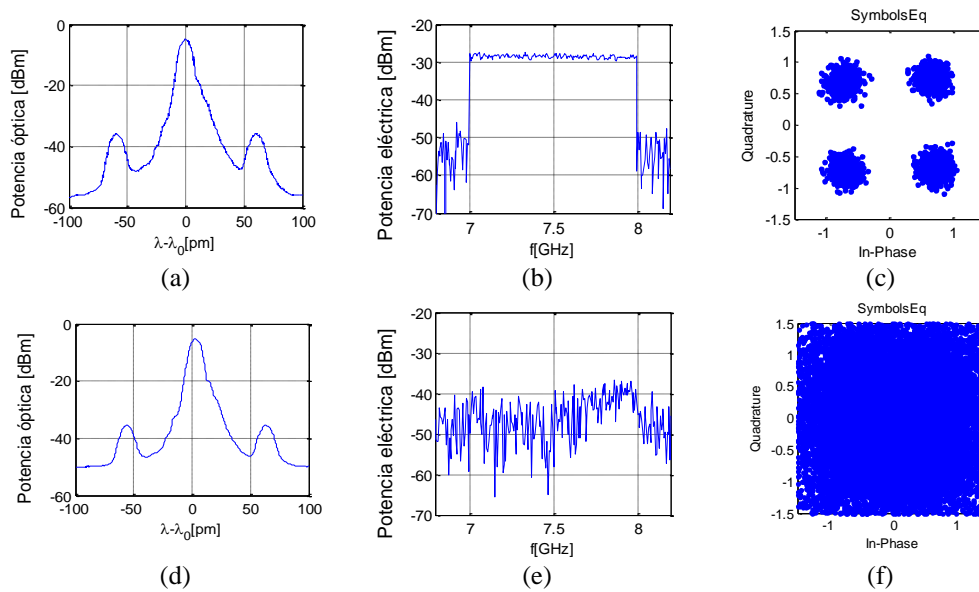


Fig. 22. Espectro óptico (a, d), eléctrico (b, e) y constelación (c, f) de la señal OFDM sin carrete (a-c) y con un carrete de 70 km (d-f).

El fenómeno de supresión de portadora es una limitación importante en los sistemas DSB-OOFDM pues, como se acaba de demostrar, a determinadas longitudes no se recibe la señal de forma adecuada. Una solución a esta limitación es cambiar la técnica de modulación, de modo que en lugar de transmitir las dos bandas laterales, sólo transmitamos una de ellas. Esta técnica es conocida como SSB-OOFDM (Single Side Band-OOFDM).

III. Transmisor óptico WDM de señales SSB con OOFDM.

Hemos demostrado experimentalmente que la señal modulada en DSB sufre degradaciones en el enlace óptico a lo largo de una determinada distancia en función de la portadora eléctrica, para $L=70$ km y $f_{RF}=7.5$ GHz. La eliminación de una banda para evitar las penalizaciones en enlaces de fibra es una técnica que aparece en [29] por primera vez. La aplicación de SSB a OFDM aparece en la literatura numerosos artículos en los que consiguen eliminar una de las dos bandas con el uso de dos señales y sus transformadas Hilbert, subidas a f_{RF} y moduladas con un MZM dual-drive [30, 31]. La técnica que vamos a aplicar consiste en el uso de un filtro óptico para suprimir una banda tras haber modulado la señal OFDM con un MZM single-drive [14, 32].

La obtención de una buena señal SSB tiene una implicación directa: la eficiencia espectral ha mejorado notoriamente, pues donde antes había una información redundante, deja de haberla. ¿Y si el espacio que deja dicha banda lo aprovechamos para incluir otra señal SSB? Podríamos llegar a duplicar la eficiencia espectral en el ancho de banda que ocupábamos con DSB. No obstante, la realidad nos invita a plantearnos el crosstalk que puede introducir una señal sobre el canal adyacente. De este modo, vamos a tratar de incluir dos señales SSB en un canal de comunicaciones, de 50 GHz de ancho de banda, en lo que denominaremos WDM-SSB-OOFDM.

III.1. Modulación óptica de una sola banda lateral (SSB).

El esquema experimental a partir del cual vamos a caracterizar la señal se ilustra en la Fig. 23.

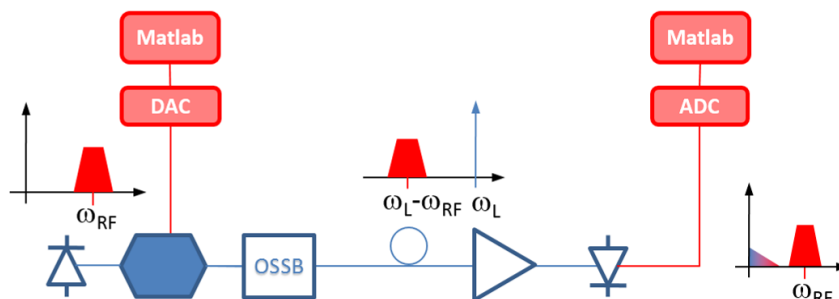


Fig. 23. Montaje experimental de SSB-OOFDM.

El único elemento que introducimos respecto de los sistemas previos es un filtro óptico que nos permita eliminar una de las dos bandas laterales.

III.1.1. Figuras de mérito

Para poder evaluar la calidad del filtrado, vamos a introducir las figuras de mérito CSPR (Carrier to Signal Power Ratio) y ER (Extinction Ratio). La Fig. 24 ilustra varios espectros ópticos. Se representa en azul la señal DSB a la salida del modulador óptico, en la que se aprecian claramente la portadora óptica como pico principal central y las dos portadoras eléctricas como picos a ambos lados de la portadora óptica. La señal verde ilustra la señal DSB a la salida del filtro cuando el ancho de banda del filtrado es de 77 nm, para percibir las pérdidas de inserción que este presenta, estableciéndose en 5 dB. La señal en azul claro muestra la respuesta en frecuencia del

filtro cuando se le introduce una fuente de ruido blanco, fijando el ancho de banda del filtro en 100 pm. Por último, en rojo aparece la señal SSB, que es el resultado de introducir la señal DSB en el filtro configurado el ancho de banda en 100 pm. Si nos fijamos en la señal roja, la diferencia de potencia entre la portadora óptica y la señal eléctrica LSB es lo que denominamos CSPR, mientras que la diferencia entre la señal eléctrica LSB y la señal filtrada USB es el parámetro ER.

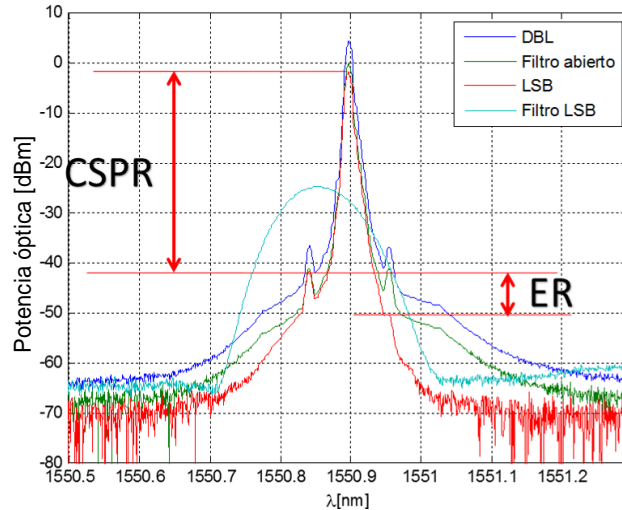


Fig. 24. Definición experimental de las figuras CSPR y ER.

Cabe destacar que estas medidas son cotas inferiores debido a las características de medida del OSA, pues tiene 10 pm de resolución. No obstante, como siempre mediremos con el mismo equipo tomaremos los valores como referencia, teniendo en cuenta que con una resolución más fina las figuras de mérito podrían mejorar.

III.1.2. Establecimiento de los parámetros del filtro óptico SSB

Para poder diseñar el filtro óptico será necesario analizar las características de la señal óptica que queremos filtrar. Introduciremos al filtro la señal descrita en la Tabla 3, modulada en DSB. Para la obtención de LSB aplicamos esquema de la Fig. 25. La línea negra marca el filtro, mientras que las señales eléctricas y ópticas están referenciadas respecto a la posición de la portadora óptica.

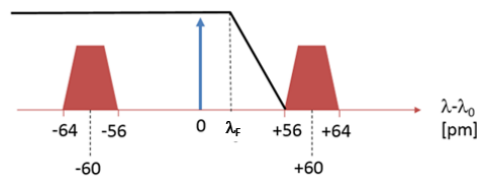


Fig. 25. Esquema de la señal DSB a filtrar.

El estudio previo de filtrado va a involucrar al roll-off del filtro, al ER deseado y a la posición λ_F del filtro. La Fig. 26a muestra la señal tras el filtrado si el filtro estuviera ubicado en $\lambda_F = \lambda_0$ para obtener una ER=10 dB; el roll-off necesario es de 11.03 dB/60 pm. La Fig. 26b muestra, para un roll-off de 9.51 dB/60 pm, los valores de CSPR y ER de la señal filtrada cuando variamos λ_F desde $\lambda_0 - 70$ pm hasta $\lambda_0 + 70$ pm. Cuando el valor de λ_F está por debajo de $\lambda_0 - 60$ pm, el filtrado es muy eficiente, obteniendo valores de CSPR ≈ 31 dB y ER ≈ 19 dB. Conforme movemos λ_F a la posición

de la portadora óptica, se filtra menos la banda USB, y la portadora óptica tiene más potencia, como se puede observar en la posición $\lambda_F = \lambda_0$, en la que $CSPR \approx 40$ dB y $ER \approx 9$ dB. Si ubicamos λ_F más allá de $\lambda_0 + 60$ pm el filtrado es prácticamente nulo, y se obtienen los valores de CSPR y ER de la señal DSB.

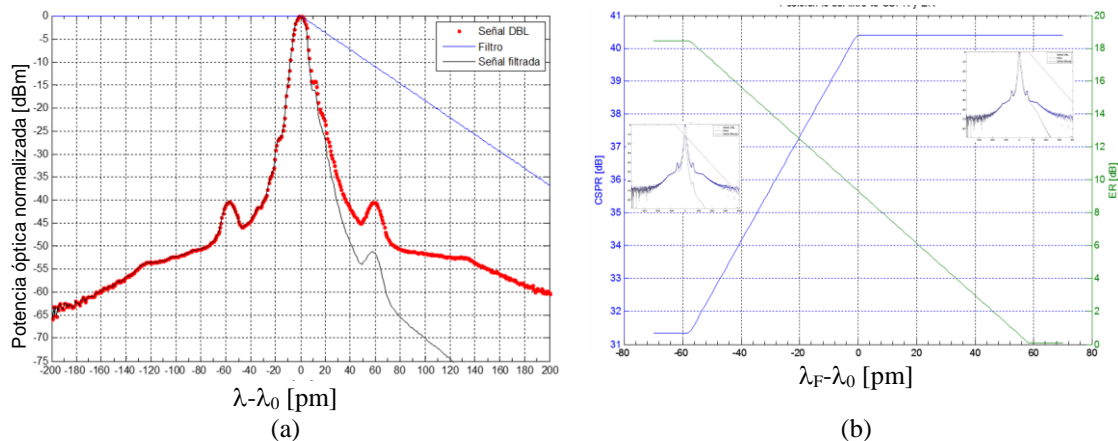


Fig. 26. Estudio de los parámetros del filtro a partir de la señal DSB obteniendo la pendiente del filtro (a) y moviendo la posición de λ_F (b).

Una vez estudiados los requisitos de filtrado, optamos por utilizar el filtro óptico sintonizable (WaveShaper 4000s, Finisar) con 1 puerto común y 4 individuales, todos ellos bidireccionales, de 4.5 dB de pérdidas de inserción, anchos de banda desde 10 GHz hasta 4.65 THz, resolución de 1 GHz, que se muestra en la Fig. 27.



Fig. 27. Filtro óptico.

Para caracterizar el filtro óptico se introduce una fuente blanca por el puerto común y se capturan los espectros ópticos a la salida de cada uno de los 4 puertos individuales, ilustrados en la Fig. 28. Las diferentes respuestas en cuanto a amplitud son debidas a las imperfecciones de las fibras utilizadas para extraer la señal. Los filtros, de ancho de banda de 0.2 nm y frecuencias centrales λ_F 1554.14 nm (azul), 1553.93 nm (verde), 1553.72 nm (rojo) y 1553.51 nm (cyan), tienen como roll-off 10.42 dB/60 pm, 10.56 dB/60 pm, 9.57 dB/60 pm y 9.51 dB/60 pm, respectivamente.

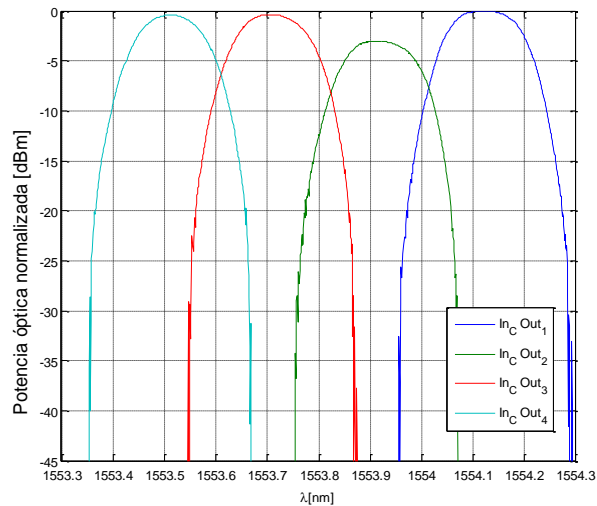


Fig. 28. Respuesta en frecuencia del filtro con $\Delta\lambda=0.2$ nm y $\lambda_F=\{1554.14$ nm (azul), 1553.93 nm (verde), 1553.72 nm (rojo) y 1553.51 nm (cyan)}.

III.1.3. Filtrado SSB de señales OOFDM

La señal OFDM con la que vamos a trabajar en los siguientes apartados está generada con el método basado en Matlab. Sus parámetros se recogen en la Tabla 5.

f_{RF}	7.5 GHz	BW	1 GHz	Modulación	QPSK
Subportadoras de datos	171	Símbolos OFDM	99	Nivel de clipping	12 dB
Prefijo cíclico	12.5 %	Postfijo Cíclico	12.5 %	Velocidad	1.50 Gb/s
Sampling Rate DAC	24 GS/s	Duración señal OFDM	22.6 μ s	Ecuación	Block-type $\tau=15$ símbolos

Tabla 5. Datos de la señal OFDM.

La señal está compuesta por 99 símbolos que contienen 171 subportadoras moduladas en QPSK cada uno, ocupando 1 GHz del espectro centrado en 7.5 GHz. Parte de la señal temporal se replica antes y después de cada símbolo un 12.5 % con los prefijos y postfijos cíclicos, e incluyendo cada 15 símbolos uno que nos sirva para equalizar adecuadamente. La señal temporal se recorta cuando la potencia instantánea supera a la potencia media en 12 dB, manteniendo este valor como máximo de la señal. La tasa bruta, muestreando a 24 GS/s, sería de 1.60 Gb/s; sin embargo, la inclusión de elementos de control como los pre/postfijos o la equalización block-type, se obtiene una velocidad real de 1.50 Gb/s.

La conexión directa de generador y receptor nos permite evaluar la calidad de la señal en el enlace eléctrico. El procesado en la recepción se lleva a cabo con el método basado en Matlab. La señal recibida con el ADC a 50 GS/s tiene un EVM = 7.51 % y un BER < $2.95 \cdot 10^{-5}$. En la Fig. 29 se muestran el espectro (a), en el que se aprecia la precompensación realizada, la constelación (b) y el EVM individualizado de cada portadora (c) de la señal recibida.

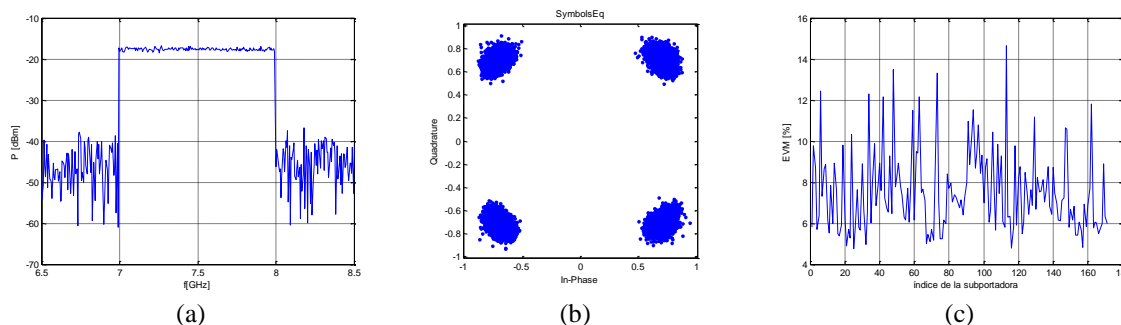


Fig. 29. Espectro (a), constelación (b) y EVM (c) de la señal OFDM recibida en el enlace eléctrico.

Tras introducir el filtro óptico de la Fig. 27 en el sistema de la Fig. 23 y establecer el ancho del filtro en 0.2 nm (\equiv 25 GHz), vamos a realizar un barrido de las frecuencias centrales del filtro, de manera que podamos evaluar el CSPR y el ER como simulamos en la Fig. 26, así como la constelación, el EVM y el BER de la señal recibida.

Para una mejor visualización de los datos, en las Fig. 30-Fig. 32 se representa la distancia entre el filtro y la portadora óptica, teniendo en cuenta que estamos filtrando LSB. Asimismo, en el eje de ordenadas derecho siempre vamos a representar el $-10\log_{10}(BER)$, mientras que en el eje de ordenadas izquierdo representaremos las potencias RF y óptica recibidas en la Fig. 30, el CSPR y el ER en la Fig. 31 y el EVM en la Fig. 32.

La constelación y el espectro óptico cuando la frecuencia central del filtro está ubicada en la portadora óptica, y cuando la distancia es de 90 pm se muestran en la Fig. 33.

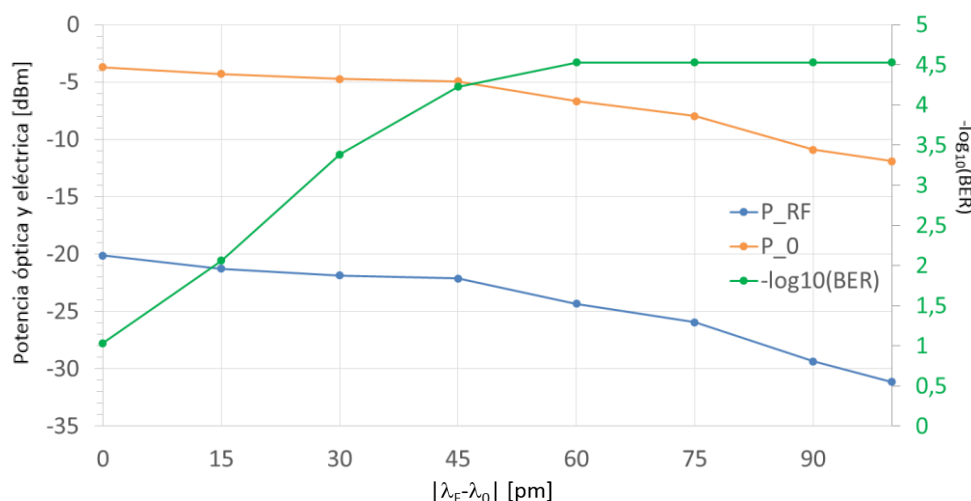


Fig. 30. Potencia RF [dBm] (azul), Potencia óptica [dBm] (naranja) y BER (verde) vs posición del filtro.

Observamos en la Fig. 30 que cuando el filtro se encuentra desplazado menos de 15 pm respecto de la portadora óptica, a pesar de los buenos niveles de señal se produce un valor de BER por encima de 10^{-3} . Este fenómeno es debido al efecto de supresión de portadora, pues el espectro de RF de la señal transmitida tiene valores entre 7 y 8 GHz y, aplicando (1) en ese rango de frecuencias, hay una cancelación para fibras de longitud entre 65 y 75 km. Su efecto se repetirá en la Fig. 32, con la representación del EVM.

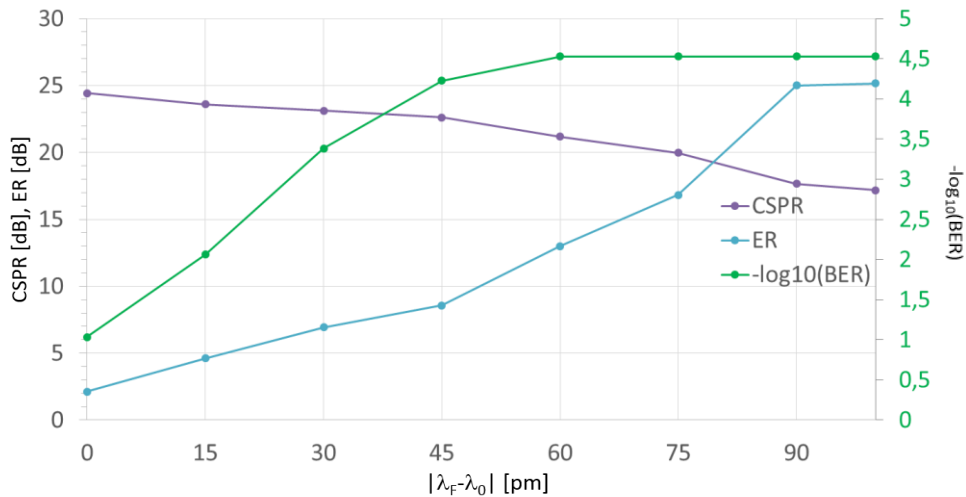


Fig. 31. CSPR [dB] (violeta), ER [dB] (azul) y BER (verde) vs posición del filtro.

Respecto al estudio del CSPR y el ER de la Fig. 31, y asumiendo un nivel de ER=20 dB como una buena cancelación de la banda indeseada, podemos observar que se produce cuando ubicamos el filtro a 90 pm de la portadora óptica. Es cierto que el nivel de CSPR=17.66 dB; sin embargo, la detección es correcta pues se obtiene el mejor valor de BER posible.

La Fig. 32 ilustra la relación entre el EVM y el BER. Para constelaciones con EVM por encima del 35 % es muy difícil estar por debajo del valor de BER= 10^{-3} . Para filtros centrados más allá de los 30 pm de la portadora óptica, la calidad de la señal ya es buena, pudiendo considerar realizable la transmisión.

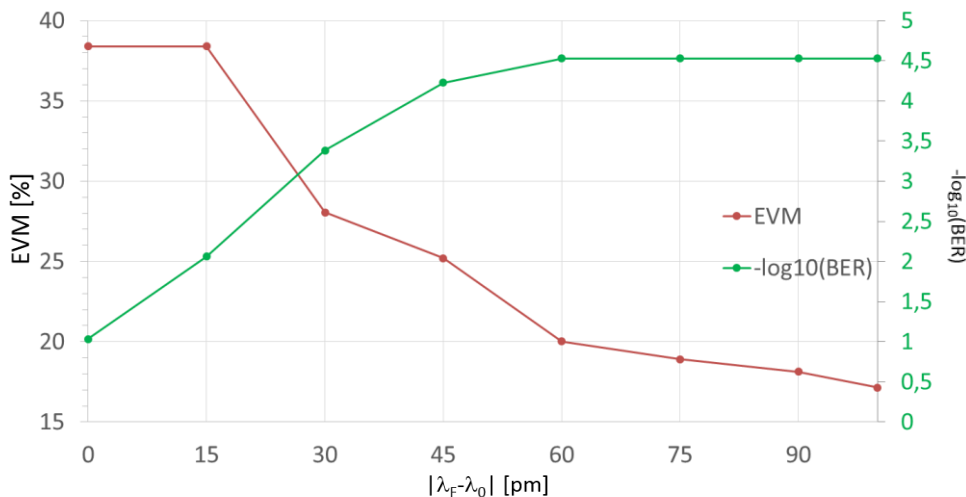


Fig. 32. EVM [%] (rojo) y BER (verde) vs posición del filtro.

La Fig. 33 ilustra el efecto de supresión de portadora y la calidad de la señal SSB transmitida. De nuevo, en la Fig. 33a, observamos el espectro DSB con una constelación inadecuada de un EVM > 38 %. Al transmitir SSB, la cancelación de la señal RF no se produce y, como muestra la Fig. 33b, se obtiene una constelación de BER < $2.95 \cdot 10^{-5}$.

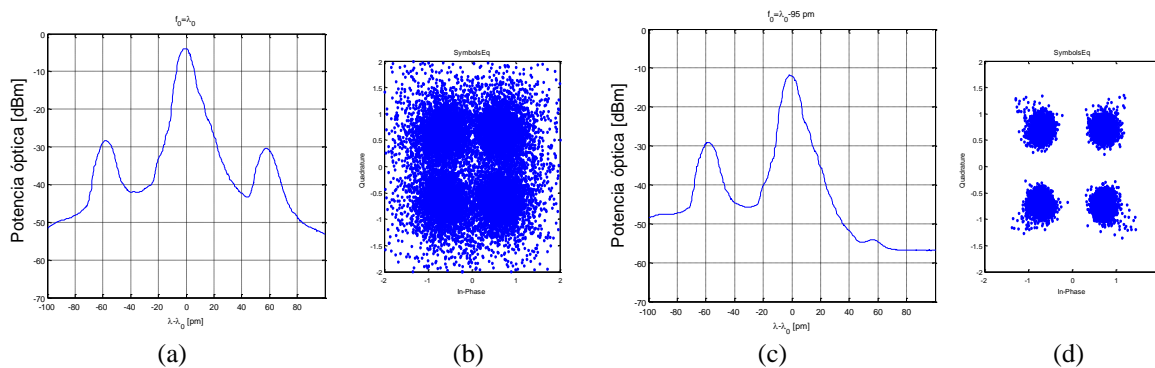


Fig. 33. Espectro óptico (a, c) y constelación (b, d) cuando $\lambda_F = \lambda_0$ (a,b) y cuando $\lambda_F = \lambda_0 - 90$ pm (c,d)

El sistema sobre el que hemos realizado la comprobación de la transmisión y recepción de la señal SSB incluye un filtro. Específicamente en esta configuración la mejor calidad de señal se obtiene cuando el filtro se ubica a 90 pm de la posición de la portadora óptica, con un $BER < 2.95 \cdot 10^{-5}$.

III.2. Multiplexación de canales ópticos (WDM).

La técnica de multiplexación por división en longitud de onda tiene como idea principal la posibilidad de separar de manera eficiente las distintas señales ópticas transportadas por una fibra óptica en función de su diferente longitud de onda [17]. Los sistemas DWDM (Dense-WDM), definidos en el estándar ITU G.694.1, tienen los canales separados 50 GHz, en lo que en adelante denominaremos canal de comunicaciones. Nuestro objetivo es la transmisión de dos señales SSB-OOFDM dentro de uno de los canales de comunicaciones que establece DWDM.

III.2.1. Prestaciones del canal individual

Unas de las fases más importantes de cualquier sistema WDM son la multiplexación y demultiplexación de los canales, de manera que en transmisión se requiere un elemento óptico que junte las contribuciones de cada uno de los canales y en recepción se tenga el elemento recíproco.

Dado que el filtro óptico sintonizable del que disponemos realiza funciones de add-drop, será el elemento que utilizemos como multiplexor, mientras que como demultiplexor utilizaremos un filtro óptico que sintonizaremos en la banda inferior o en la superior.

La inclusión de un elemento nuevo va a modificar la respuesta del sistema. De hecho, hay que tener en cuenta la concatenación de los dos filtros utilizados como (de)multiplexores. La Fig. 34 ilustra el montaje experimental realizado.

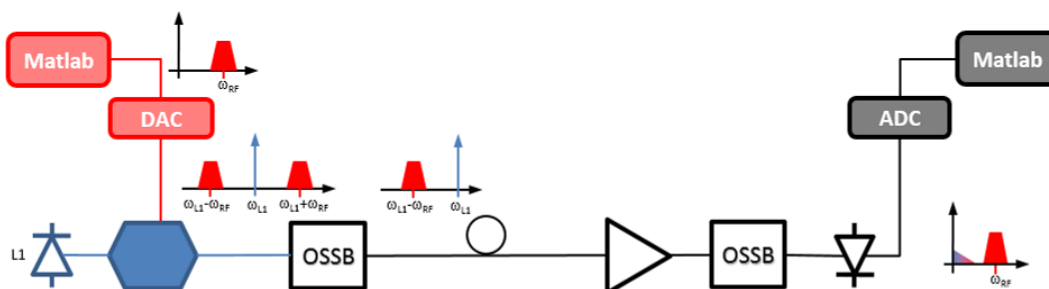


Fig. 34. Sistema WDM para la transmisión de una señal SSB-OOFDM.

De nuevo, transmitimos la señal recogida en la Tabla 5. Datos de la señal OFDM. obteniendo los resultados que se muestran en las Fig. 35-Fig. 39. Los resultados obtenidos en la demostración del sistema SSB no se van a repetir, puesto que la concatenación de los dos filtros va a provocar que la señal se vea atenuada de manera diferente.

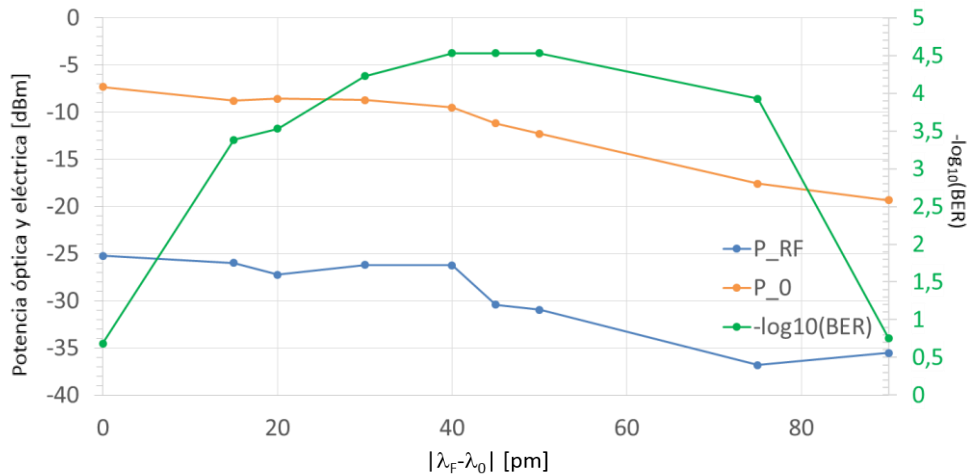


Fig. 35. Potencia RF [dBm] (azul), Potencia óptica [dBm] (naranja) y BER (verde) vs posición de los filtros.

Como se observa en la Fig. 35, el BER obtiene su mejor valor en el centro de la gráfica, perdiendo la calidad en los laterales de la misma. Cuando la frecuencia central del filtro está próxima a la portadora óptica (Fig. 36, azul) se produce el efecto de supresión de portadora, mientras que cuando nos alejamos mucho de esa posición estamos filtrando por completo la señal DSB (Fig. 36, rojo). Los máximos de dicha curva se dan para una separación de 45 pm (Fig. 36, verde).

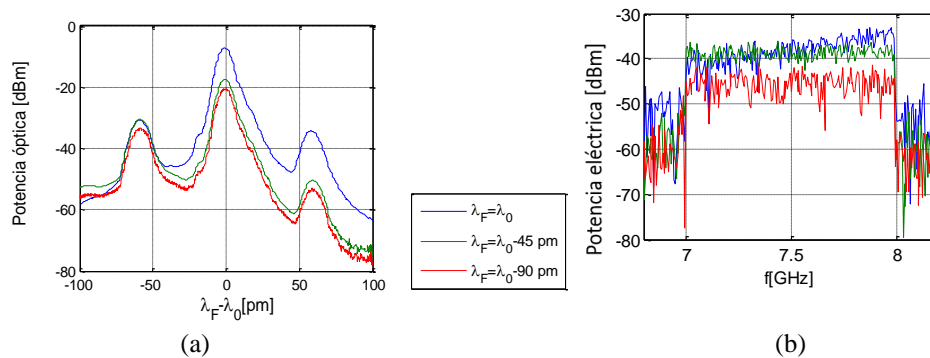


Fig. 36. Espectros óptico (a) y eléctrico (b) de la señal filtrada en diferentes posiciones.

La Fig. 37 nos muestra el CSRR y la ER de la señal. En este caso, el máximo del BER no se obtiene para una ER > 20 dB. Sin embargo, la señal tiene bastante calidad como para ser demodulada adecuadamente.

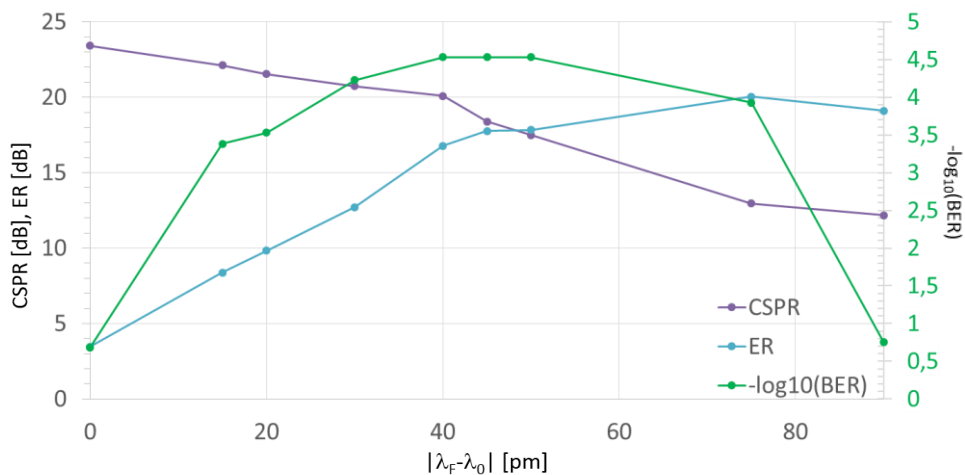


Fig. 37. C SPR [dB] (violeta), ER [dB] (azul) y BER (verde) vs posición de los filtros.

El EVM tiene un comportamiento análogo al BER, como se ilustra en la Fig. 38. Los valores más pequeños de EVM se corresponden con los mejores valores de BER. Se puede extrapolar la explicación del comportamiento del BER en función de la posición del filtro al EVM.

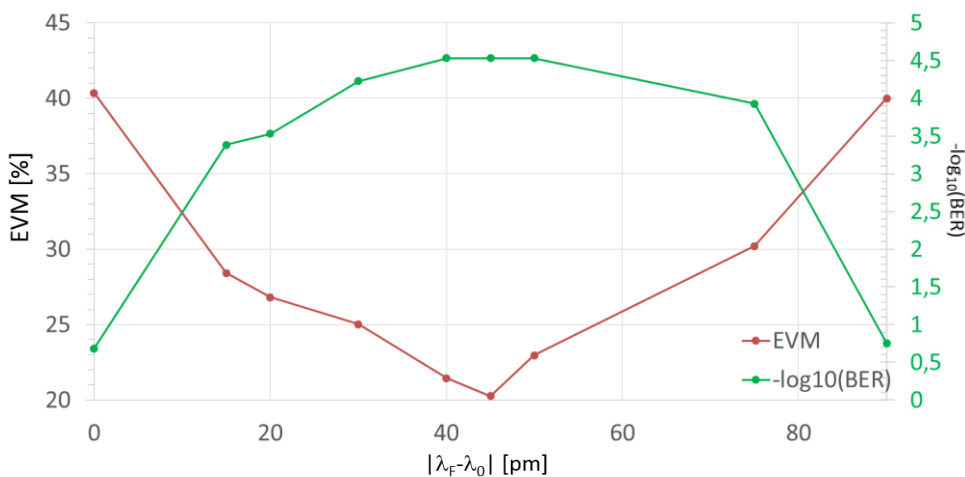


Fig. 38. EVM [%] (rojo) y BER (verde) vs posición de los filtros.

Los mejores valores de BER son de $2.95 \cdot 10^{-5}$, al igual que en el caso de un filtro; sin embargo, el mejor EVM ha empeorado, pasando de 17.15 % a 20.28 %. Aun así, la señal demodulada cuando la frecuencia central del filtro está desplazada 45 pm de la portadora óptica tiene una calidad bastante aceptable, como se puede observar en la Fig. 39d.

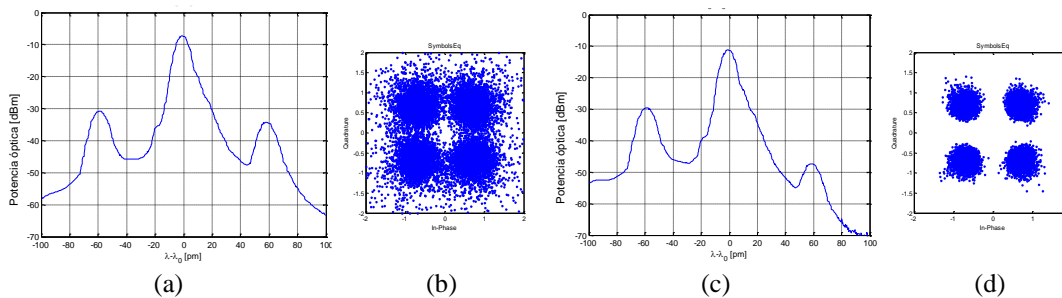


Fig. 39. Espectro óptico (a, c) y constelación (b, d) cuando $\lambda_F = \lambda_0$ (a,b) and when $\lambda_F = \lambda_0 - 45$ pm (c,d)

Si comparamos los valores de BER del sistema SSB al actual sistema, se puede observar que en este caso los mejores valores se obtienen para separaciones de filtro y portadora óptica más pequeños. Este hecho es debido al efecto que tiene la introducción del filtro demultiplexor, pues la respuesta del sistema tiene en cuenta la concatenación de ambos filtros. El efecto inmediato que se percibe gráficamente es una compresión de las posiciones del BER respecto de la posición del filtro, si bien es cierto que los valores del BER se mantienen.

III.2.2. Sistema experimental WDM-SSB-OOFDM

La Fig. 40 muestra el montaje experimental del sistema WDM-SSB-OOFDM, en el que se van a transportar la LSB de una señal de RF junto con la USB de otra señal de RF, con portadoras ópticas distintas. En este caso, la señal se transmite a lo largo de un enlace óptico de 50 y 70 km. Como comentamos previamente, el primer filtro OSSB también nos servirá de multiplexor, de manera que a la salida del mismo tendremos multiplexadas las señales LSB del láser 1 y la señal USB del láser 2. En detección disponemos de un filtro OSSB que configuramos para que filtre uno de los dos canales, de modo que el PD lo detecte y sea procesado por el receptor.

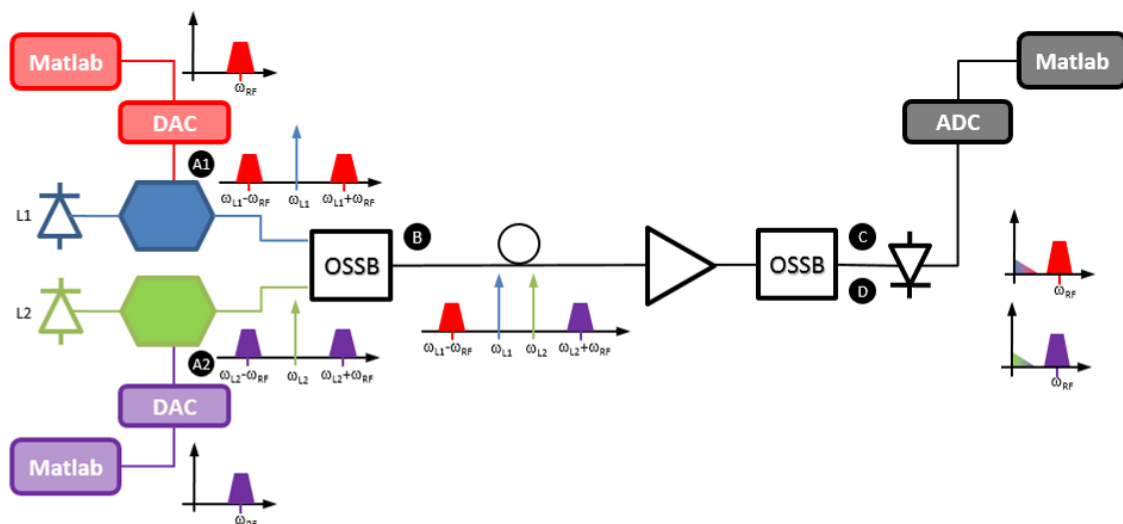


Fig. 40. Montaje experimental del sistema WDM-SSB-OOFDM.

Como señal OFDM introducimos la indicada en la Tabla 5. El láser 1 se sitúa en 1550.881 nm, que modula la señal RF y es filtrada con $f_1=1550.850$ nm y ancho de banda de 0.1 nm. Se hace lo propio con el láser 2, cuya portadora óptica emitida está en 1551.119 nm, y la señal modulada DSB se filtra con $f_2=1551.205$ nm, de ancho de banda 0.1 nm. La separación entre portadoras ópticas es de 248 pm, que equivale a una separación en frecuencia de 31 GHz. La señal completa tiene un ancho de 47 GHz, de modo que se encuentra dentro de un canal de comunicaciones. Los espectros en los puntos A1, A2, B, C y D que señala la Fig. 40 se ilustran en la Fig. 41. A la salida de cada modulador se obtienen las señales en DSB A1 y A2 (Fig. 41a), que conformarán las bandas LSB y USB de la señal WDM en el punto B (Fig. 41b). Dicha señal atraviesa el enlace de 50 km y se filtra una de las dos bandas. El filtrado de la banda LSB se muestra en la Fig. 41c, mientras que la banda USB aparece en la Fig. 41d.

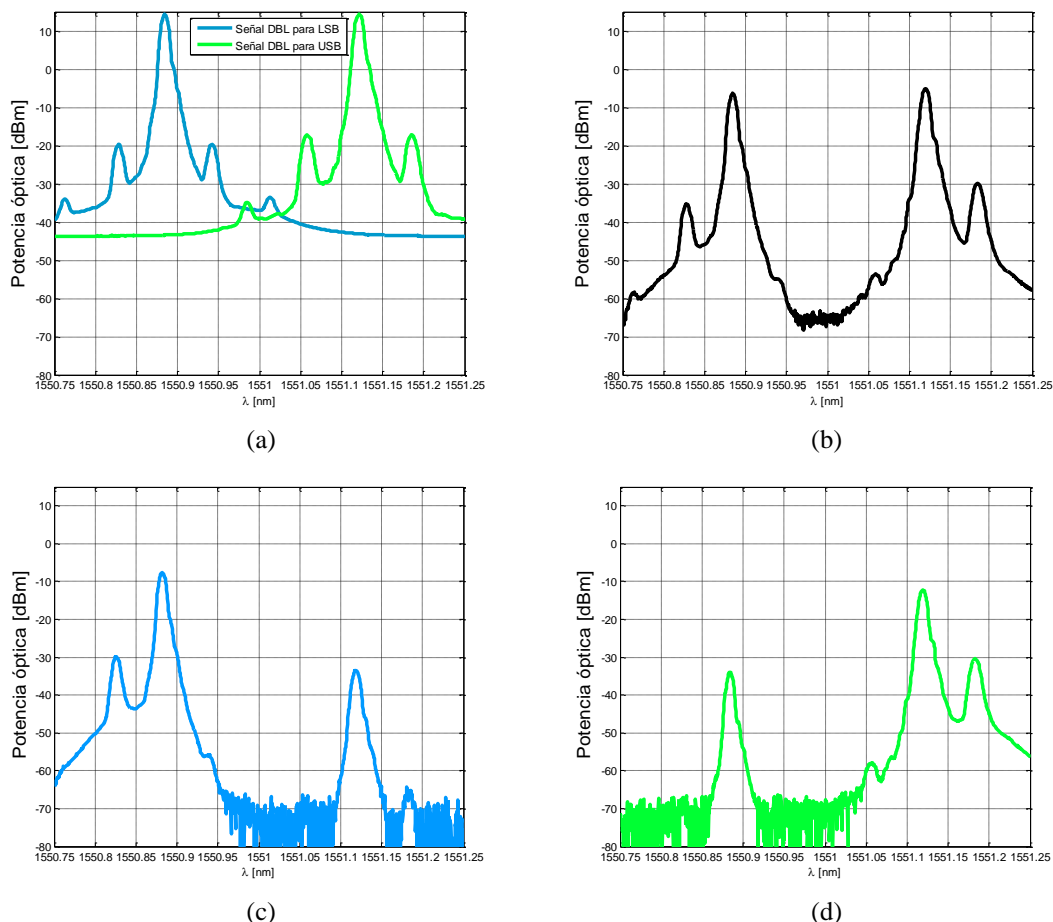


Fig. 41. Espectros ópticos en los puntos A1 y A2 (a), B (b), C (c) y D (d) del sistema WDM-SSB-OOFDM.

Como se aprecia en las Fig. 41c-d, el nivel de crosstalk introducido por el canal adyacente cuando se demultiplexan las señales tiene un valor importante; no obstante, la demodulación de las señales se realiza adecuadamente.

En la Tabla 6 se recogen los valores obtenidos experimentalmente para la transmisión de dos señales SSB-OOFDM multiplexadas en longitud de onda. Cabe destacar que todos los valores de EVM están por debajo del 30 % y, en consecuencia, los valores de BER también están por debajo del límite que establece el FEC. Los valores de la ER también están por encima de los 20 dB, por lo que asumimos que se trata de una buena supresión de la banda indeseada.

Configuración	P_{RF} [dBm]	P_O [dBm]	CSPR [dB]	ER [dB]	EVM [%]	BER
L1 ON L2 OFF	-21.89	-6.73	24.07	22.62	29.03	$3.54 \cdot 10^{-4}$
L1 OFF L2 ON	-29.95	-12.03	18.30	27.37	25.34	$<2.95 \cdot 10^{-5}$
L1 ON	-21.22	-7.61	22.18	26.05	27.60	$1.18 \cdot 10^{-4}$
L2 ON	-29.25	-12.29	18.17	27.60	27.01	$1.77 \cdot 10^{-4}$

Tabla 6. Resumen de los valores obtenidos en el sistema WDM-SSB-OOFDM para $L=50$ km.

La Fig. 42 muestra las constelaciones de las señales LSB (a) y USB (b). Como es de esperar por los valores de BER y EVM obtenidos.

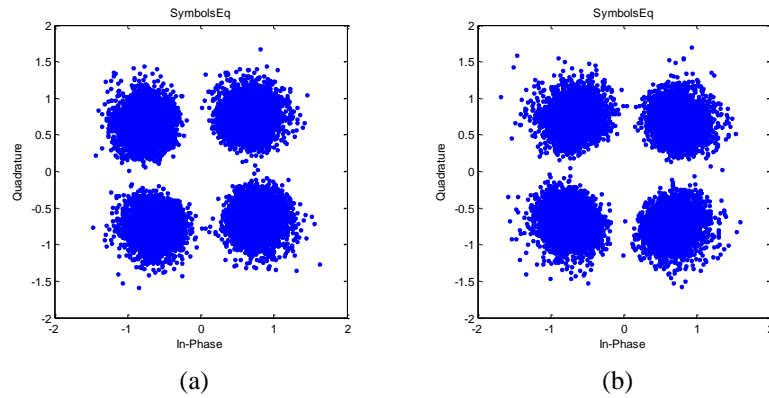


Fig. 42. Constelación de las señales detectadas (a) LSB (b) USB.

De forma similar al esquema presentado en la Fig. 40, se transmite la señal para una distancia de 70 km, distancia que nos sirvió para mostrar la necesidad de la transmisión de señales SSB debido a la degradación que produce el efecto de supresión de portadora. Ubicando los láseres en 1550.884 nm y 1551.103 nm, con filtros paso banda de 0.2 nm de ancho centrados en 1550.791 nm y 1551.206 nm, respectivamente, se obtienen unos valores de $BER=4.71 \cdot 10^{-4}$ y $EVM=30.60\%$ para la señal LSB, y $BER=2.75 \cdot 10^{-4}$ y $EVM=28.27\%$ para la señal USB, recogidos en la Tabla 7. El conjunto de la señal completa ocupa 43.31 GHz (que equivale a 346.5 pm), de modo que queda dentro del canal de comunicaciones, y cumple con los requisitos de calidad establecidos.

Configuración	EVM [%]	BER
L1 ON	30.60	$4.71 \cdot 10^{-4}$
L2 ON	28.27	$2.75 \cdot 10^{-4}$

Tabla 7. Resumen de los valores obtenidos en el sistema WDM-SSB-OOFDM para L=70 km

Los valores obtenidos para WDM-SSB-OOFDM a lo largo de los enlaces ópticos de 50 y 70 km están por debajo del límite que establece el FEC. La aplicación de dicha técnica de corrección de errores permitiría reducir aún más la cantidad de bits erróneos recibidos. Los valores de ER muestran la buena cancelación de banda indeseada que consigue el filtro propuesto; no obstante, el nivel de crosstalk es alto, y su reducción podría permitir la aproximación de las portadoras ópticas para un mejor uso del canal.

IV. Conclusiones y líneas futuras.

IV.1. Conclusiones.

En este trabajo se han presentado y demostrado experimentalmente diferentes estructuras de transmisión óptica de señales OFDM. En primer lugar analizamos las capacidades que tenía el software incorporado en los equipos para la generación/recepción de señales, y los complementamos con la implementación de un algoritmo en Matlab, mejorando el valor del EVM para señales de ancho de banda mayor de 1 GHz.

Se han verificado los efectos que tienen la modificación de diferentes parámetros en las señales DSB-OOFDM, demostrando que a mayor potencia de la señal transmitida y del láser, mejores prestaciones se obtienen tanto en términos de EVM como de BER. Asimismo, un incremento en el ancho de banda de la señal nos producirá una mayor dispersión de los puntos de la constelación detectada. El tipo de modulación elegida para las subportadoras de datos también resulta relevante, puesto que para constelaciones de 16 niveles y a pesar de que el EVM pueda tener mejores valores que para 4 niveles, los bits recibidos tienen más errores debido a la estrecha distancia de que disponen los umbrales de decisión.

El efecto de supresión de portadora en sistemas DSB-OOFDM nos ha planteado la necesidad de la implementación de los sistemas SSB-OOFDM. Dichos esquemas se han demostrado experimentalmente, obteniendo calidades de transmisiones con $BER < 2.95 \cdot 10^{-5}$ con una adecuada elección de los parámetros del filtro óptico.

Para el aumento de las capacidades y haciendo uso del ancho de banda de que dispone un canal de comunicaciones DWDM, se ha implementado y plasmado de forma experimental el sistema WDM-SSB-OOFDM, que multiplexa dos señales SSB-OOFDM en longitud de onda, consiguiendo transmisiones a 50 y 70 km con niveles de BER por debajo del límite que establece el FEC.

IV.2. Líneas futuras.

El trabajo presentado es sólo el primer paso del proceso de investigación de las técnicas ópticas de transmisión de señales OFDM. Este paso nos abre un abanico de posibilidades que constituyen las líneas futuras del trabajo que se realizará en los próximos años.

Existen otros patrones de ubicación de pilotos además de los conocidos comb-type y block-type, que varían en su disposición respecto al equiespaciado o a la ubicación. La inserción de pilotos en los elementos de la diagonal ya ha sido implementado; sin embargo, en [28] se proponen otras estructuras híbridas que presentan simetrías y que serán analizadas y aplicadas experimentalmente.

Los sistemas coherentes han sido mencionados en este trabajo pero no llevados a la práctica. La fácil compensación por la degradación de los canales, así como la necesidad de transmitir menor potencia para conseguir los mismos valores de BER hacen de esta técnica una oportunidad

atractiva. En los próximos meses está previsto demostrar experimentalmente ese tipo de sistemas, utilizando moduladores I/Q y estructuras de detección coherente apropiadas.

Por otro lado, resulta necesario el estudio de diferentes estructuras de filtrado, tales como FBGs, para mejorar la señal SSB-OOFDM, de manera que el roll-off del filtro sea mayor, es decir, que tenga una caída más pronunciada fuera de la banda de paso, y el BER se vea mejorado. Del mismo modo, un mejor filtrado nos permitirá reducir la distancia entre las portadoras ópticas e incluir una tercera señal, en pro de ampliar la capacidad de nuestro canal de comunicaciones WDM-SSB-OOFDM.

Un avance en el aumento de la capacidad del sistema consiste en utilizar una modulación de más niveles. No obstante, se ha evidenciado que el valor del EVM es más restrictivo para este caso. La modulación de los datos en 16QAM sobre señales SSB-OOFDM está dentro de las tareas que se realizarán. Asimismo, otro método para aumentar la capacidad es la utilización de las dos polarizaciones, como se demuestra experimentalmente en [33], permitiendo multiplicar por dos la capacidad transmitida.

El uso de RSOAs para transmitir señales OOFDM en el enlace ascendente de esquemas que emplean la centralización de fuentes ópticas es otra de las líneas que se llevarán a cabo en los próximos meses.

Debido a su bajo coste, facilidad de instalación y un ancho de banda aceptable, la transmisión sobre fibra óptica de plástico planteada sobre señales OOFDM en [34] es una de las líneas cuyas prestaciones se van a investigar y evaluar de forma experimental.

AGRADECIMIENTOS

El Trabajo Final de Máster es parte del proyecto de investigación y desarrollo “Nueva Generación de Técnicas Ópticas de Transmisión OFDM para Futuras Redes WDM-PONs”, con referencia TEC2011-26642, cuya Investigadora Principal es Beatriz Ortega Tamarit.

No quisiera desaprovechar la oportunidad de agradecer el esfuerzo y la colaboración de mis directores de Trabajo Final de Máster, José Mora y Beatriz Ortega, por darme luz cuando más oscuro estaba todo. Nos ha costado encontrar el camino, pero esta senda seguro nos lleva a buen puerto.

Llegar todas las mañanas al despacho y al laboratorio es mucho más fácil si te vas a encontrar con Manuel, Rocío o Berni, cómplices de tantos sinsabores y testigos de tantas alegrías. Gracias por poner un barrier en vuestras vidas. Por los findes en km y los días en nm.

Gracias, también, a mi yaya Jesusa y mis abuelos Ramiro y Pura, por poner todas las manos necesarias en mi infancia, y todos los hombros posibles en el resto de mi vida, además de comprender tantas ausencias. Siempre estaré en deuda con vosotros. Soy sólo un pedacito de vuestra generosidad.

Y en honor a Ernesto – que allá donde esté me seguirá mirando mal – por tanto que aprendí sólo de estar junto a él. Grazie.

Por tantos 3, por tantos colores, por tantas luces, por tantos Windows...

“There are times you don’t find science. Don’t give up. Finally, science finds you”

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cisco® Visual Networking Index, *The Zettabyte Era – Trends and Analysis*, White Paper, Cisco, 2014.
- [2] S.B. Weinstein, *The History of Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 11, pp. 26-35, Nov 2009.
- [3] N. Cvijetic, *OFDM for Next-Generation Optical Access Networks*, Journal of Lightwave Technology, vol. 30, no. 4, Feb 2012.
- [4] W. Shieh, I. Djordjevic, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications*, Academic Press, 2009.
- [5] A.J. Lowery, L. Du, J. Armstrong, *Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems*, Conference on Optical Fiber Communication, 2006.
- [6] I.B. Djordjevic, B. Vasic, *Orthogonal frequency division multiplexing for high-speed optical transmission*, Optics Express, vol. 14, no. 9, May 2006.
- [7] W. Shieh, C. Athaudage, *Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing*, Electronic Letters, vol. 42, 2006.
- [8] J.M. Tang, P.M. Lane, K.A. Shore, *Transmission performance of adaptively modulated optical OFDM signals in multimode fiber links*, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 18, 2006.
- [9] X.Q. Jin, R.P. Giddings, J.M. Tang, *Real-time transmission of 3 Gb/s 16-QAM encoded optical OFDM signals over 75 km SMFs with negative power penalties*, Optics Express, vol. 17, 2009.
- [10] R.P. Giddings, X.Q. Jin, E. Hugues-Salas, E. Giacomidis, J.L. Wei, J.M. Tang, *Experimental demonstration of a record high 11.25 Gb/s real-time optical OFDM transceiver supporting 25 km SMF end-to-end transmission in simple IMDD systems*, Optics Express, vol. 18, 2010.
- [11] A.J. Lowery, L.B. Du, *Optical orthogonal division multiplexing for long haul communications: A review of the first five years*, Optical Fiber Technology, vol. 17, 2011.
- [12] A.J. Lowery, L.B. Du, J. Armstrong, *Performance of Optical Ultralong-Haul WDM Lightwave Systems*, Journal of Lightwave Technology, vol. 25, no. 1, 2007.
- [13] D. Fonseca, A.V.T. Cartaxo, P. Monteiro, *Optical single-sideband transmitter for various electrical signaling formats*, Journal of Lightwave Technology, vol. 24, 2006.
- [14] B.J.C. Schmidt, A.J. Lowery, J. Armstrong, *Experimental demonstrations of 20 Gbit/s direct-detection optical OFDM and 12 Gbit/s with a colorless transmitter*, Conference on Optical Fiber Communications, 2007, PDP18.
- [15] S.L. Jansen, I. Morita, N. Tadeka, H. Tanaka, *20-Gb/s OFDM transmission over 4160-km SSMF enabled by RF-pilot tone phase noise compensation*, Conference on Optical Fiber Communication, 2007, PDP15.
- [16] R.W. Chang, *Synthesis of Band-Limited Orthogonal Signals for Multichannel Data Transmission*, The Bell System Technical Journal, 1966.
- [17] D. Pastor, F. Ramos, J. Capmany, *Sistemas de Comunicaciones Ópticas*, Ed. UPV, 2007.
- [18] C. Sánchez, *Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexed communication systems: analysis, design and optimization*, Ph. D. Tesis, UPV, 2014.

- [19] J. Armstrong, *OFDM for Optical Communications*, Journal of Lightwave Technology, vol. 27, no. 3, Feb 2009.
- [20] Q. Yang, A.A. Amin, W. Shieh, *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications*, Chapter 2, Ed. Springer, 2011.
- [21] H.B. Zhang, X.W. Yi, Q.W. Zhang, Y. Ling, M.L. Deng, E. Hugues-Salas, R.P. Giddings, Y. Hong, M. Wang, J.M. Tang, *Robust real-time 15.125Gb/s adaptive optical OFDM transmissions over 100m OM2 MMFs utilizing directly modulated VCSELs subject to optical injection locking*, Optics Express, vol. 22, no. 1, Jan 2014.
- [22] X. Zhang, Z. Li, C. Li, M. Luo, H. Li, C. Li, Q. Yang, S. Yu, *Transmission of 100-Gb/s DDO-OFDM/OQAM over 320-km SSMF with a single photodiode*, Optics Express, vol. 22, no. 10, 2014.
- [23] V. Vujicic, P.M. Anandarajah, C. Browning, L.P. Barry, *WDM-OFDM-PON Based on Compatible SSB Technique Using a Mode Locked Comb Source*, IEEE Photonics Technology Letters, 2013.
- [24] L. Liu, X. Yang, J. Li, M. Bi, H. He, W. Hu, *Experimental evaluation of pilot arrangement for channel estimation in OFDM systems*, Communications and Photonics Conference, 2011.
- [25] A. Peled, A. Ruiz, *Frequency domain data transmission using reduced computational complexity algorithms*, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, vol. 5, 1980.
- [26] J. Lee, F. Breyer, S. Randel, J. Zeng, F. Huijskens, H.P. van den Boom, A.M. Koonen, N. Hanik, *24-Gb/s Transmission over 730 m of Multimode Fiber by Direct Modulation of an 850-nm VCSEL Using Discrete Multi-Tone Modulation*, Conference on Optical Fiber Communications, 2007.
- [27] Jongkyung Kim, Sangjin Lee, and Jongsoo Seo, *Synchronization and Channel Estimation in Cyclic Postfix based OFDM System*, Vehicular Technology Conference, 2006.
- [28] Q. Yu, R. Li, *Research on Pilot Pattern Design of Channel Estimation*, Journal of Automation and Control Engineering, vol. 1, no. 2, 2013.
- [29] G.H. Smith, D. Novak, Z. Ahmed, *Technique for optical SSB generation to overcome dispersion penalties in fibre-radio systems*, Electronic Letters, 1997.
- [30] Z. Xu, R. Hui, M. O'Sullivan, *Dual-band OOFDM system based on tandem single-sideband modulation transmitter*, Optics Express, 2009.
- [31] Y. Zhang, M. O'Sullivan, R. Hui, *Theoretical and experimental investigation of compatible SSB modulation for single long-distance optical OFDM transmission*, Optics Express, 2010.
- [32] A. Ali, J. Leibrich, W. Rosenkranz, *Design Considerations and Performance Comparison of High-Order Modulation Formats using OFDM*, Journal of Networks, vol. 7, no. 5, 2012.
- [33] B.J.C. Schmidt, Z. Zan, L.B. Du, A.J. Lowery, *100 Gbit/s Transmission Using Single-Band Direct-Detection Optical OFDM*, Conference on Optical Fiber Communications, 2009.
- [34] I.B. Djordjevic, *LPDC-Coded OFDM Transmission Over Graded-Index Plastic Optical Fiber Links*, IEEE Photonics Technology Letters, Jun 2007.