

Raúl Sardiñas Fernández

SISTEMA HÍBRIDO DE
RADIOFRECUENCIA Y FIBRA
ÓPTICA PARA LA TRANSMISIÓN
MULTICANALIZADA DE SEÑALES
DIGITALES

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

Director: Dr. Alejandro García Juárez

Codirector: Dr. Ignacio E. Zaldívar Huerta

UNIVERSIDAD DE SONORA

10 de agosto de 2019

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



UNIVERSIDAD DE SONORA
División de Ciencias Exactas y Naturales

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ELECTRÓNICA
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA

SISTEMA HÍBRIDO DE RADIOFRECUENCIA Y FIBRA ÓPTICA PARA LA TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES DIGITALES

Tesis presentada por:

Raúl Sardiñas Fernández

Candidato:

Ing. Raúl Sardiñas Fernández

Director de Tesis:

Dr. Alejandro García Juárez

Codirector de Tesis:

Dr. Ignacio E. Zaldívar Huerta

10 de agosto de 2019

Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis a:

Mis padres Raúl Sardiñas Llanes y Caridad Fernández Martínez, por apoyarme siempre, exigirme y creer en mí; por contribuir a mi formación durante todos los niveles educativos. Mi esposa María Elena García, por despertar en mí un deseo profundo por ser mejor cada día y luchar por un mejor futuro. Por estar presente en las buenas y las malas y por compartir una vida conmigo.

Mis abuelos, Roberto y Zoe por estar siempre presente en mi vida y apoyarme con todo lo que han podido.

A Epifania, Tamara y Abel por su apoyo económico para venir a México a realizar mis estudios de Maestría.

Todos mis amigos y compañeros de clases por compartir los buenos y malos momentos con ustedes.

Raúl Sardiñas Fernández

Agradecimientos

Por la culminación de esta tesis de maestría agradezco el apoyo total de mi director de tesis, el Dr. Alejandro García Juárez por dedicar muchas horas de trabajo para asesorarme durante el proyecto.

Agradezco al Dr. Ignacio E. Zaldívar Huerta por su apoyo como codirector de tesis y presentarme nuevos temas para la realización de artículos académicos.

Agradezco al Dr. Dainet Berman, coordinador de la maestría, por darme la oportunidad de acceder a la maestría, por realizar los trámites necesarios para poder venir desde Cuba.

Agradezco a CONACYT por el estímulo aportado durante 24 meses.

Agradezco a mis profesores de ingeniería y maestría por compartir sus conocimientos con nosotros.

Muchas gracias a todos.



Resumen

El presente trabajo describe un sistema híbrido de radiofrecuencia y fibra óptica (RoF) para la transmisión multicanalizada de señales digitales. Se presenta el estado del arte de la tecnología RoF tanto a nivel comercial como en investigación. Se describe el proceso de simulación de un sistema RoF para transmitir señales PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) con el software VPI Photonics. Se obtienen resultados experimentales de la transmisión multicanalizada de señales PRBS y se analiza el diagrama de ojo de las señales recibidas para comprobar la calidad de éstas y del esquema presentado. Se realiza la transmisión multicanalizada en tiempo real de señales HDMI con la utilización de tarjetas Raspberry Pi. El propósito del sistema es aprovechar el gran ancho de banda que brindan las comunicaciones ópticas para transmitir simultáneamente dos señales HDMI de gran ancho de banda a través de 30 Km de fibra óptica. Los resultados experimentales demuestran el rendimiento potencial del sistema para la transmisión multicanalizada de señales HD de alta velocidad utilizando la tecnología RoF.

Palabras clave. Sistema RoF, HDMI, PRBS, Transmisión multicanalizada.

El siguiente artículo fue publicado por la SPIE (*Society of Photo-optical Instrumentation Engineers*) en su sección *Proceedings of SPIE*:

R. Sardiñas-Fernández et al. *Generation of microwave signals by heterodyning and multiplication techniques, a comparison.* Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII Conference, SPIE Photonics West, 2019.

Abstract

The present work describes a radio over fiber system (RoF) for multi-channel transmission of digital signals. The state of the art of the RoF technology is presented in the fields of industry and research. The simulation of a RoF system to transmit PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) signals is described. The simulation is performed using the VPI Photonics software. The experimental results of the multi-channel transmission of PRBS signals are depicted and analyzed. The quality of the received signals is measured using the eye diagram in a digital oscilloscope. A real-time multi-channel transmission to send HDMI signals through 30 km of optical fiber is carried out. Two Raspberry Pi boards are used to conduct the experiment. The purpose of this system is to take advantage of the huge bandwidth of the optical communications in order to transmit simultaneously two HDMI signals with a high bandwidth. The experimental results demonstrates the potential system performance for multichannel transmission of high-speed HD signals using radio over fiber technologies.

Keywords. RoF systems, HDMI, PRBS, Multi-channel transmission.

This article was published by Proceedings of SPIE :

R. Sardiñas-Fernández *et al.* *Generation of microwave signals by heterodyning and multiplication techniques, a comparison.* Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII Conference, SPIE Photonics West, 2019.

Índice general

Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
1. Introducción	1
1.1. Sistemas RoF	3
1.2. Hipótesis	6
1.3. Justificación	6
1.4. Objetivo General	6
1.5. Objetivos Particulares	6
1.6. Metas	7
1.7. Organización de la tesis	7
2. Sistemas RoF	9
2.1. Introducción	9
2.2. Tecnología RoF en el espectro electromagnético	10
2.3. Principio de funcionamiento del Sistema RoF	10
2.4. Fuente óptica	13
2.4.1. Láser DFB	13
2.5. Modulación Electro-óptica	15
2.5.1. Modulación externa	15
2.6. Aislador óptico	18
2.7. Controlador manual de polarización	18

2.8. Acoplador óptico	19
2.9. Fotodetector	20
2.10. Fibras ópticas	21
2.10.1. Atenuación de fibras ópticas	22
2.10.2. Dispersión en fibras ópticas	23
2.10.3. Fibra óptica monomodo	25
2.11. Filtros Ópticos	26
2.12. Tecnología HDMI	28
2.12.1. Señal HDMI	28
2.13. Conclusiones	29
3. Transmisión multicanalizada de señales PRBS: Simulación y Resultados Experimentales	31
3.1. Introducción	31
3.2. Señal PRBS con codificación NRZ	31
3.2.1. Espectro de potencia de las señales codificadas NRZ	32
3.3. Simulación	35
3.4. Resultados Experimentales	38
3.5. Diagrama de Ojo de las señales digitales PRBS	40
3.5.1. Diagrama de ojo de la señal transmitida	43
3.5.2. Diagrama de ojo de las señales recibidas	44
3.6. Conclusiones	45
4. Multicanalización de señales digitales HDMI	47
4.1. Introducción	47
4.2. Esquema experimental	47
4.3. Generación y recepción de señales HDMI	48
4.4. Resultados experimentales	50
4.5. Conclusiones	56
5. Trabajo a Futuro	57
A. Generation of microwave signals by heterodyning and multiplication techniques: a comparison.	65

Índice de figuras

1.1. Comparación en la atenuación del cable coaxial y la fibra óptica	2
1.2. Sistema fotónico de microondas básico a modulación externa.	3
1.3. Red HFC.	4
2.1. Esquema básico sistema RoF	9
2.2. Esquema detallado de un sistema RoF	11
2.3. Respuesta en frecuencia del sistema comportándose como un filtro fotónico de microondas.	12
2.4. Espectro óptico láser DFB	14
2.5. Diagrama del modulador Mach-Zehnder	16
2.6. Función de transferencia del Modulador Mach-Zehnder	17
2.7. Funcionamiento del aislador óptico	18
2.8. Funcionamiento del aislador óptico. Dirección contraria	19
2.9. Característica de transferencia del fotodiodo	21
2.10. Estructura de la fibra óptica	21
2.11. Factores de atenuación y su dependencia con la longitud de onda	23
2.12. Efecto de dispersión	24
2.13. Curva de dispersión cromática	26
2.14. Filtro Fabry-Perot	27
2.15. Espectro de una señal HDMI de 6 Gb/s	29
3.1. Patrón de una señal PRBS con codificación NRZ	32
3.2. Función de autocorrelación	33
3.3. Derivada de la función de autocorrelación	33
3.4. Espectro de la señal PRBS con codificación NRZ	34
3.5. Esquema simulado en VPI Photonics	35

3.6. Señal digital transmitida	36
3.7. Espectro óptico de la señal a la entrada de la fibra óptica	37
3.8. Señal PRBS recibida 1.	37
3.9. Señal PRBS recibida 2	38
3.10. Esquema experimental señales digitales PRBS	39
3.11. Señal digital PRBS transmitida a 1GHz	39
3.12. Señal digital PRBS recibida modulada a 1548 nm	40
3.13. Señal digital PRBS recibida modulada a 1554 nm	41
3.14. Diagrama de ojo de la señal digital ideal	41
3.15. Diagrama de ojo de una señal digital típica	42
3.16. Distribución normal de los datos. Nivel uno y nivel cero	42
3.17. Diagrama de ojo de la señal transmitida	43
3.18. Diagrama de ojo de la señal recibida que fue modulada a 1548 nm.	44
3.19. Diagrama de ojo de la señal recibida que fue modulada a 1554 nm.	45
4.1. Esquema experimental	48
4.2. Generación de la señal HDMI	49
4.3. Recepción de la señal HDMI	49
4.4. Espectro eléctrico de la señal enviada a 1547.5 nm	50
4.5. Espectro eléctrico de la señal enviada a 1552.5 nm	51
4.6. Espectros de señales HDMI con diferentes fuentes de generación de señal.	51
4.7. Espectro óptico a la salida de la fibra óptica	52
4.8. Espectro óptico a la salida del filtro óptico. Filtro centrado en 1547.5 nm.	53
4.9. Espectro óptico a la salida del filtro óptico. Filtro centrado en 1552.5 nm.	53
4.10. Fotografías del arreglo experimental propuesto. (a) Generación de las señales HDMI y de las señales ópticas. (b) Combinación de las señales y transmisión a través de la fibra óptica. (c) Recepción de cada señal en el monitor de televisión digital.	54
4.11. Señal recibida 1	55
4.12. Señal recibida 2	55
5.1. Esquema para trabajo a futuro, incorporando señales 4K-HDMI y antenas de bocina para transmisión inalámbrica	58

Índice de tablas

2.1. Espectro electromagnético. [23, 24]	10
3.1. Comparación del parámetro SNR	45

Introducción

Los enlaces de microondas convencionales consistentes de una combinación de cable coaxial u otra guía de onda metálica de radiofrecuencia así como componentes eléctricos (amplificadores, circuladores, mezcladores y filtros), se ven limitados en ancho de banda y en distancia del enlace debido a la alta atenuación de estos medios de transmisión, tal como se observa en la Figura 1.1.

Las comunicaciones a través de fibra óptica, representan una destacada tecnología en continuo desarrollo por más de 30 años. Entre las ventajas que distinguen a la fibra óptica se encuentran: peso ligero, tamaño pequeño, inmunidad al ruido y a la interferencia electromagnética así como los bajos valores de atenuación y dispersión que permiten transmitir un gran rango de longitudes de onda a altas tasas de transmisión sobre distancias de varias decenas de kilómetros [1]. La Figura 1.1 muestra una gráfica del factor de atenuación en función de la frecuencia. En dicha gráfica se realiza una comparación entre el cable coaxial y la fibra óptica monomodo a 1550 nm. Es importante resaltar que el parámetro de atenuación que se compara está expresado en dB/Km. La fibra óptica monomodo tiene una atenuación de 0.2 dB/km independientemente de la frecuencia de la señal transmitida. En cambio, el cable coaxial presenta una atenuación de 3 dB/km para una frecuencia de 100 MHz pero alcanza una alta atenuación de 80 dB/km para una frecuencia de 10 GHz.

A partir de estas ventajas que introducen las comunicaciones ópticas surge la fotónica de microondas que es un campo interdisciplinario que estudia la interacción entre ondas de microondas y ópticas en dispositivos optoelectrónicos para la generación, distribución, control y propagación de señales de microondas utilizando esquemas híbridos de radiofrecuencia y fibra óptica [3]. Los componentes optoelectrónicos que se usan en un sistema

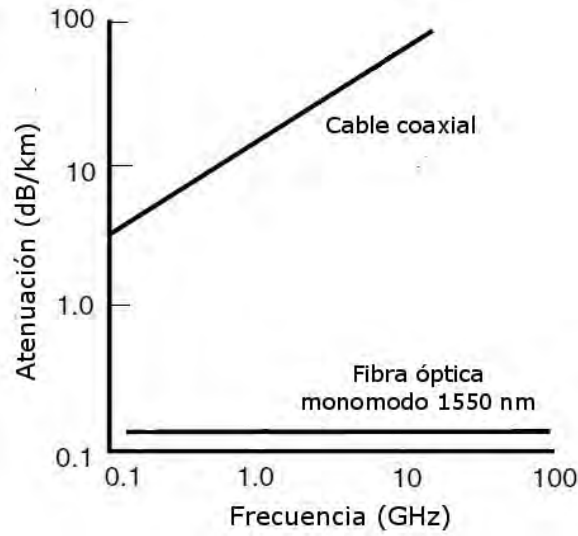


Figura 1.1: Comparación en la atenuación del cable coaxial y la fibra óptica. Reproducido de [2]

fotoónico de microondas (moduladores electroópticos, acopladores ópticos, filtros ópticos, amplificadores ópticos, etc.), permiten la transmisión de señales analógicas y digitales a través de la fibra, además del procesamiento de señales de microondas en el dominio óptico.

La Figura 1.2 muestra un sistema fotoónico de microondas básico a modulación externa, en el cual señales eléctricas en las frecuencias de las microondas son denotadas por una (E), mientras que las señales ópticas provenientes de una fuente óptica son denotadas por una (O). La conversión electro-óptica (E/O) se realiza con un modulador electro-óptico, mientras que la conversión óptico a eléctrico (O/E) se realiza con un fotodetector. Entre ambos dispositivos se encuentra el medio óptico que en la mayoría de los casos está dado por una fibra óptica. A la salida del fotodetector se obtiene la señal eléctrica transmitida.

El campo de la fotoónica de microondas tiene entre sus investigaciones más importantes las referentes a la tecnología RoF [4], la generación y procesamiento fotoónico de señales y formas de ondas de microondas [5], los sensores fotoónicos de microondas [6], los filtros fotoónicos de microondas [7], los arreglos de antenas de fase controlados ópticamente [8] y la ingeniería biomédica [1].

En este trabajo se describe un sistema RoF, que es la tecnología con mayor impacto en la actualidad dentro del campo de la fotoónica de microondas [9].

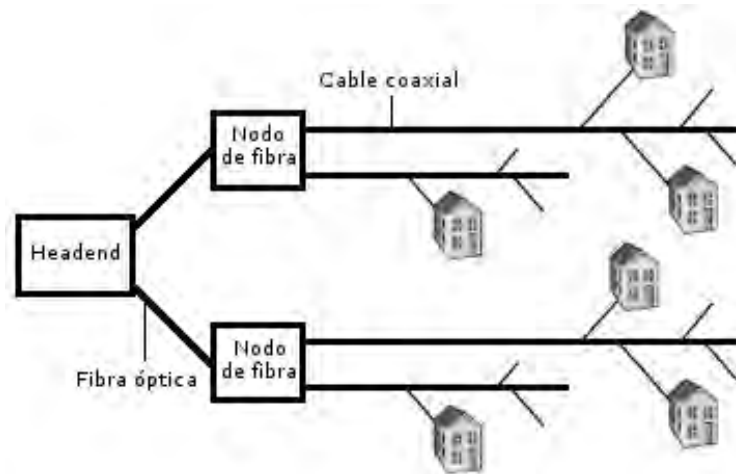


Figura 1.3: Red HFC.

mediante las cuales se transmiten las señales de televisión convencional, la televisión por protocolo de internet (IPTV), telefonía e internet a través de la fibra óptica mediante el concepto *triple play* que constituye un empaquetamiento de servicios y contenidos audiovisuales (televisión, telefonía e internet de banda ancha) [11].

Debido a que el alcance de la tecnología RoF se ha extendido a un rango de más de 100 km en enlaces RoF de alto rango dinámico, la tecnología es una alternativa superior a la convencional banda base sobre fibra. [12].

En los campos de la ingeniería de microondas y sistemas de radar, la tecnología RoF se utiliza para enlazar diversas antenas en un sistema de antenas en fase. El lector puede consultar información sobre esta aplicación de los sistemas RoF en la referencia [8].

Las investigaciones más recientes en la tecnología RoF están dirigidas a esquemas donde se utiliza la tecnología multiplexación por división de la longitud de onda (WDM-Wavelength Division Multiplexing)[13, 14]. Esta tecnología utiliza una fibra óptica para transmitir información en dos direcciones (full-duplex) [10]. Dentro de esta tecnología se encuentran la multiplexación por división de la longitud de onda densa (DWDM-Dense Wavelength Division Multiplexing), que combina diferentes longitudes de onda para ser enviadas a través de la red de fibra óptica, para utilizar mayor ancho de banda y maximizar los datos totales. DWDM es un sistema multiplexado con capacidad de canal de hasta 200 GHz [10]. La tecnología RoF basada en DWDM ha ganado cobertura a nivel internacional logrando alta velocidad y capacidad en varios sistemas de comunicaciones propuestos. Un

sistema RoF-DWDM optimizado de 32 canales y 40 Gbps fue propuesto en [15], donde se plantea cómo controlar la mezcla de cuatro ondas (FWM-Four Wave Mixing) que ocurre en sistemas RoF-DWDM debido a armónicos de 3er orden. De igual forma, un esquema de un enlace RoF-DWDM de 16 canales fue presentado en [16] donde se reportó una tasa de error de bit (BER) de 10^{-18} y un factor de calidad Q (relación de señal a ruido óptica para un sistema de comunicaciones ópticas [17]) mayor a 18 dB, lo cual demostró que el sistema fue exitoso y libre de error.

La tecnología WDM-RoF-PON donde (PON-Passive Optical Networks) se refiere a redes ópticas pasivas, es una tecnología superior a la desarrollada hace 10 años conocida como WDM-PON, ya que incluyéndole un sistema RoF significativamente mejora la capacidad y área de cobertura de las redes ópticas ya existentes. De esta forma, las señales de datos en banda base así como moduladas por señales de radiofrecuencia son transmitidas al mismo tiempo por redes de multiservicio [18]. Una transmisión bidireccional y simultánea de señales de banda base e inalámbricas basadas en un sistema WDM-RoF-PON fue propuesta en [19]; aquí se plantea un esquema con un BER muy bajo del orden de 10^{-9} , así como un diagrama de ojo abierto después de un enlace de 25 km de fibra óptica, lo cual muestra la calidad eléctrica de las señales recibidas. La arquitectura WDM-RoF-PON planteada ha tenido aplicación reciente en la industria con resultados satisfactorios para transmitir HDTV y CATV, y proveer comunicación inalámbrica de banda ancha.

La tecnología Multiplexación por División en Frecuencia de forma Ortogonal (OFDM-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) también está en constante investigación en el campo de los Sistemas RoF. En OFDM, los datos son transmitidos sobre un número de portadoras que son ubicadas en frecuencias particulares con bandas superpuestas. Se utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT) para la modulación, lo cual brinda ortogonalidad a las subportadoras, e impide que los demoduladores perciban frecuencias distintas a las suyas [20]. La integración de las tecnologías RoF y OFDM representa un factor importante para el desarrollo de nuevos servicios inalámbricos, extendiendo y mejorando la cobertura de la red a un costo efectivo. En este sentido, numerosos artículos han sido desarrollados desde el año 2015 [21]. Un esquema de RoF-OFDM para el desarrollo de una transmisión de largo alcance, alta tasa de transmisión y alta capacidad mediante los formatos de modulación Banda Lateral Única Óptica(OSSB) y Doble Banda Lateral Óptica (ODSB) se presentó en [20]. Aquí se demuestra que los sistemas RoF-OFDM tienen mejor rendimiento en Señal a Ruido (SNR) y BER que los sistemas RoF convencionales. Por otra parte, un sistema RoF-OFDM para la transmisión inalámbrica de

señales en la bandas V (57GHz) y W (91GHz) ha sido propuesto [22]. En este artículo se utilizan las bandas V(50-75GHz) y W(75-110GHz), las cuales tienen grandes anchos de banda disponibles en altas frecuencias, para incrementar la capacidad de transmisión inalámbrica.

1.2. Hipótesis

Es posible diseñar un sistema híbrido de radiofrecuencia y fibra óptica para transmitir de forma multicanalizada señales digitales de banda ancha HDMI, siendo recuperadas las señales de información en el receptor mediante la utilización de filtros ópticos.

1.3. Justificación

Los sistemas electrónicos de comunicaciones demandan un mayor ancho de banda en la actualidad. Es por ello que como solución a esta necesidad se emplean esquemas híbridos de radiofrecuencia y fibra óptica ya que la tecnología RoF combina las principales ventajas de ambas tecnologías: la baja atenuación y movilidad de los accesos inalámbricos así como un gran ancho de banda del enlace óptico y la inmunidad a la interferencia eléctrica del medio óptico. Por otra parte las señales HDMI se encuentran desplegadas a nivel mundial en muchos de los equipos de tecnología que utilizan los usuarios en sus casas. A raíz de esto se plantea el diseño y la demostración experimental de un sistema RoF para transmitir señales HDMI que ocupan un gran ancho de banda.

1.4. Objetivo General

Transmitir y recuperar de forma multicanalizada señales de banda ancha HDMI utilizando esquemas híbridos de radiofrecuencia y fibra óptica.

1.5. Objetivos Particulares

- Estudiar los componentes activos y pasivos de los sistemas de comunicaciones ópticas.

- Trasladar las señales de banda ancha al dominio óptico mediante modulación electro-óptica.
- Propagar las señales combinadas previamente en un enlace de fibra óptica de 30 Km.
- Sintonizar las señales de banda ancha recibidas mediante el uso de filtros ópticos.
- Recuperar las señales en un monitor con entrada HDMI.

1.6. Metas

- Lograr dominio teórico y práctico de los principales conceptos referentes a los sistemas fotónicos de microondas.
- Analizar las principales arquitecturas de los sistemas RoF, para lograr dominio teórico del estado del arte de la tecnología.
- Redacción de al menos un artículo de investigación para publicación en revista científica como primer autor.

1.7. Organización de la tesis

Este trabajo está organizado como se plantea a continuación:

En el capítulo 2 se describe el marco teórico de los sistemas RoF así como de los dispositivos optoelectrónicos que forman parte del sistema a desarrollar: fuentes ópticas, el modulador electro-óptico, el aislador óptico, el controlador manual de polarización, el filtro óptico, la fibra óptica y el fotodetector. También se brinda una introducción a la señal HDMI.

El capítulo 3 presenta la simulación con el software VPI Photonics de la multicanalización de señales digitales del tipo PRBS (Pseudo random bit sequence) con una codificación del tipo No Retorno a Cero (NRZ). De igual forma se presenta la demostración experimental de este esquema y el diagrama de ojo de las señales transmitidas y recibidas como medio de comparación de la calidad de la señal recibida.

El capítulo 4 muestra el proceso de generación y recepción de las señales HDMI, así como el análisis de los resultados experimentales de la transmisión multicanalizada de señales HDMI.

El capítulo 5 presenta las conclusiones generales de la tesis de grado, las recomendaciones para trabajos futuros y la contribución.

El capítulo 6 constituye un apéndice de un proyecto alternativo desarrollado durante la maestría, donde se emplean esquemas similares a los del trabajo de tesis: la generación de señales de microondas mediante los métodos de heterodinaje óptico y multiplicación de frecuencia con el uso de un modulador electro-óptico. El apéndice es una copia fiel del artículo publicado por SPIE en marzo de 2019.

Sistemas RoF

2.1. Introducción

La tecnología RoF se ha convertido en un candidato prometedor en futuras comunicaciones inalámbricas de banda ancha como son la 5G y la B5G (*Beyond 5G*). Tiene numerosas aplicaciones entre las que se destacan: redes microcelulares y picocelulares, comunicación satelital, sistemas móviles de banda ancha, servicios de distribución de videos multipunto y redes WLAN [10].

La Figura 2.1 muestra el esquema básico de un sistema RoF a modulación externa. Básicamente está compuesto por una fuente óptica de onda continua, un modulador de intensidad Mach-Zehnder (MZ-IM), una fibra estándar monomodo (SM-SF), un fotodetector (PD) y un receptor.

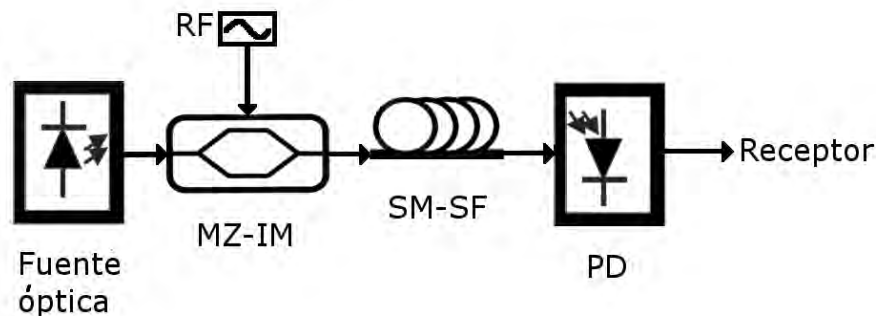


Figura 2.1: Esquema básico de un sistema RoF.

2.2. Tecnología RoF en el espectro electromagnético

El espectro electromagnético está distribuido en frecuencias que dicta la ITU (International Telecommunications Union). De acuerdo a este organismo internacional, el rango de frecuencia de las señales de radiofrecuencia está entre los 3 Hz y los 300 GHz, mientras que las señales de microondas se encuentran en el rango de los 300 MHz y los 30 GHz. Por otra parte para las comunicaciones por fibra óptica, el espectro utilizado es desde 1260 a 1675 nm, equivalente a las frecuencias entre 179 y 239 THz. Es por ello, que las ventanas de comunicaciones ópticas se encuentran entre 1310 y 1550 nm, que equivalen a 229 y 193 THz, respectivamente. La Tabla 2.1 muestra las bandas de radiofrecuencia y sus respectivas frecuencias así como las bandas ópticas y sus respectivas longitudes de onda. El experimento que se presenta tiene su espectro en la bandas de la L a la X de las bandas de radiofrecuencia, y en la banda C de las bandas ópticas.

Tabla 2.1: Espectro electromagnético. [23, 24]

Bandas Radiofrecuencia	Frecuencia	Bandas Ópticas	Longitud de onda
Banda L	1-2 GHz	Banda O	1260-1360 nm
Banda S	2-4 GHz	Banda E	1360-1460 nm
Banda C	4-8 GHz	Banda S	1460-1530 nm
Banda X	8-12 GHz	Banda C	1530-1565 nm
Banda Ku	12-18 GHz	Banda L	1565-1625 nm
Banda K	18-26 GHz	Banda U	1625-1675 nm
Banda Ka	26-40 GHz		
Banda U	40-60 GHz		
Banda V	50-75 GHz		
Banda E	60-90 GHz		
Banda W	75-110 GHz		
Banda F	90-140 GHz		

2.3. Principio de funcionamiento del Sistema RoF

Un esquema más detallado que permite comprender el principio de funcionamiento de un sistema RoF se muestra en la Figura 2.2. Un diodo láser de realimentación distribuida (DFB) con espectro monocromático actúa como fuente óptica que produce ondas de luz a una frecuencia óptica (ω_0) cercana a 200 THz cuando se trabaja en la tercera ventana de comunicación óptica (1550 nm).

La intensidad de la luz puede ser modulada de dos formas: directa y externamente. La modulación directa consiste en inyectar al láser una corriente variante en el tiempo que resulta en que la potencia óptica varía con los cambios en la corriente. Sin embargo, tiene entre sus principales desventajas que puede alcanzar anchos de banda limitados a 30 GHz, que su respuesta intrínsecamente no lineal da lugar a niveles de distorsión observables a larga distancia así como la presencia del factor chirp o modulación residual de frecuencia. Estas desventajas se solucionan con la modulación externa mediante un modulador electro-óptico Mach-Zehnder, que permite alcanzar anchos de banda de hasta 100 GHz [1].

Para modular la luz a través del modulador se utiliza una señal eléctrica de radiofrecuencia con frecuencia ω_m como señal moduladora. A la salida del modulador se tiene un espectro óptico que contiene la frecuencia central ω_0 y múltiples bandas laterales en las frecuencias $\omega_0 \pm n\omega_m$. El número de bandas laterales depende del voltaje de polarización aplicado al modulador. Esto es diferente a la modulación de amplitud eléctrica donde normalmente se producen solo dos bandas laterales. Posteriormente la luz se inyecta a la fibra óptica, donde está sujeta a atenuación, dispersión y ciertos cambios en su polarización [12].

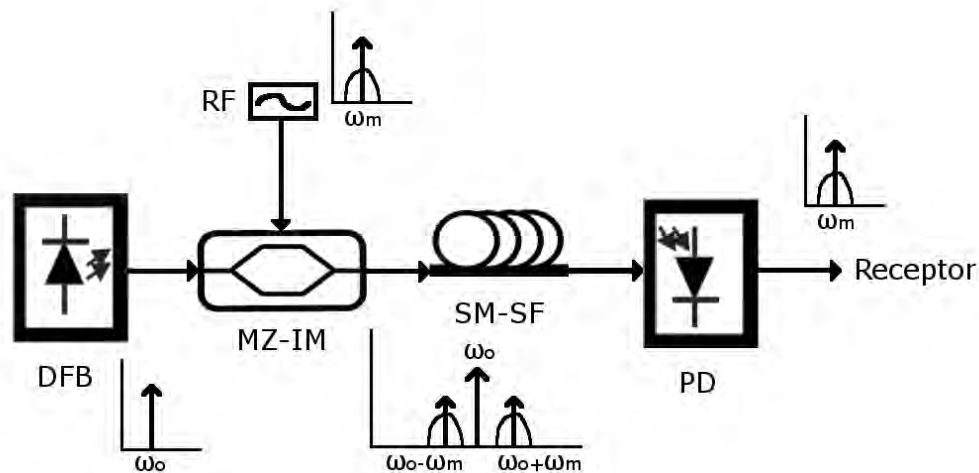


Figura 2.2: Esquema detallado de un sistema RoF.

A la salida de la fibra se utiliza un fotodetector para recuperar la señal de radiofrecuencia original, el cual es un dispositivo que opera en ley cuadrada produciendo una fotocorriente que es proporcional a la intensidad de la luz, y a su vez a la potencia óptica

[25].

Ante la atenuación provocada por cada uno de los componentes del sistema, suele ser necesario un amplificador eléctrico luego de realizarse la fotodetección. Esto permite recuperar la señal con una potencia eléctrica aceptable.

Este sistema mostrado en la Figura 2.2 se comporta a su vez como un filtro fotónico de microondas. Esto quiere decir, que las señales de radiofrecuencia transmitidas estarán limitadas a ciertas frecuencias. La respuesta en frecuencia del sistema para diferentes longitudes de la fibra (20, 25 y 30 km), dispersión de 17 ps/nm km y longitud de onda de 1550 nm se muestra en la Figura 2.3. Como se utiliza una fuente monomodo, la ecuación utilizada para describir el comportamiento de la respuesta en frecuencia es: [26]

$$H(\nu_m) = \cos\left(\frac{\pi\nu_m^2\lambda^2DL}{c}\right) \quad (2.1)$$

donde D es la dispersión de la fibra en ps/nm km, L es la longitud de la fibra en km, c es la velocidad de la luz en nm/s, λ es la longitud de onda del láser en nm y ν_m es la frecuencia eléctrica de la señal de radiofrecuencia.

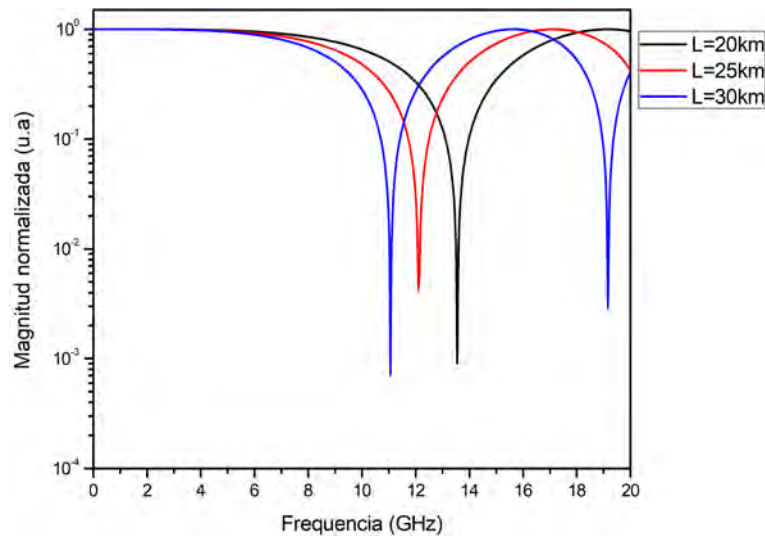


Figura 2.3: Respuesta en frecuencia del sistema comportándose como un filtro fotónico de microondas. $D = 17$ ps/ nm km, $\lambda = 1550$ nm, $L = 20, 25, 30$ km.

En la Figura 2.3 se observa que el rango de frecuencia en el que se puede transmitir señales de información depende fuertemente de la longitud de la fibra óptica. Por ejemplo,

para 30 km de longitud, existe un notch (rechaza banda) en aproximadamente 11 GHz; esto hace que para esta longitud, solamente se puedan transmitir señales en el rango de 0 a 10 GHz aproximadamente. Debido a que las señales que son transmitidas en los experimentos de este trabajo son de gran ancho de banda ocupando aproximadamente 9 GHz, es necesario tener en cuenta esta respuesta en frecuencia.

Las frecuencias de los notches están dadas para los valores donde la Ecuación (2.1) se hace cero que es: [26]

$$f_i = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{(2i - 1)c}{DL}} \quad (2.2)$$

Teniendo en cuenta que el espectro en frecuencia de las señales HDMI para una recuperación satisfactoria es de menos de 10 GHz, y que la fibra óptica que se utiliza es de 30 km, este comportamiento del sistema como filtro fotónico no representa un inconveniente.

2.4. Fuente óptica

La fuente óptica utilizada en las comunicaciones por fibra óptica es el diodo láser. Existen varios tipos de diodos láseres, destacándose el láser DFB, el láser emisor de superficie de cavidad vertical (VCSEL), el láser de cavidad externa (ECDL) y el láser de pozos cuánticos (MQW). Todos ellos deben cumplir los siguientes requerimientos [27]:

- La potencia óptica emitida debe ser lo suficientemente alta, para recorrer grandes distancias en la fibra óptica.
- Deben emitir luz a 850, 1310 o 1550 nm que son las ventanas de comunicaciones ópticas.
- El ancho de línea debe ser pequeño para evitar los efectos de la dispersión cromática.
- La luz debe ser altamente direccional de forma que se acople a la fibra óptica.

De estos láseres el más utilizado es el DFB y por ello se explica con más detalle en la siguiente subsección.

2.4.1. Láser DFB

El láser DFB es un láser monolongitudinal caracterizado por ser espectralmente muy estrecho. Su estructura está formada por dos espejos con recubrimiento antirreflectante,

y en su cavidad, el índice de refracción sufre una variación periódica, lo cual permite que solamente una longitud de onda se propague por la cavidad y sea la emitida por el láser [28]. Ésta longitud de onda recibe el nombre de Longitud de onda de Bragg y se determina mediante la Ecuación (2.3).

$$\lambda_B = \bar{n}\Lambda \quad (2.3)$$

donde \bar{n} es el índice de refracción medio del material y Λ es el período en que varía el índice de refracción.

La Figura 2.4 muestra el espectro óptico de un láser DFB con una longitud de onda central de 1550.5 nm. Como se puede observar no es un láser completamente monocromático pero su ancho de línea espectral (FWHM- Full Width at High Maximum) es menor a 1 nm y debido a esto se considera que sólo emite luz a la longitud de onda central.

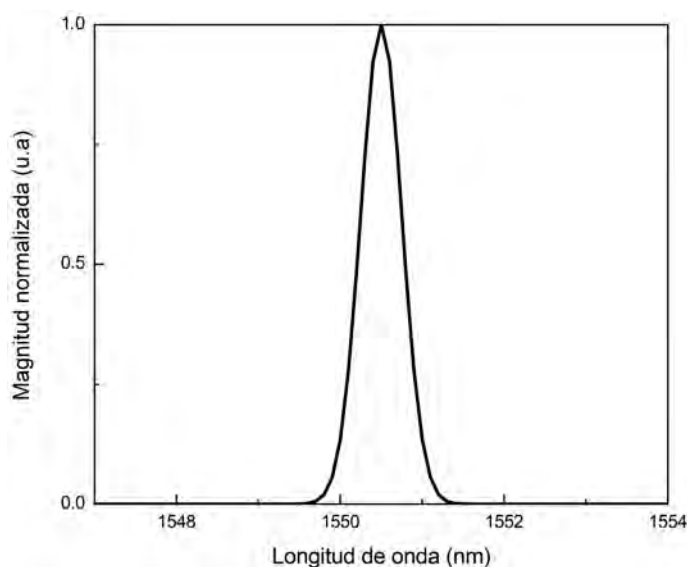


Figura 2.4: Espectro óptico láser DFB.

El láser DFB tiene una relación de supresión modal (MSR) dada por la Ecuación (2.4) que suele ser superior a 30 dB. Este factor indica cuánto es la supresión de los modos laterales del láser respecto al modo principal. El láser DFB puede ser sintonizado en forma continua entre 2 y 3 nm, a través de una variación en la temperatura del mismo.

$$MSR = 10 \log(P_{mp}/P_{ml}) \quad (2.4)$$

2.5. Modulación Electro-óptica

Como se mencionó anteriormente en la sección 2.3, la modulación de intensidad de la luz puede lograrse mediante dos formas: modulación directa y modulación externa. A pesar de requerir un dispositivo externo (modulador), la modulación externa ofrece ventajas sobre la modulación directa del láser y por ello este trabajo se realiza con la incorporación de un modulador electro-óptico para modular la intensidad de la luz. A continuación se describirá detalladamente la modulación externa. El lector puede consultar las referencias [1] y [29] para más detalle en la modulación directa.

2.5.1. Modulación externa

La modulación externa, como su nombre lo indica, requiere de un dispositivo externo para modular ya sea la intensidad o fase de la luz emitida por un diodo láser de forma continua (CW). A pesar del costo añadido, la complejidad y el crecimiento del tamaño del módulo para la conversión E/O, el uso del modulador externo se ve compensado por el gran ancho de banda que es capaz de soportar, por la inexistencia del factor chirp, la alta eficiencia de modulación y por su buena linealidad [30].

Los moduladores externos son alimentados por voltaje. Tienen una entrada óptica conectada al láser CW y una entrada eléctrica donde se conecta la señal de radiofrecuencia. Debido a que su efecto básico es variar la intensidad de la entrada óptica del láser CW, es deseable poder manejar una alta potencia óptica.

Entre los moduladores electro-ópticos, el más utilizado desde un punto de vista comercial es el Mach-Zehnder con una estructura implementada en un cristal electro-óptico, típicamente Niobato de Litio ($LiNbO_3$).

La Figura 2.5 muestra la estructura básica de un modulador Mach-Zehnder de Niobato de Litio. El principio básico es que un voltaje aplicado es usado para variar el cambio de fase entre los dos brazos de la guía de onda óptica de forma tal que al combinarse la luz de los dos brazos a la salida, ésta puede variar entre un nivel mínimo correspondiente a la interferencia destructiva y un nivel máximo correspondiente a la interferencia constructiva [29]. El diseño más simple es aquel en el cual la modulación de fase se aplica a sólo uno

de los brazos del modulador, aunque también es posible el diseño de electrodos duales, los cuales pueden utilizarse para la generación óptica de banda lateral única (OSSB), en virtud de mejorar la penalidad de potencia en sistemas híbridos de radiofrecuencia y fibra óptica.

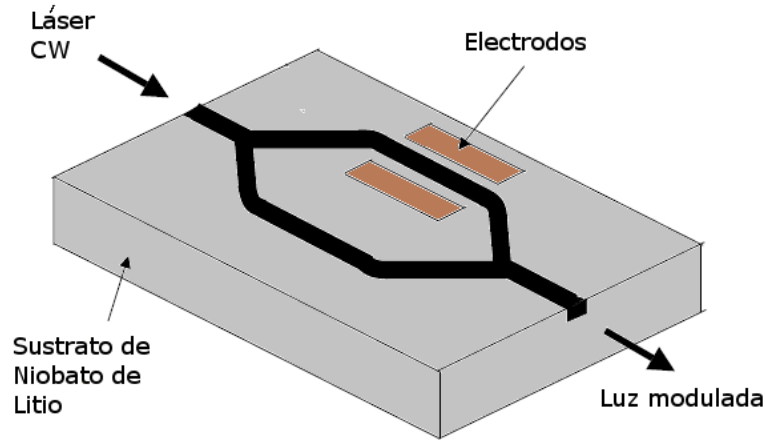


Figura 2.5: Diagrama del modulador Mach-Zehnder.

Asumiendo acopladores 50:50 para la entrada y la salida del modulador Mach-Zehnder, la potencia a la salida del modulador depende de la diferencia del cambio de fase $\Delta\phi = \phi_t - \phi_0$ que tiene la luz al propagarse por los brazos superiores e inferiores de la estructura de acuerdo con [29]:

$$P_{sal} = P_{ent} \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \quad (2.5)$$

El cambio de fase inducido en el brazo superior del modulador depende de su índice de refracción que a su vez depende del campo eléctrico externo aplicado. Si un voltaje $V(t)$ dependiente del tiempo, se aplica a la guía de onda superior del modulador, su índice de refracción dependerá del tiempo y como consecuencia la transmisión del Mach-Zehnder también cambiará con el tiempo. Cuando la onda continua óptica es aplicada a la entrada del modulador, la potencia de salida será modulada de acuerdo a los datos eléctricos $V(t)$. El valor del cambio de fase creado al aplicar un voltaje externo depende de ciertos parámetros tales como: el material electro-óptico, la orientación del cristal respecto al campo eléctrico externo, así como la polarización de la luz incidente y la geometría de la

guía de onda.

El cambio de fase inducido $\phi(t)$ puede ser determinado a partir del voltaje aplicado $V(t)$ como sigue [30]:

$$\phi(t) = \pi \frac{V(t)}{V_\pi} \quad (2.6)$$

donde V_π es el voltaje de media onda, de modo que aplicándole al modulador un voltaje de V_π , resultará en un cambio de fase de π .

A partir de las Ecuaciones (2.5) y (2.6) es posible determinar la función de transferencia P_{sal}/P_{ent} del modulador como función del voltaje aplicado, tal como se muestra en la Figura 2.6, donde el voltaje aplicado ha sido normalizado al voltaje de media onda. Un punto óptimo de polarización se localiza en $\frac{3}{2} \frac{V(t)}{V_\pi}$ de modo que si se aplica una señal moduladora, existe un efecto cuasi-lineal en la curva característica, con una mayor eficiencia de modulación.

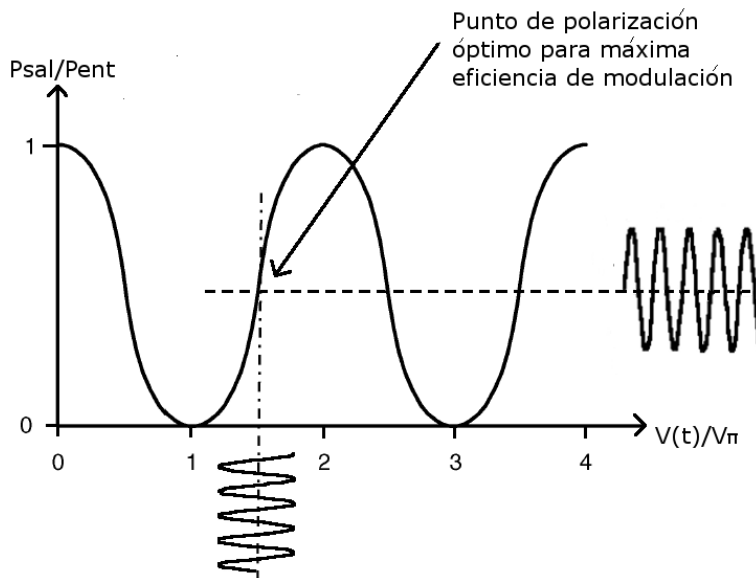


Figura 2.6: Función de transferencia del Modulador Mach-Zehnder. Reproducido de [1].

2.6. Aislador óptico

El aislador óptico es un componente óptico que permite la transmisión de la luz en una única dirección. Normalmente se utiliza para evitar la realimentación no deseada a los osciladores ópticos como es el caso de una cavidad láser.

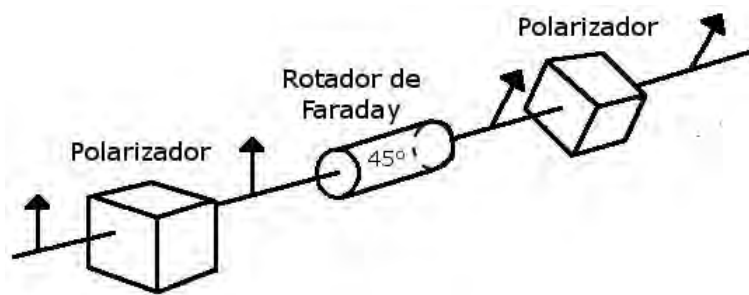


Figura 2.7: Funcionamiento del aislador óptico.

Este dispositivo consiste de 3 componentes principales, que son: un polarizador de entrada, un rotador de Faraday y un polarizador de salida. Como se muestra en la Figura 2.7, la luz que viaja de izquierda a derecha pasa a través del polarizador de entrada polarizándose en el plano vertical. A continuación pasa a través del rotador de Faraday y el plano de polarización es rotado 45 grados. Por último el polarizador de salida, que está alineado a 45 grados del polarizador de entrada, permitirá pasar la luz sin impedimentos. En cambio, la luz viajando en dirección contraria pasará por el polarizador de salida, luego atravesará el rotador de Faraday y experimentará una rotación no recíproca adicional de 45 grados. La luz estará polarizada en el plano horizontal y será rechazada por el polarizador de entrada que solo permite pasar luz polarizada en el plano vertical [31].

2.7. Controlador manual de polarización

El controlador manual de polarización es un dispositivo óptico que permite cambiar el estado de la polarización de la luz [32]. La mayoría tiene tres paletas, que inducen esfuerzos en la fibra torciéndola en forma de bucle sobre el plano de tres paletas que están diseñadas para admitir estos bucles con ciertos diámetros. Cada paleta también puede cambiar su ángulo de inclinación con respecto al plano horizontal, de tal forma que cambia en eje rápido de la fibra en cada segmento sujeto a su respectiva paleta.

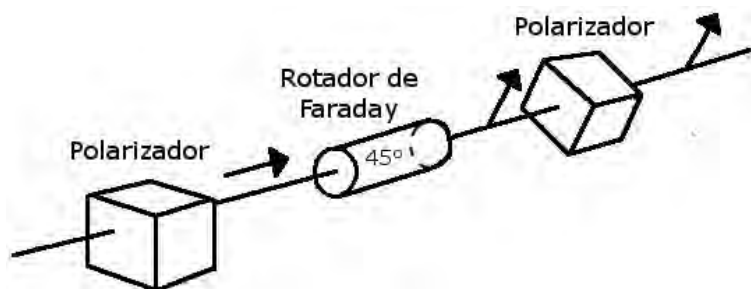


Figura 2.8: Funcionamiento del aislador óptico. Dirección contraria.

La configuración habitual usada en un controlador de polarización de 3 paletas es una serie de retardadores $\lambda/4$, $\lambda/2$, $\lambda/4$, que permite completo control de los estados de polarización. De igual forma, existen mecanismos con dos paletas y una serie de retardadores $\lambda/4$, $\lambda/4$. Sin embargo el controlador de 3 paletas es ampliamente utilizado debido a que en determinada posición de las paletas, el controlador no realiza ningún cambio en el sistema de polarización entrante [33].

2.8. Acoplador óptico

Un acoplador óptico es un dispositivo óptico que conecta uno o más extremos de fibra óptica para transmitir la luz en múltiples caminos. El dispositivo puede combinar dos o más entradas en una única salida así como dividir una señal de entrada en dos salidas [34]. En este último caso, la señal se ve atenuada a la salida del acoplador debido a que una señal de entrada se divide entre múltiples puertos de salida. No es posible combinar dos o más entradas de la misma frecuencia óptica en una única señal sin tener grandes pérdidas de exceso. Sin embargo, esta restricción no existe para señales de entrada de diferente longitud de onda que pueden ser combinadas sin pérdidas considerables.

Los acopladores ópticos son utilizados por su alta estabilidad, doble ventana operativa y bajas pérdidas dependientes de la polarización de la luz. También tienen alta directividad y pocas pérdidas por inserción [35].

Los acopladores más usados son del tipo 50:50 y del tipo 90:10. Ambos tienen dos entradas y dos salidas. El acoplador 50:50 combina ambas señales de entrada y en cada puerto de salida se obtienen las dos señales de entrada combinadas a la mitad de la potencia óptica. Por otra parte el acoplador 90:10 es utilizado para obtener en una de las

salidas, el 90 % de la potencia óptica de las señales combinadas.

2.9. Fotodetector

Un fotodetector es un dispositivo optoelectrónico que tiene una unión p-n que convierte fotones de luz en corriente [36]. Los fotodetectores más utilizados en el campo de la fotónica de microondas son los fotodiodos de semiconductor, los cuales son fabricados de Silicio (Si), Germanio (Ge), Arseniuro de Galio (GaAs) o Arseniuro de Galio Indio (InGaAs).

El fotodetector está inversamente polarizado, por lo cual cuando no le llega luz, la polarización inversa hace que los electrones y huecos se alejen de la unión p-n, dando lugar a una región empobrecida que impide que la corriente pase a través del diodo [37]. Cuando hay luz llegando al fotodetector, los fotones con la longitud de onda apropiada crean pares electrones-huecos en esta región cuando un electrón pasa de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando un hueco. El voltaje de polarización hace que estos portadores de corriente se desvíen rápidamente por lo que fluye una corriente proporcional a la luz incidente.

El fotodiodo es un dispositivo que utiliza el proceso de cuadratura para generar la fotocorriente que es proporcional al cuadrado de la magnitud del campo eléctrico. Esta cantidad es a su vez proporcional a la intensidad de la luz (W/m^2), y por lo tanto a la potencia óptica de entrada del fotodiodo.

El fotodetector debe cumplir los requerimientos de gran ancho de banda y alta eficiencia de conversión que exige un sistema de comunicaciones ópticas. En el fotodetector esta eficiencia de conversión está dada por la responsividad (A/W) y se define como [1]:

$$R = \frac{I_p}{P_{ent}} = \eta \frac{q\lambda}{hc} \quad (2.7)$$

donde I_p es la fotocorriente generada en respuesta en la potencia óptica de entrada P_{ent} , η es la eficiencia cuántica del fotodetector y está limitada a la unidad con valores en el rango 0.65-0.90, q es la carga del electrón, λ es la longitud de onda de operación, c es la velocidad de la luz y h es la constante de Planck. La curva de fotocorriente contra potencia óptica se muestra en la Figura 2.9. La pendiente está dada por la responsividad del fotodetector [1].

El fotodiodo más común es del tipo PIN el cual tiene una región de semiconductor intrínseca muy levemente dopada entre las regiones dopadas p y n, de ahí el nombre PIN

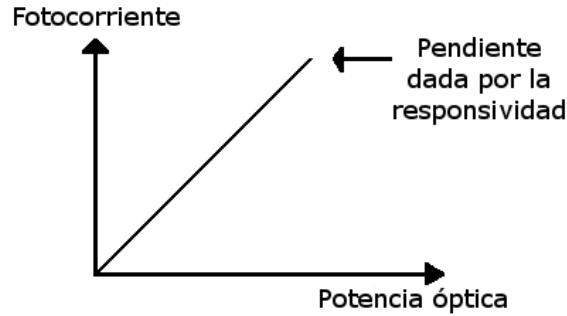


Figura 2.9: Característica de transferencia del fotodiodo.

[38]. El máximo producto ancho de banda-eficiencia cuántica para un fotodiodo PIN es de 30 GHz, mientras que su responsividad está en el rango 0.65-0.80 A/W.

2.10. Fibras ópticas

La fibra óptica es una guía de onda dieléctrica con una sección circular donde un núcleo de índice de refracción n_1 es rodeado por un revestimiento con índice de refracción n_2 , tal que $n_1 > n_2$ [25]. Por encima del revestimiento generalmente tiene una cubierta de plástico para su protección. La Figura 2.10 muestra la estructura básica de la fibra óptica.

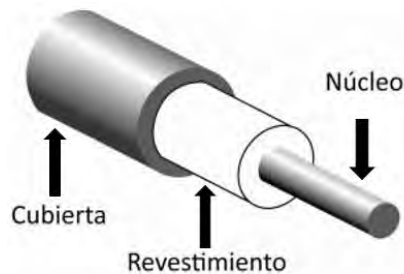


Figura 2.10: Estructura de la fibra óptica.

En la fibra óptica un parámetro importante es la apertura numérica (N.A) ya que es

la cantidad de luz que puede inyectarse por acoplamiento, y se calcula

$$N.A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.8)$$

Este parámetro a su vez, permite calcular el parámetro V , que es la frecuencia normalizada. Su expresión viene dada en la Ecuación (2.9) y permite definir el tipo de fibra óptica. Existen dos tipos de fibras, la fibra óptica monomodo y la fibra óptica multimodo. La primera tiene un diámetro del núcleo de entre 8 y 10 μm y solamente se propaga en modo transversal, mientras la segunda tiene un diámetro del núcleo de entre 50 y 62.5 μm por lo cual múltiples modos pueden propagarse a través de ella. Si $V < 2.405$ la fibra óptica es monomodo, mientras que $V > 2.405$ indica una fibra multimodo.

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} N.A \quad (2.9)$$

donde a es el radio de la fibra y λ es la longitud de onda de operación.

La fibra óptica monomodo, por ser la más utilizada en investigaciones, y la que trabajamos de forma experimental, será analizada en más detalle más adelante en esta sección.

2.10.1. Atenuación de fibras ópticas

El rendimiento de la fibra óptica se ve afectado por la atenuación, la cual reduce la potencia que llega al fotodetector. Debido a que el fotodetector necesita de cierto nivel de potencia óptica para recuperar la señal adecuadamente, las comunicaciones por fibra óptica se ven limitadas a una distancia determinada por las pérdidas en la fibra.

De esta forma una señal con una potencia de entrada P_{ent} y coeficiente de atenuación α y para una longitud de fibra L tendrá una potencia de salida P_{sal} dada por [39]:

$$P_{sal} = P_{ent} \exp(-\alpha L) \quad (2.10)$$

de donde α dado en dB/km se determina:

$$\alpha = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{sal}}{P_{ent}} \right) \quad (2.11)$$

La Figura 2.11 muestra el gráfico de atenuación contra longitud de onda para una fibra

óptica monomodo. En ella se observan los diferentes factores que contribuyen a la curva de atenuación total como son: la dispersión de Rayleigh, imperfecciones en la guía de onda, así como las absorciones ultravioleta e infrarroja. También debe destacarse que la curva de atenuación total tiene su mínimo valor en $1.55 \mu\text{m}$ correspondiente a la tercera ventana de comunicación y la más utilizada tanto en investigación como comercialmente.

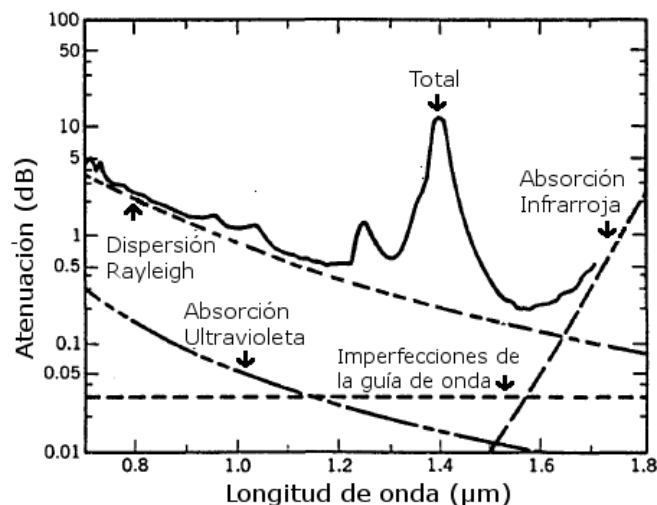


Figura 2.11: Factores de atenuación y su dependencia con la longitud de onda. Reproducido de [23].

2.10.2. Dispersión en fibras ópticas

La dispersión es la primera causa de limitación en el ancho de banda de la transmisión de señales ópticas a través de fibras ópticas. La dispersión en términos generales consiste en que las diferentes componentes en frecuencia viajan a diferentes velocidades, por lo cual los diversos modos que viajan en la fibra llegan en diferentes tiempos al final de la misma. Los pulsos luminosos que se propagan, experimentan un ensanchamiento temporal dando como consecuencia que la señal se degrade. La Figura 2.12 presenta el ensanchamiento de los pulsos que hace que al transmitir unos y ceros lógicos, pueden ocurrir errores en los símbolos en el receptor, lo que trae consigo una limitación en la capacidad y la máxima distancia disponible para transmitir a través de la fibra óptica. La dispersión intramodal representa el efecto combinado de la dispersión del material y la dispersión de la guía de onda, que a su vez, ambas son ejemplo de dispersión cromática ya que son

dependientes de la frecuencia de operación. Por otra parte la dispersión modal es un tipo de dispersión intermodal, causada por la variación de la constante de propagación entre diferentes modos, por lo cual aparece solamente cuando más de un modo es excitado a una fibra óptica multimodo.

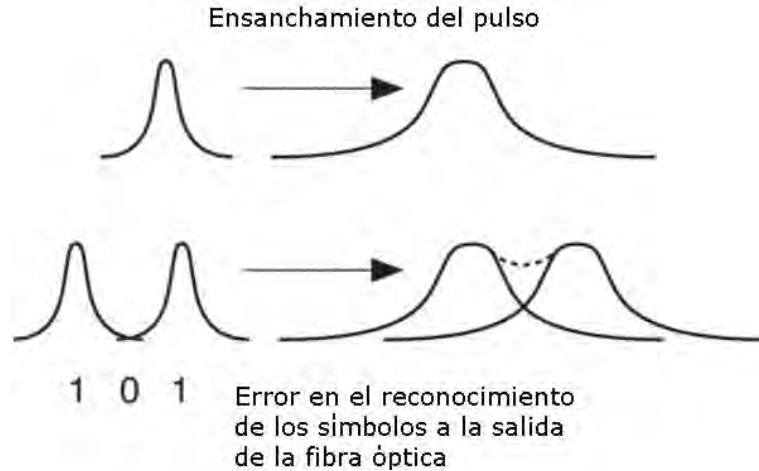


Figura 2.12: Efecto de dispersión.

La dispersión del material ocurre debido a que el índice de refracción del Óxido de Silicio (SiO_2) depende de la frecuencia óptica ω y por lo tanto de la longitud de onda λ , según la Ecuación de Sellmeier [25]:

$$n^2 = 1 + \frac{0.69617\lambda^2}{\lambda^2 - 0.068404^2} + \frac{0.40794\lambda^2}{\lambda^2 - 0.11624^2} + \frac{0.89748\lambda^2}{\lambda^2 - 9.89616^2} \quad (2.12)$$

Una componente espectral específica pasa a través de la fibra en un tiempo $T = L/v_g$, donde L es la longitud de la fibra y v_g es la velocidad de grupo dada por:

$$v_g = \left(\frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad (2.13)$$

El índice de grupo N es dependiente del índice de refracción y la longitud de onda de la siguiente forma:

$$N = n + \omega \frac{dn}{d\omega} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (2.14)$$

Si $\Delta\omega$ es el ancho de línea espectral del pulso, y considerando β la constante de

propagación de la fibra, la duración del pulso en la fibra estará dado por:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad (2.15)$$

donde $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ es el parámetro de la dispersión de la velocidad de grupo.

El ancho espectral en frecuencia es determinado por el rango de longitudes de onda emitidos por la fuente óptica. Utilizando $\omega = 2\pi c/\lambda$, y $\Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2)$, la Ecuación (2.13) se puede reescribir:

$$\Delta T = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{v_g} \right) = DL\Delta\lambda \quad (2.16)$$

donde

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (2.17)$$

D es el parámetro de dispersión que se define como la extensión del pulso como función de la longitud de onda y está expresado en ps/nm km.

La Figura 2.13 presenta la curva de dependencia del parámetro de dispersión con respecto a la longitud de onda. Se debe destacar que en $1.3 \mu\text{m}$ la dispersión tiene valor de cero, mientras que en $1.55 \mu\text{m}$ tiene aproximadamente 16 ps/nm km.

2.10.3. Fibra óptica monomodo

El componente por excelencia en la literatura referente a los sistemas fotónicos de microondas es la fibra óptica monomodo. Esto se debe a su capacidad de alcanzar distancias de decenas de kilómetros con un gran ancho de banda de hasta 100 GHz [40] y una atenuación de aproximadamente 0.2 dB/km para 1550 nm. La mayoría de los componentes ópticos reportados en investigaciones en comunicaciones ópticas (Rejillas de Bragg, circuladores, acopladores, amplificadores ópticos y multiplexores WDM), trabajan en esta longitud de onda debido al mejor rendimiento del sistema [12].

La fibra óptica monomodo está diseñada para transportar la luz solamente en el modo transversal. De esta forma, es posible transmitir señales a diferentes frecuencias pero en el mismo modo de propagación, lo cual significa que están distribuidas en el espacio de la misma forma. Se llama modo transversal debido a que sus oscilaciones electromagnéticas ocurren perpendicularmente al largo de la fibra. Con un diámetro del núcleo de entre 8 y

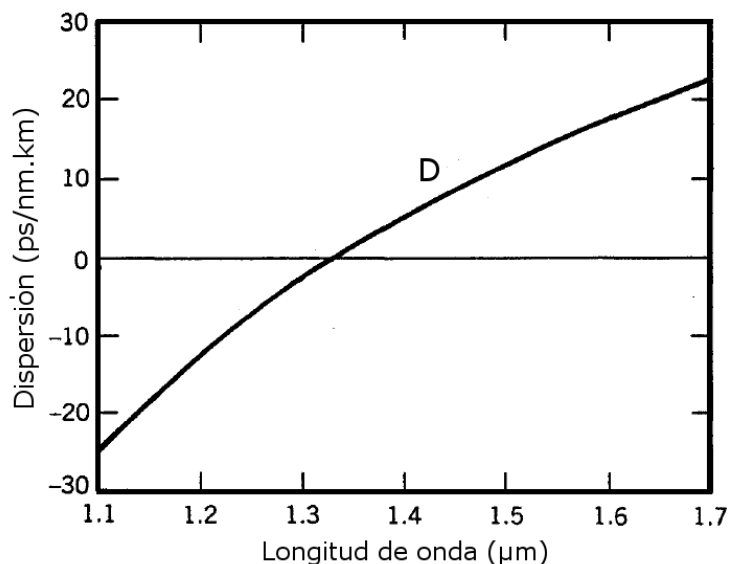


Figura 2.13: Curva de dispersión cromática. Reproducido de [39].

10 μm , al propagarse sólo en modo transversal, esto le permite a la luz tener una menor atenuación y alcanzar mayores distancias.

2.11. Filtros Ópticos

Un filtro óptico es un dispositivo que se utiliza para transmitir, de forma selectiva, luz de diferentes longitudes de onda. Las propiedades ópticas de los filtros están completamente definidas por su respuesta de frecuencia, que especifica cómo la magnitud y la fase de cada componente de frecuencia de la señal de entrada es modificada por el filtro [41].

Los filtros ópticos comerciales más utilizados son fabricados para longitudes de onda cercanas a 1550 nm, y se sintonizan tanto de forma manual como automática. En el caso del ajuste manual, se utiliza un micrómetro de alta precisión mientras que el ajuste automático se realiza a través de un motor de alta precisión controlado electrónicamente. La longitud de onda central varía en un rango que va de 10 a 400 nm. Los filtros con un mayor rango de valores se pueden sintonizar tanto en la ventana de comunicación de 1310 nm como en la de 1550 nm. Los filtros ópticos por lo general son muy estrechos con bandas de paso con valores de entre 1 y 5 nm.

Los filtros ópticos más utilizados son de dos tipos: Fabry-Perot o de película delgada,

y de rejilla de Bragg. Un filtro Fabry-Perot consiste de dos espejos planos y paralelos altamente reflectivos que están separados una distancia (Figura 2.14). El espacio entre las superficies de los espejos es básicamente una cavidad resonante. La luz incidente sufre múltiples reflexiones entre las superficies que define la cavidad. Cuando el ancho de la cavidad es igual a un múltiplo impar de la longitud de onda central de la luz incidente, los haces de luz reflejados interfieren de forma constructiva y ocurre la transmisión óptica máxima de la señal a esta longitud de onda. Para otras longitudes de onda, los haces de luz reflejados interfieren de forma destructiva y no existe transmisión. Por lo tanto este dispositivo se comporta como un filtro pasabanda que transmite ciertas longitudes de onda [42].

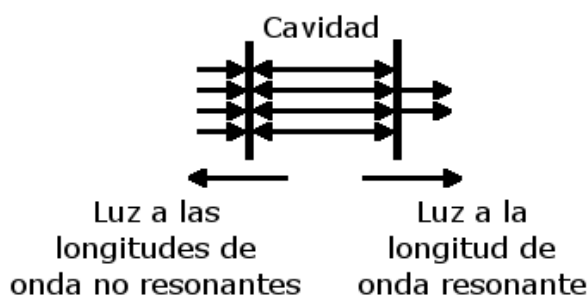


Figura 2.14: Filtro Fabry-Perot.

En cambio, los filtros de rejilla de Bragg utilizan una fibra óptica con un núcleo que tiene una variación sinusoidal del índice de refracción. Esta variación afecta la fase de la luz que pasa a través de la rejilla de forma tal que algunas longitudes de onda pasan a través de la rejilla con interferencia constructiva y otros con interferencia destructiva. En la rejilla la variación de este índice refractivo es continuo. La rejilla de Bragg es más eficiente como filtro cuando refleja una única longitud de onda y transmite el resto de las longitudes de onda. Es por esto que los filtros de rejilla de Bragg tienen su principal aplicación en la multiplexación y demultiplexación de señales en sistemas donde se utiliza multiplexación por división de la longitud de onda (WDM) [43].

En nuestros experimentos se utiliza un filtro óptico pasabanda de película delgada y capa dura, que se monta entre dos colimadores de fibra angular [44]. Este filtro es de sintonización manual entre las longitudes de 1535 y 1565 nm con un ancho de banda a 3 dB de aproximadamente 2 nm.

2.12. Tecnología HDMI

La tecnología HDMI (High Definition Multimedia Interface) fue introducida públicamente en 2003 como un cable que representaba una solución para permitir a los dispositivos compartir video de alta definición descomprimido con audio multicanal. Esta tecnología ha crecido hasta convertirse en la actualidad en la principal conectividad de audio y video en las casas [45]. Más de cuatro mil millones de productos con tecnología HDMI se habían desplegado en el mundo para finales del año 2016, más de la mitad de los cuales fueron construidos desde el 2012.

La especificación HDMI versión 1.0 salió al mercado en diciembre de 2002 con muchas actualizaciones realizadas desde entonces. En mayo del 2016 la versión 2.0b sale incorporando entre otras características, el formato 4K para transmisión con rango dinámico alto (HDR-High Dynamic Range), por lo cual tiene 100 % de penetración en 4KTVs/HDTVs.

El éxito de la tecnología HDMI como medio de entretenimiento en casa, ha hecho que mercados relacionados hayan incorporado entrada y salida HDMI en sus dispositivos, entre ellos se puede destacar los principales fabricantes de computadoras, tablets y cajas decodificadoras (STB-Set Top Box). El sistema de conexión automotor HDMI fue sacado al mercado en la versión 1.4 en 2009, y es actualmente utilizado en muchos modelos de marcas entre las que destacan Honda y Dodge.

2.12.1. Señal HDMI

Una de las más comunes imprecisiones es pensar que la señal digital es de forma innata superior a la señal analógica. Al no existir la necesidad de la conversión analógica a digital, se piensa que la señal está en un estado puro cuando llega a la televisión de alta definición. Sin embargo la señal de televisión de alta definición sí requiere una codificación.

La señal HDMI presenta código no retorno a cero (NRZ) por lo cual, su densidad espectral de potencia tiene como representación una sinc (seno cardinal) cuadrada que es el espectro de todas las señales digitales NRZ, como se ilustra en la Figura 2.15. En ella se observa una señal a 6 Gb/s. Está formada por 3 lóbulos de 6 GHz, lo que se traduce en un ancho de banda requerido para realizar la medición de al menos 18 GHz [46].

La señal HDMI utiliza la tecnología Señal Diferencial de Transición Minimizada (TMDS-Transition Minimized Differential Signaling) para la transmisión de datos en serie a alta velocidad. Mediante esta tecnología se codifica la señal para protegerla mientras viaja a lo largo del cable. El proceso para transmitir la señal se explica a continuación: [47]

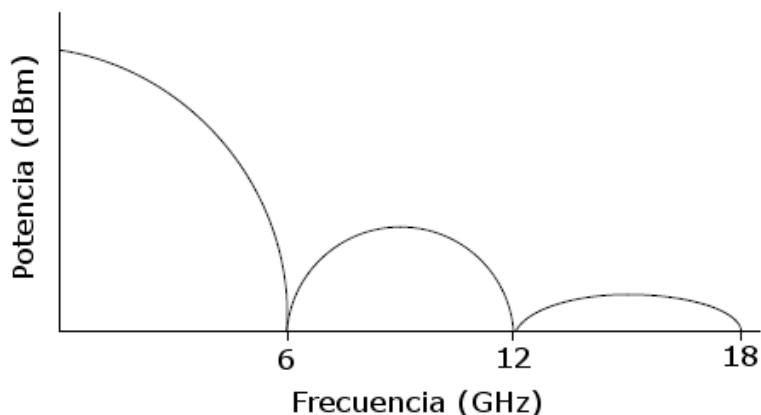


Figura 2.15: Espectro de una señal HDMI de 6 Gb/s. Reproducido de [46]

- El dispositivo con salida HDMI (PC, STB, reproductor de DVD, etc.) codifica la señal para reducir el número de transiciones a uno (encendido) y cero (apagado). Esto protege la calidad de la señal al reducir el número de oportunidades en las que la señal se degrada.
- Uno de los cables en el par trenzado transporta la información mientras el otro transporta una copia inversa de la señal.
- El dispositivo que recibe la señal (HDTV) decodifica la señal, mide la diferencia entre la señal y la inversa, utilizando esta información para compensar cualquier pérdida de la señal.

2.13. Conclusiones

En este capítulo se presentó una introducción a las comunicaciones ópticas y dentro de este campo a la fotónica de microondas, un campo interdisciplinario que estudia la interacción entre ondas de microondas y ópticas en dispositivos optoelectrónicos para la generación, distribución, control y propagación de señales de microondas utilizando esquemas híbridos de radiofrecuencia y fibra óptica.

Se analizaron los esquemas de los sistemas RoF detallando su principio de funcionamiento. Se describieron los principales dispositivos optoelectrónicos utilizados

en un sistema RoF. Se brindó una introducción a la tecnología y la señal HDMI, analizándose sus principales características y aplicaciones.

El dominio teórico de los principios de funcionamientos de estos dispositivos, así como de las ecuaciones y gráficas expuestas, permite comprender el funcionamiento práctico de los esquemas experimentales propuestos en los siguientes capítulos.

Transmisión multicanalizada de señales PRBS: Simulación y Resultados Experimentales

3.1. Introducción

La transmisión multicanalizada de señales digitales a través de una fibra óptica monomodo constituye un método de transmisión en el que múltiples señales digitales son enviadas a diferentes longitudes de onda pero en el mismo modo de propagación, el modo transversal, ya que sus oscilaciones electromagnéticas ocurren perpendiculares (transversales) a la longitud de la fibra [48]. Es necesario que estas señales digitales que son transmitidas, se modulen a diferentes longitudes de onda ya que de lo contrario se traslaparían y sería imposible recuperarlas en el fotodetector. Debido al amplio espectro de las comunicaciones ópticas las señales pueden estar separadas en frecuencia en centenas de GHz cuando pasa a través de la fibra. La señales pueden ser recuperadas utilizando filtros ópticos o una combinación de mezcladores y filtros eléctricos.

3.2. Señal PRBS con codificación NRZ

Una señal PRBS (*Pseudo Random Bit Sequence*) es una secuencia de bits que son generados con un algoritmo determinístico y tiene un comportamiento estadístico muy similar a una secuencia completamente al azar. Esta señal es muy utilizada en telecomunicaciones, en técnicas de encriptamiento, simulación y correlación [49].

Cuando la señal PRBS tiene una codificación NRZ, cada bit de datos al azar tiene una probabilidad del 50 % de ser uno o cero. Cada bit tiene una duración T_b que es el tiempo de bit.

La señal PRBS es típicamente denotada como $2^x - 1$ PRBS, donde x es la longitud del registro de desplazamiento para crear el patrón. Señales PRBS con una longitud $2^7 - 1$ son utilizadas en Ethernet y canales de fibra óptica.

3.2.1. Espectro de potencia de las señales codificadas NRZ

Las señales codificadas NRZ son señales en el dominio del tiempo. De igual forma cada patrón NRZ tiene su densidad espectral de potencia que puede ser calculada mediante dos formas: el cuadrado de la magnitud de la Transformada de Fourier ($T.F$) del patrón, o la $T.F$ de la función de autocorrelación del patrón [50]. Este último es utilizado para patrones más complejos como los binarios con codificación NRZ.

La Figura 3.1 presenta una muestra de un flujo de datos PRBS con codificación NRZ. Se muestra un patrón de 6 bits con 3 bits en '1' y 3 bits en '0' con un tiempo de bit T_b . El espectro de este tipo de señales se calcula mediante la $T.F$ de la función de autocorrelación del patrón. En el caso de la señal con codificación NRZ y considerando que el patrón mostrado en la Figura 3.1 se repite de forma periódica, la función de autocorrelación se aproxima a un triángulo centrado en $t = 0$ y con un ancho de $2T_b$ y altura T_b , tal como se puede observar en la Figura 3.2.

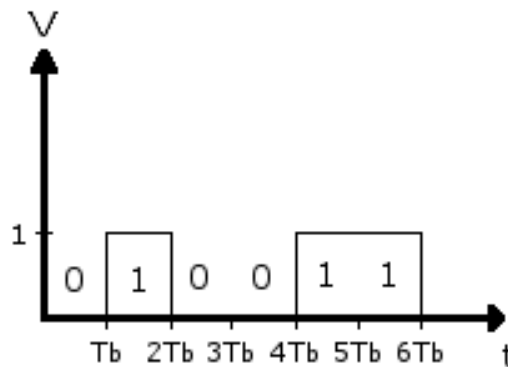


Figura 3.1: Patrón de una señal PRBS con codificación NRZ.

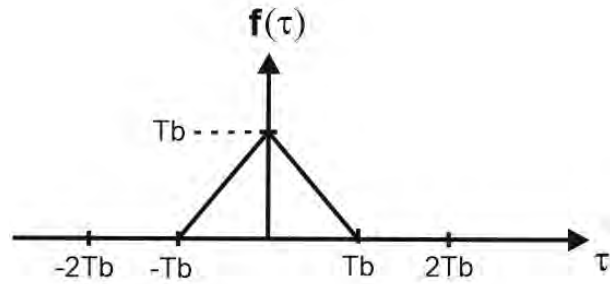


Figura 3.2: Función de autocorrelación.

Con el objetivo de obtener la densidad espectral de potencia de una señal con codificación NRZ, se halla la $T.F$ de la función de autocorrelación del patrón. Para esto se utiliza la propiedad de la transformada de la integral y la propiedad de desplazamiento en el tiempo. De esta forma se define la transformada de Fourier de la derivada de esta función triangular, para a continuación aplicar la transformada de la integral. La derivada de esta función triangular son dos pulsos rectangulares con ancho T_b , alturas T_b y $-T_b$, y centrados en $T_b/2$ y $-T_b/2$, respectivamente, tal como se observa en la Figura 3.3. Por lo tanto se considera

$$X(\omega) = X_1(\omega) + X_2(\omega) \quad (3.1)$$

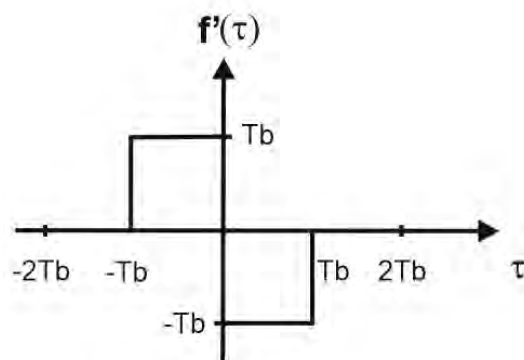


Figura 3.3: Derivada de la función de autocorrelación.

como la suma de las $T.F$ de los dos pulsos rectangulares. Luego, aplicando la $T.F$ del

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS:
SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

pulso rectangular, y la propiedad de desplazamiento en el tiempo se tiene:

$$X(\omega) = T_b \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega T_b}{2}\right) \exp\left(\frac{j\omega T_b}{2}\right) - T_b \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega T_b}{2}\right) \exp\left(\frac{-j\omega T_b}{2}\right) \quad (3.2)$$

Aplicando propiedades matemáticas la Ecuación (3.2) se puede reducir a

$$X(\omega) = T_b \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega T_b}{2}\right) \left(\exp\left(\frac{j\omega T_b}{2}\right) - \exp\left(\frac{-j\omega T_b}{2}\right) \right) \quad (3.3)$$

$$X(\omega) = 2jT_b \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega T_b}{2}\right) \sin\left(\frac{\omega T_b}{2}\right) \quad (3.4)$$

Y considerando que $\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$ se obtiene

$$X(\omega) = \omega j T_b^2 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\omega T_b}{2}\right) \quad (3.5)$$

Finalmente aplicando la propiedad de la transformada de la integral se obtiene la $T.F$ de la función de autocorrelación, que resulta:

$$F(\omega) = T_b^2 \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\omega T_b}{2}\right) \quad (3.6)$$

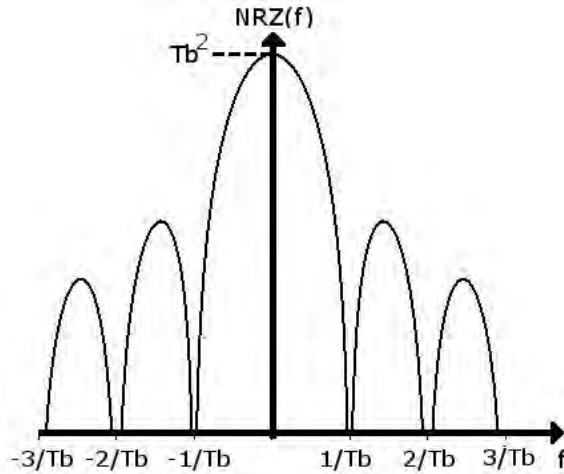


Figura 3.4: Espectro de la señal PRBS con codificación NRZ.

Como se mencionó anteriormente en esta sección, la densidad espectral de potencia de una señal corresponde a la $T.F$ de su función de autocorrelación. Por lo tanto, la

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS: SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

densidad espectral de potencia de la señal con codificación NRZ está dada por una sinc con mínimos en múltiplos de $1/T_b$ tal como se observa en la Figura 3.4 , o lo que es lo mismo, en múltiplos de la frecuencia de la señal digital.

3.3. Simulación

Con el objetivo de validar los resultados experimentales se realizó una simulación de un esquema similar a los esquemas experimentales desarrollados en este trabajo. El software utilizado fue VPI Photonics, que provee simulación profesional en fotónica integrada activa/pasiva, en aplicaciones de fibra óptica y sistemas de aplicaciones de redes ópticas [51].

La Figura 3.5 muestra el diseño del sistema en el VPI Photonics. Se trata de un sistema RoF para transmitir de forma multicanalizada dos señales digitales. Se emplean dos láseres de onda continua de tipo DFB operando a longitudes de onda de 1554 nm (equivalente a 193 THz) y de 1552 nm (equivalente a 193.2 THz). Los láseres DFB se conectan a aisladores ópticos (AO) con el fin de evitar realimentación de luz al láser. La salida de cada aislador se conecta a un controlador de polarización (CP) y su salida a los respectivos moduladores electro-ópticos MZ-IM. A estos moduladores se les conectan las señales moduladoras en su entrada RF, que en cada caso son señales digitales de tipo PRBS con codificación NRZ a 3 GHz como se observa en la Figura 3.6 en el dominio de la frecuencia. Este resultado valida los resultados teóricos planteados en la Ecuación (3.6) y en la Figura 3.4.

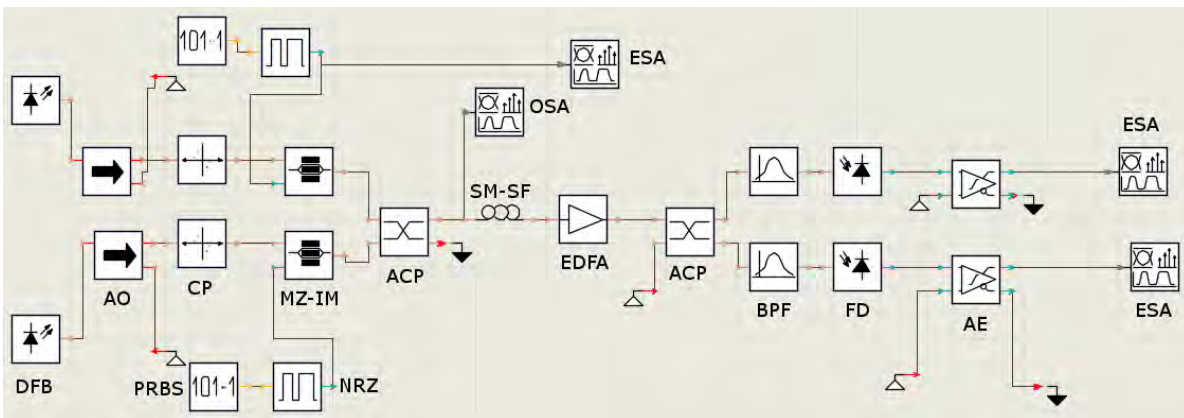


Figura 3.5: Esquema simulado en el VPI Photonics.

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS: SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

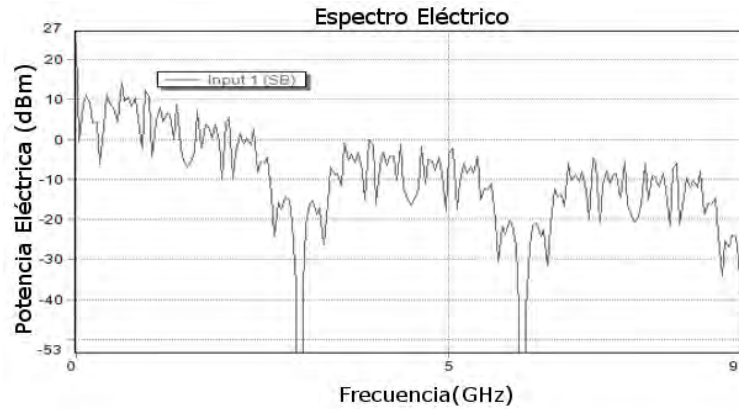


Figura 3.6: Señal digital transmitida.

La salida de cada modulador contiene señales moduladas en intensidad con la información digital impresa en el espectro óptico de cada láser. Ambas señales se combinan mediante un acoplador óptico (ACP) y la señal de salida se inyecta a la fibra óptica estándar monomodo (SM-SF). La Figura 3.7 muestra el espectro óptico la señal que está entrando a la fibra. Para obtener esta gráfica se utiliza un analizador de espectros ópticos (OSA, por sus siglas en inglés, *Optical Spectrum Analyzer*). El espectro contiene las señales digitales que modularon los espectros de luz de los láseres DFB ubicados en 193 y 193.2 THz. Como se observa, estas señales anteriormente combinadas, se encuentran separadas 200 GHz en frecuencia, por lo cual no se traslapan, permitiendo la recuperación efectiva de las señales digitales en el receptor.

A continuación ambas señales se transmiten a través de la fibra de 30 km de longitud. A la salida de la fibra se emplea un EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), que es un amplificador óptico que amplifica 15 dB. A continuación, se utilizan filtros ópticos pasa banda (BPF) ubicados cada uno a la longitud de onda de cada láser para elegir la señal digital deseada en cada caso. Luego se realiza la fotodetección (FD), obteniéndose a la salida las señales que se transmitieron. Con el objetivo de incrementar 30 dB el nivel de potencia, fue necesario utilizar amplificadores de RF en la salida de cada fotodetector. Finalmente las señales recibidas se observan en analizadores de espectros eléctricos (ESA, por sus siglas en inglés, *Electrical Spectrum Analyzer*) como se indican en las Figuras 3.8 y 3.9.

Como es de esperar, las señales recibidas están atenuadas, reduciéndose la potencia eléctrica de 10 dBm en la señal transmitida a -15 dBm en la señal recibida. No obstante los

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS: SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

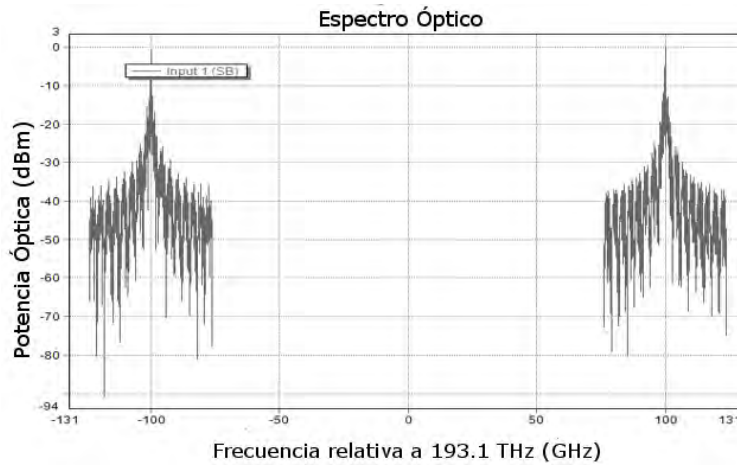


Figura 3.7: Espectro óptico de la señal a la entrada de la fibra óptica.

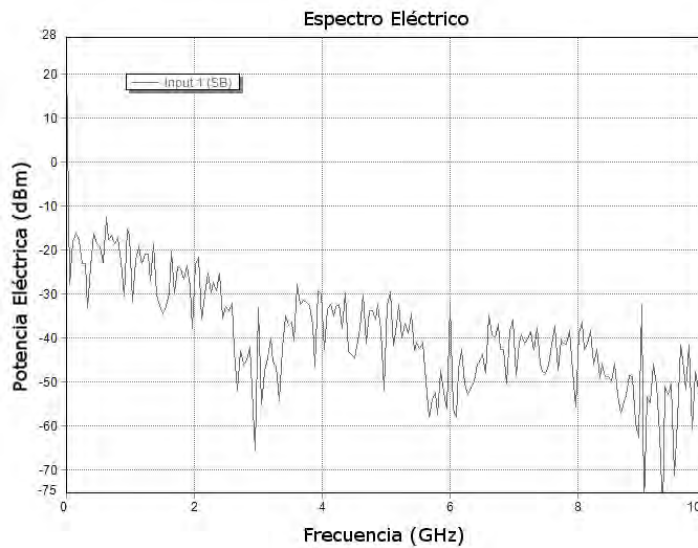


Figura 3.8: Señal PRBS recibida 1

lóbulos de las señales en 3, 6 y 9 GHz se definen claramente, por lo cual la información, que se encuentra en los primeros 3 GHz puede ser recibida adecuadamente y con una potencia aceptable de -15 dBm.

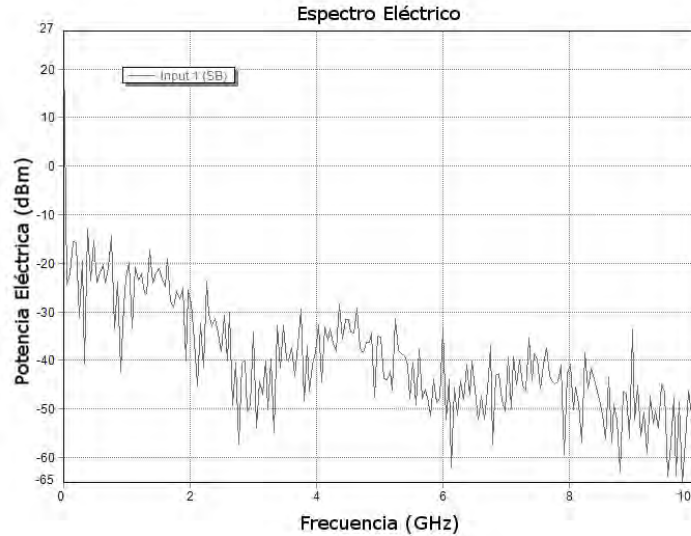


Figura 3.9: Señal PRBS recibida 2.

3.4. Resultados Experimentales

La Figura 3.10 presenta el esquema de multicanalización de señales digitales PRBS. Está compuesto básicamente por dos láseres DFB emitiendo a 1548 y 1554 nm, dos MZ-IM que tienen como entrada eléctrica señales digitales PRBS con codificación NRZ a una frecuencia de 1 GHz, un amplificador óptico Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA), una fibra óptica SM-SF de 30 km de longitud, un filtro óptico pasabanda que filtra entre 1535 y 1565 nm, un fotodetector (FD) y un analizador de espectros eléctrico.

Las dos señales eléctricas fueron producidas con el uso de un generador de señales digitales. Se trata de señales PRBS de longitud $2^{14} - 1$ y codificación NRZ a una frecuencia de 1 GHz que es la máxima que se puede generar en el generador de señales digitales (Agilent Technologies modelo 81133A). En el dominio del tiempo, una de las señales digitales representa el NOT lógico de la otra, pero en el dominio de la frecuencia, ambas señales tienen el mismo espectro de frecuencia, como el que se muestra en la Figura 3.11. Este resultado demuestra lo planteado en la Ecuación (3.6) y en la Figura 3.4. Ambas señales digitales modulan la luz en los MZ-IM y luego son sumadas con un acoplador óptico. A continuación se conectó un EDFA que tiene una ganancia óptica de hasta 15 dB, para luego pasar a través de la fibra óptica. A la salida de la fibra óptica, un filtro óptico se sintoniza manualmente a las frecuencias de los láseres para filtrar cada una

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS: SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

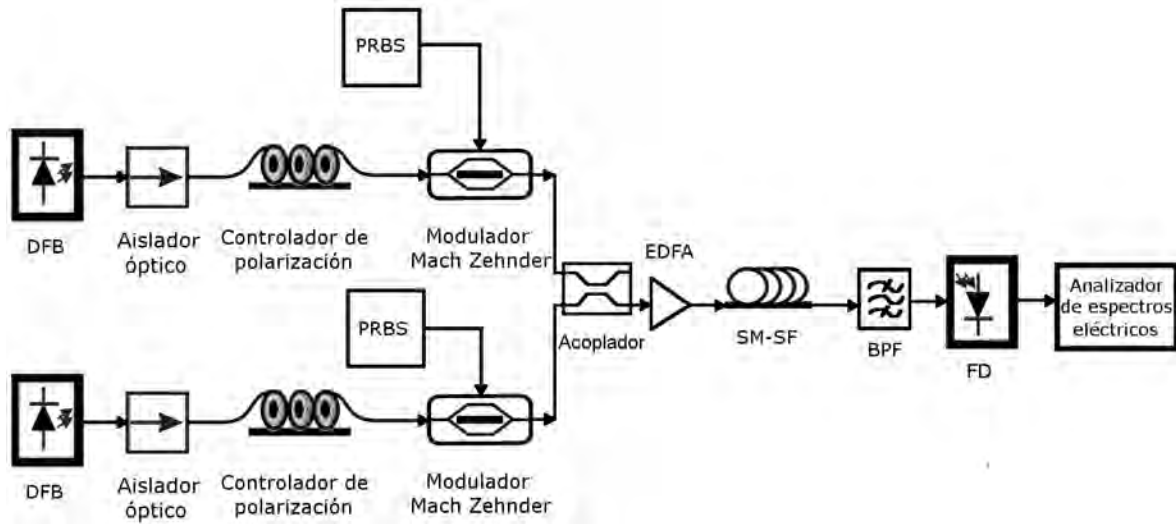


Figura 3.10: Esquema experimental señales digitales PRBS.

de las señales eléctricas que modulan la luz proveniente de los láseres. Por lo tanto el fotodetector que es el dispositivo utilizado para convertir del medio óptico al eléctrico, sólo recibe indistintamente una señal de las dos transmitidas.

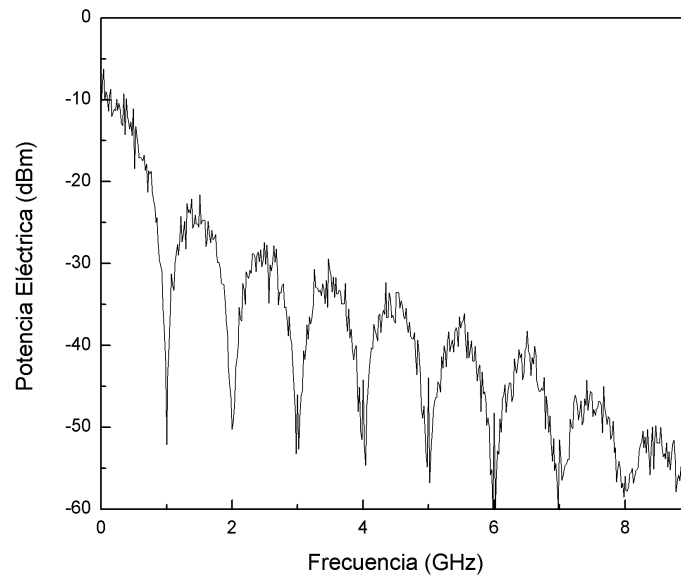


Figura 3.11: Señal digital PRBS transmitida a 1 GHz.

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS: SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las Figuras 3.12 y 3.13 presentan las señales recibidas en el analizador de espectros. Se observa que en los primeros 5 GHz de frecuencia, la potencia eléctrica de la señal recibida es cercana a la potencia de la señal transmitida. La atenuación es notable a partir de los 5 GHz pero la información es transmitida adecuadamente; no obstante la relación señal a ruido (SNR , por sus siglas en inglés, Signal-to-Noise Ratio) de la señal será algo menor como se demostrará en la siguiente sección.

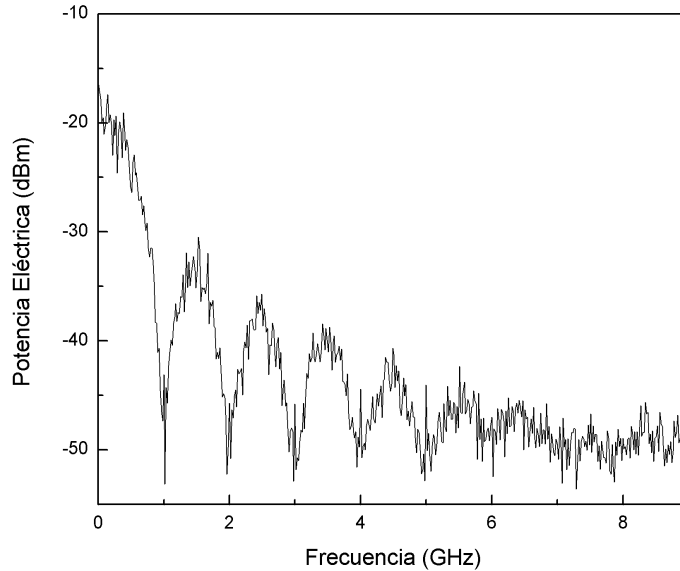


Figura 3.12: Señal digital PRBS recibida modulada a 1548 nm

3.5. Diagrama de Ojo de las señales digitales PRBS

El diagrama de ojo de datos es una representación gráfica de la señal digital que permite obtener algunos de los parámetros importantes que indican la calidad eléctrica de las señales digitales [52].

La señal digital ideal tendría un diagrama de ojo como el representado en la Figura 3.14. Como se observa, la apertura del ojo corresponde al período de un bit que es el ancho del diagrama de ojo. Sin embargo, las señales digitales no son ideales ya que presentan ruido, jitter y atenuación.

El diagrama de ojo de una señal digital no ideal se muestra en la Figura 3.15. Aquí se destacan algunas de las perturbaciones mencionadas: el jitter que constituye la desviación

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS: SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

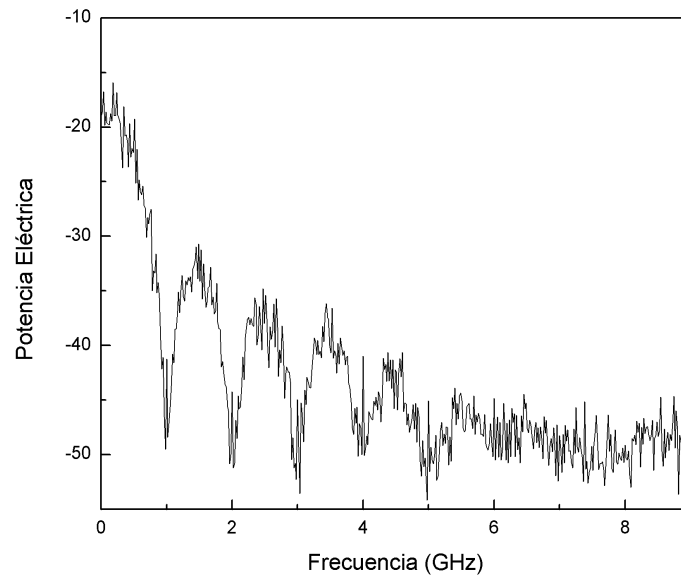


Figura 3.13: Señal digital PRBS recibida modulada a 1554 nm

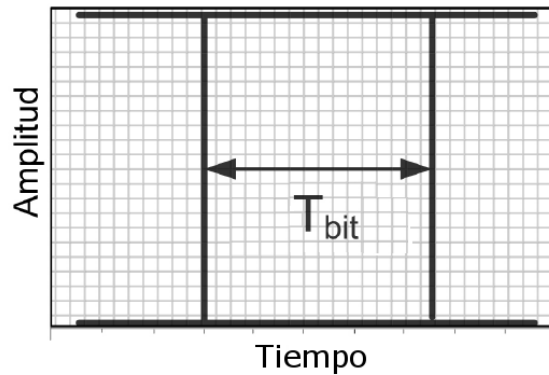


Figura 3.14: Diagrama de ojo de la señal digital ideal. Reproducido de [53]

en el tiempo de un bit de datos respecto al tiempo ideal, y la variación en los niveles del '1' y del '0', lo cual se traduce en una atenuación de la señal digital.

El parámetro SNR anteriormente mencionado define la relación del nivel de la señal deseada con respecto al nivel del ruido, por lo cual en una señal digital, un mayor valor de SNR es más deseable que uno menor. Este parámetro se calcula mediante la Ecuación (3.7). Para comprender esta ecuación es importante observar la Figura 3.16. En ella se muestra la distribución normal de los datos para los valores tanto del nivel uno como del

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS: SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

nivel cero. El nivel uno en la fórmula es la media de los datos del nivel uno correspondientes al 20 % más cercano al punto medio de la distribución. Además 1σ del nivel uno representa la desviación estándar $\pm 1\sigma$ de los datos de la distribución correspondiente al nivel uno. Para el nivel cero y su desviación estándar se analiza de la misma forma.

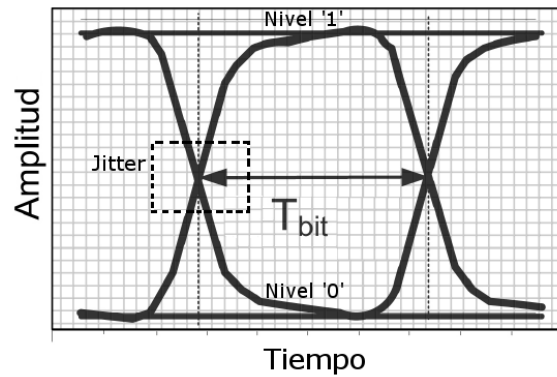


Figura 3.15: Diagrama de ojo de la señal digital no ideal. Reproducido de [53]

$$SNR = \frac{(\text{nivel uno} - \text{nivel cero})}{(1\sigma[\text{nivel uno}] + 1\sigma[\text{nivel cero}])} \quad (3.7)$$

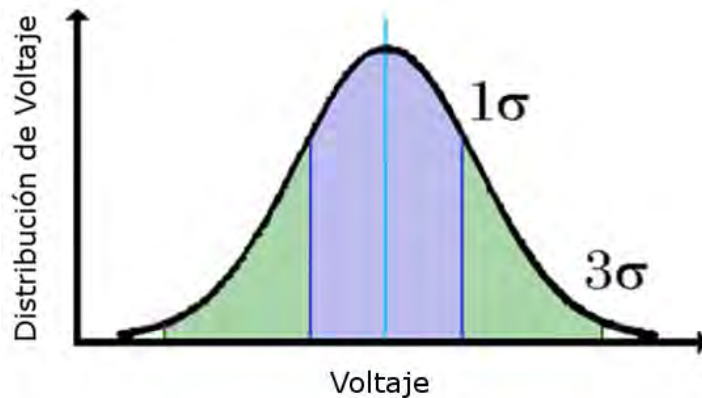


Figura 3.16: Distribución normal de los datos para el nivel uno y el nivel cero. Reproducido de [52]

3.5.1. Diagrama de ojo de la señal transmitida

La Figura 3.17 muestra el diagrama de ojo de la señal transmitida PRBS, obtenido en un osciloscopio digital. Se observa un ojo bien abierto y cierto nivel de jitter. Para realizar una comparación de la calidad eléctrica de las señales recibidas se calculó el SNR para la señal transmitida y las recibidas. Para ello se utilizó la Ecuación (3.7) que resultó en:

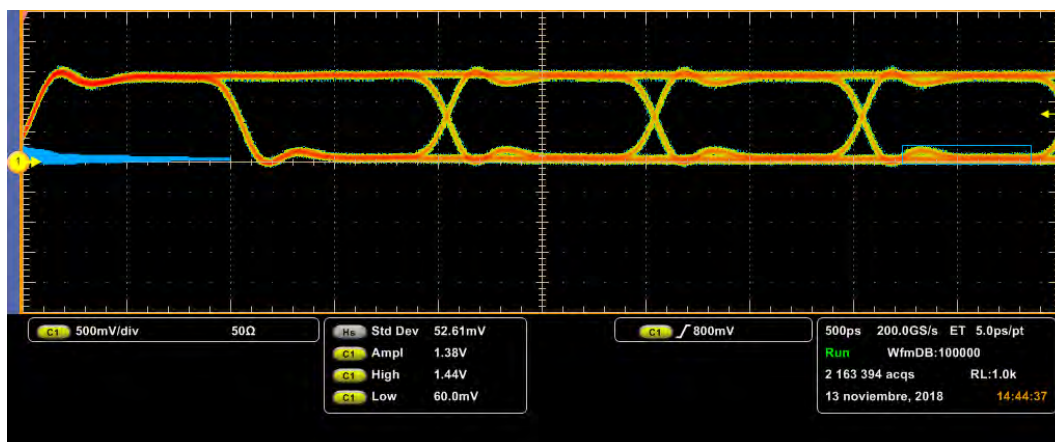


Figura 3.17: Diagrama de ojo de la señal transmitida

$$SNR = \frac{1.44 \text{ V} - 0.06 \text{ V}}{(33.94 \text{ mV} + 35.88 \text{ mV})} = 19.76 \quad (3.8)$$

Los valores de desviación estándar 1σ para el nivel 0 y el nivel 1 se obtuvieron de multiplicar 0.6826 por el valor de desviación estándar que mide el osciloscopio como se observa en la Figura 3.17 (*Std Dev*). El valor 0.6826 se obtiene del hecho de que para una distribución normal, el 68.26 % de los datos se encuentran en el intervalo $\pm 1\sigma$ [54].

El parámetro SNR tiene una mejor interpretación en decibeles (dB). La conversión se realiza mediante la Ecuación (3.9).

$$SNR(\text{dB}) = 20 \log(SNR) \quad (3.9)$$

de donde se obtiene:

$$SNR(\text{dB}) = 20 \log(19.76) = 25.91 \text{ dB} \quad (3.10)$$

3.5.2. Diagrama de ojo de las señales recibidas

Las Figuras 3.18 y 3.19 reflejan los diagramas de ojo de las señales recibidas que fueron obtenidos en el osciloscopio. En ellas se muestran las principales perturbaciones como son un jitter más marcado, mayor desviación estándar de los niveles del uno y del cero y cierto nivel de ruido (puntos verdes en el diagrama). Sin embargo, para señales que fueron transmitidas a lo largo de 30 km de fibra óptica y que fueron amplificadas en los dominios ópticos y eléctricos, se considera que tienen un ojo bastante abierto y un nivel de ruido que no es excesivo por lo cual ambas señales son recibidas sin problemas. El parámetro SNR brinda un nivel cuantitativo de la calidad de la señal por lo cual se halla para ambas señales.

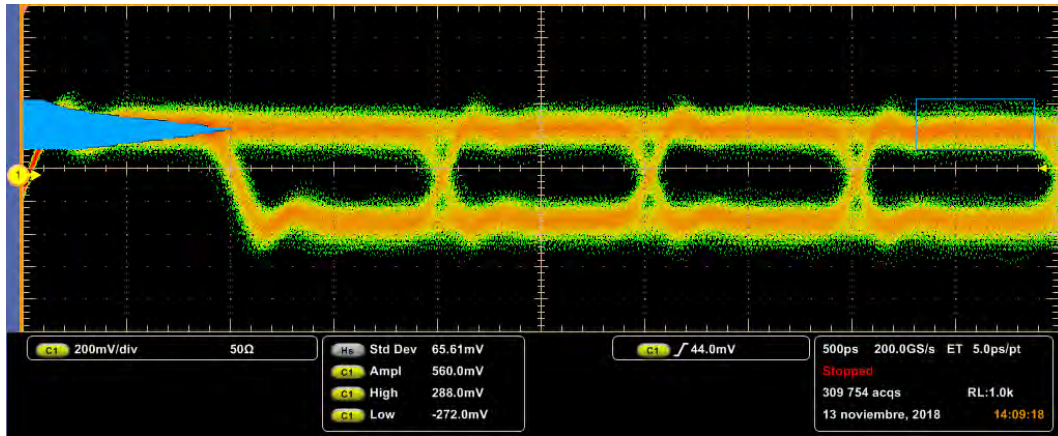


Figura 3.18: Diagrama de ojo de la señal recibida 1

La señal recibida que fue modulada a 1548 nm tiene una SNR dada por:

$$SNR_{1548nm} = \frac{288 \text{ mV} - (-272 \text{ mV})}{(44.7 \text{ mV} + 43.8 \text{ mV})} = 6.33 \quad (3.11)$$

$$SNR_{1548nm}(\text{dB}) = 20 \log(6.33) = 16.02 \text{ dB} \quad (3.12)$$

La señal recibida que fue modulada a 1554 nm tiene una SNR dada por:

$$SNR_{1554nm} = \frac{496 \text{ mV} - (-480 \text{ mV})}{(46.4 \text{ mV} + 51.9 \text{ mV})} = 9.93 \quad (3.13)$$

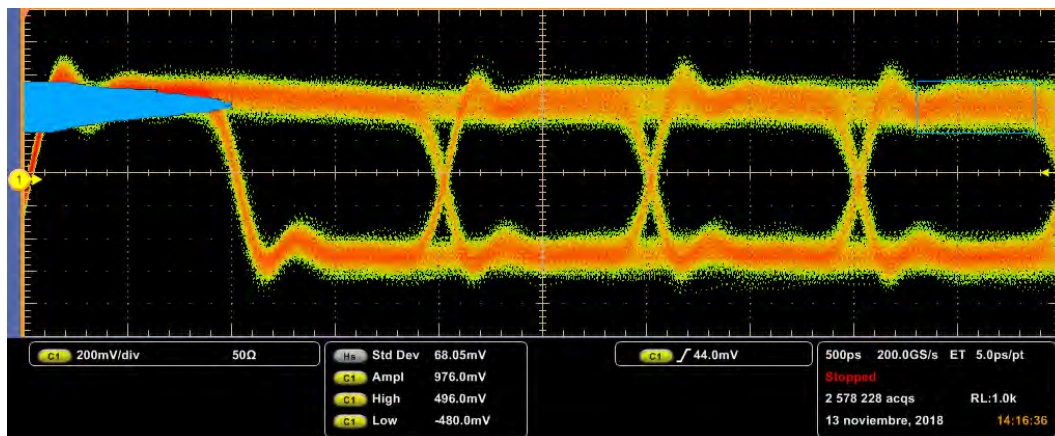


Figura 3.19: Diagrama de ojo de la señal recibida 2

$$SNR_{1554nm}(dB) = 20 \log(9.93) = 19.94 \text{ dB} \quad (3.14)$$

La Tabla 3.1 presenta una comparación de los valores obtenidos. Existe una diferencia de entre 5 y 10 dB en el parámetro SNR entre la señal transmitida y las señales recibidas. Este valor es considerado pequeño teniendo en cuenta la gran distancia recorrida por las señales y los procesos de amplificación por los cuales pasaron; por tanto, se considera que las señales recibidas tienen una calidad eléctrica aceptable.

Tabla 3.1: Comparación del parámetro SNR

Señal	SNR	$SNR(dB)$
Señal transmitida	19.76	25.91 dB
Señal recibida 1	6.33	16.02 dB
Señal recibida 2	9.93	19.94 dB

3.6. Conclusiones

En este capítulo se presentaron los resultados de la multicanalización de señales digitales PRBS con codificación NRZ. Inicialmente se brindó una introducción a las señales PRBS y la codificación NRZ. A continuación se planteó el esquema de simulación del sistema utilizando el software VPI Photonics, que sirvió para verificar los resultados experimentales.

CAPÍTULO 3. TRANSMISIÓN MULTICANALIZADA DE SEÑALES PRBS: SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Luego se definió el esquema experimental y se obtuvieron los resultados correspondientes a las señales transmitidas y recibidas. Mediante el diagrama de ojo se comprobó la calidad eléctrica de las señales recibidas, la cual fue medida en un osciloscopio digital. De aquí se obtuvo el parámetro SNR que define la relación del nivel de la señal deseada con respecto al nivel del ruido.

Teniendo en cuenta los resultados experimentales obtenidos, el diagrama de ojo de las señales recibidas y su SNR , se considera que las señales recibidas tienen muy buena calidad eléctrica respecto a la señal transmitida, por lo cual el esquema diseñado es efectivo. Esto es esencial para la demostración experimental en tiempo real de la multicanalización de señales HDMI que se analizará y discutirá en el siguiente capítulo.

Multicanalización de señales digitales HDMI

4.1. Introducción

En el capítulo anterior se definió un esquema para transmitir de forma multicanalizada señales digitales, las cuales fueron recibidas con buena calidad (niveles de potencia y SNR similares a las señales transmitidas). El objetivo de este capítulo es utilizar un esquema similar para transmitir en tiempo real señales HDMI y demostrar experimentalmente que después de 30 Km de fibra óptica se pueden recibir adecuadamente las señales de video utilizando filtros ópticos y un fotodetector. Se describe en forma detallada el esquema experimental propuesto. Luego se explica el proceso para generar las señales HDMI. Posteriormente se presentan los resultados obtenidos. Finalmente se llega a conclusiones referentes al experimento realizado.

4.2. Esquema experimental

En la Figura 4.1 se muestra el esquema utilizado para realizar el experimento. Es un sistema RoF para transmitir de forma multicanalizada dos señales HDMI. Dos láseres DFB sintonizables se controlan mediante el software TLB3900.vi para que operen a longitudes de onda de 1547.5 nm (equivalente a 193.8 THz) y de 1552.5 nm (equivalente a 193.2 THz). Los láseres DFB se conectan a aisladores ópticos para evitar realimentación de luz al láser. La salida de cada aislador se conecta a un controlador de polarización manual y su salida a los respectivos moduladores. A estos moduladores se les conectan las señales moduladoras

en su entrada RF, que en cada caso son señales HDMI a 1.5 GHz de frecuencia. Las señales HDMI tienen codificación NRZ, por lo cual su espectro eléctrico es similar al que se obtiene con la Ecuación (3.6) con mínimos en los múltiplos de la frecuencia de la señal digital.

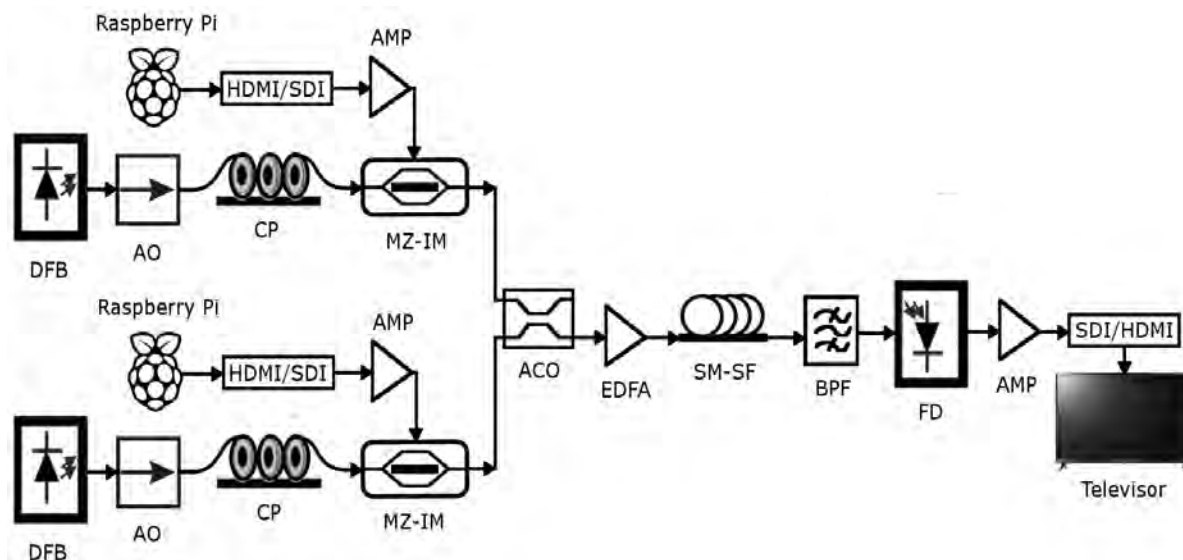


Figura 4.1: Esquema experimental

A la salida de cada modulador se tiene la señal HDMI impresa en el espectro óptico de cada láser. Para combinar estas señales se utiliza un acoplador óptico y la señal de salida se conecta a un EDFA con una ganancia de 15 dB, para posteriormente inyectarse a la fibra óptica de 30 km de longitud. A continuación un filtro óptico controlado manualmente se sintoniza en las longitudes de onda de los láseres utilizados para así filtrar sólo una de las dos señales que contienen la información HDMI. Posteriormente, el fotodetector se utiliza como transductor para convertir del medio óptico a eléctrico y a su salida se tiene una señal de radiofrecuencia correspondiente a la señal HDMI. Finalmente se reciben las señales en un monitor de televisión digital.

4.3. Generación y recepción de señales HDMI

Para generar las señales HDMI se utilizó un esquema como el planteado en la Figura 4.2. Las señales HDMI en este experimento son películas en alta definición (HD) que se generan en una tarjeta Raspberry pi (modelo B RPBM), que es un ordenador de placa

reducida, que incluye un procesador Broadcom, una memoria RAM, una GPU, puertos USB, HDMI, Ethernet y un conector para cámara. Esta tarjeta no incluye memoria interna, por lo que su memoria es una tarjeta MicroSD [55]. La generación de las películas HD se hizo mediante la programación de la raspberry utilizando sencillos códigos en el sistema operativo Raspbian que está basado en Linux. La salida HDMI de la Raspberry se conecta a un convertidor HDMI/SDI cuya función es convertir la señal HDMI proveniente de un cable de este tipo, a un conector BNC, que a su vez se conecta a un convertidor BNC/SMA, ya que este último, es el tipo de conector de la entrada RF del modulador electroóptico. De esta forma se incorporaron las señales HDMI al esquema RoF.

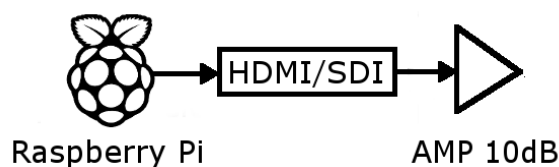


Figura 4.2: Generación de la señal HDMI

El proceso para la recepción de cada señal a la salida del fotodetector se presenta en la Figura 4.3. Debido a la atenuación de la señal al pasar por cada dispositivo óptico, y las pérdidas al convertir la señal del medio óptico al eléctrico, fue necesario utilizar 3 amplificadores eléctricos de 10 dB de ganancia. Posteriormente la señal se debe convertir a HDMI para ser desplegada adecuadamente en un monitor de televisión digital. Para ello se utilizan el convertidor SMA/BNC y el convertidor SDI/HDMI. Finalmente un cable HDMI transporta la señal hasta el televisor para su recepción.

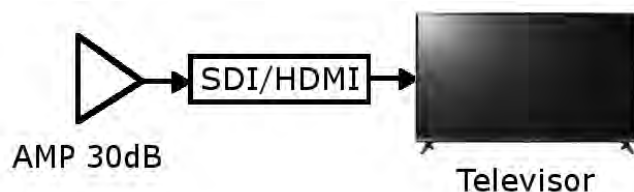


Figura 4.3: Recepción de la señal HDMI

4.4. Resultados experimentales

Las Figuras 4.4 y 4.5 presentan el espectro eléctrico de las señales HDMI enviadas. Al tener la señal HDMI una codificación NRZ, su espectro es similar a una función sinc cuadrada con mínimos en múltiplos de la frecuencia de la señal. Observando las Figuras 4.4 y 4.5, se entiende que estas señales HDMI tienen una frecuencia de 1.5 GHz. También es relevante que el primer lóbulo de la señal se encuentra a una potencia de aproximadamente -18 dB. De acuerdo al experimento propuesto, el umbral de potencia para recibir adecuadamente la señal HDMI en un televisor está entre -22 y -25 dBm en el primer lóbulo, por lo cual los -18 dBm de potencia de estas señales garantizan que la señal HDMI se despliegue correctamente en la televisión digital.

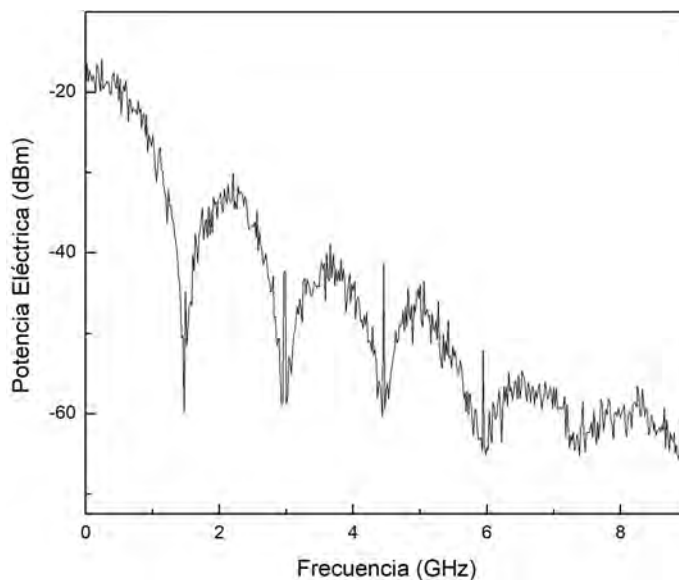


Figura 4.4: Espectro eléctrico de la señal enviada a 1547.5 nm

Es importante destacar que como se observa en las Figuras 4.4 y 4.5, la señal a la salida del convertidor HDMI/SDI tiene ciertos picos en los múltiplos de la frecuencia de la señal. Ante este comportamiento, se midió el espectro de frecuencia de diferentes señales HDMI generadas con diferentes fuentes, como son: una laptop, una tarjeta raspberry pi del modelo 1B, y una tarjeta raspberry pi del modelo 2B. En la Figura 4.6, se observa como estos picos se encuentran en todas las señales, por lo cual se considera que este comportamiento se debe al convertidor HDMI/SDI. Además en la referencia [56] se muestra el espectro de la señal HDMI con los picos mencionados.

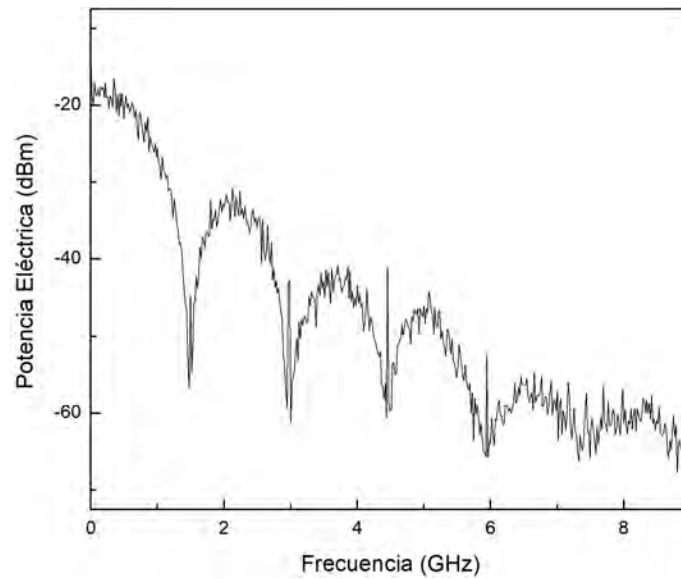


Figura 4.5: Espectro eléctrico de la señal enviada a 1552.5 nm

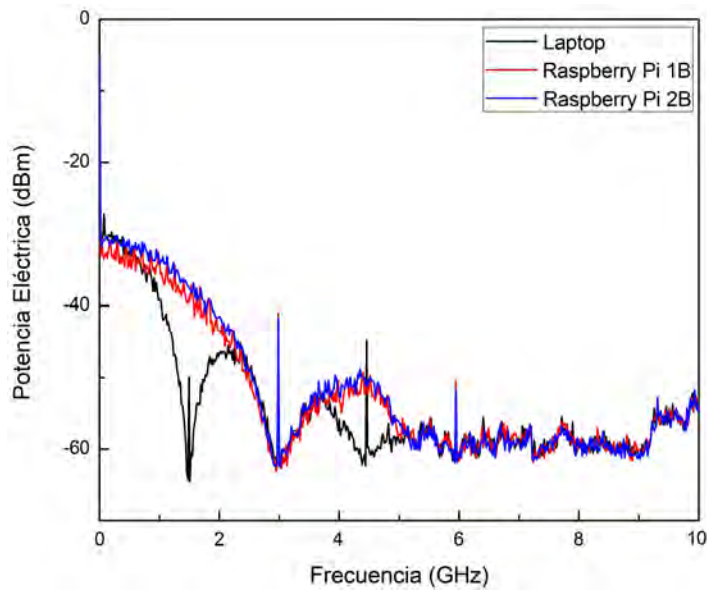


Figura 4.6: Espectros de señales HDMI con diferentes fuentes de generación de señal.

A continuación, cada señal HDMI modula a su respectiva señal óptica que entra a cada modulador Mach Zehnder. Por lo tanto a la salida de los moduladores se tiene la señal HDMI incorporada al haz óptico. Estas señales son combinadas mediante un acoplador

óptico 50:50 y debido a la atenuación que experimenta la señal, una de sus salidas se conecta a un amplificador óptico EDFA que amplifica 15 dB. Fue necesario utilizar el EDFA en este punto pues su umbral mínimo para reconocer una señal de entrada es de 0 dBm, y la salida del acoplador fue medida con un medidor de potencia óptica resultando en 0 dBm. Debido a esto, si se conectaba directamente la salida del acoplador a la fibra óptica, la potencia a la salida de la fibra sería mucho menor a 0 dBm y el EDFA no funcionaría. La otra salida del acoplador no se utilizó en el experimento.

La salida del EDFA se conectó a la entrada de la fibra óptica de 30 Km. La atenuación de esta fibra es de 0.2 dB/Km, por lo cual la señal óptica se atenúa en principio 6 dB, aunque en nuestro experimento se atenuó aproximadamente 10 dB. En este momento es importante señalar que existen dos tipos de conectores FC/PC y FC/APC. Nuestros dispositivos utilizan adaptadores diferentes, por lo cual cada vez que hay una conexión entre un conector FC/PC y un conector FC/APC hay pérdidas en potencia de entre 2 y 3 dB.

El espectro óptico a la salida de la fibra óptica se muestra en la Figura 4.7. Se observan las dos señales combinadas a una potencia óptica de aproximadamente -5 dB ubicadas a las longitudes de onda de los láseres.

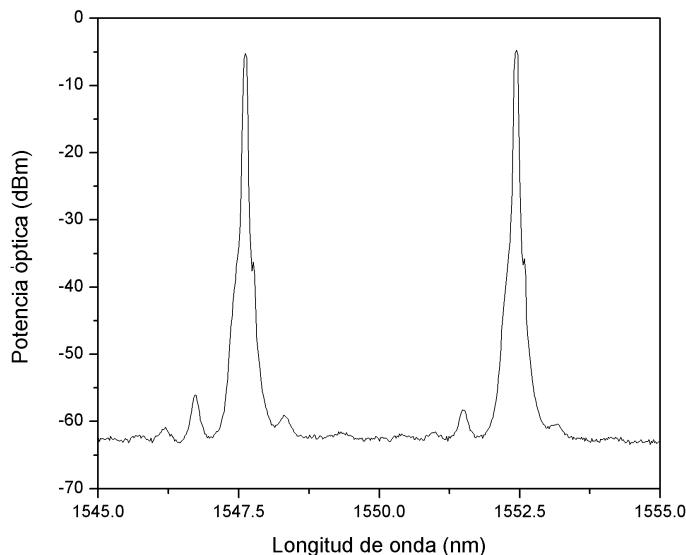


Figura 4.7: Espectro óptico a la salida de la fibra óptica

La salida de la fibra se conecta a un filtro óptico que se sintoniza manualmente a las longitudes de onda de cada láser para así filtrar la señal deseada. La Figura 4.8 presenta

el espectro óptico de la señal a la salida del filtro óptico cuando éste está centrado en 1547.5 nm. Debido a que la banda de paso de este filtro es de 2 nm, la señal de 1552.5 nm se suprime adecuadamente. Por otra parte la Figura 4.9 presenta la señal óptica cuando el filtro está centrado en 1552.5 nm por lo cual la señal de 1547.5 nm es suprimida.

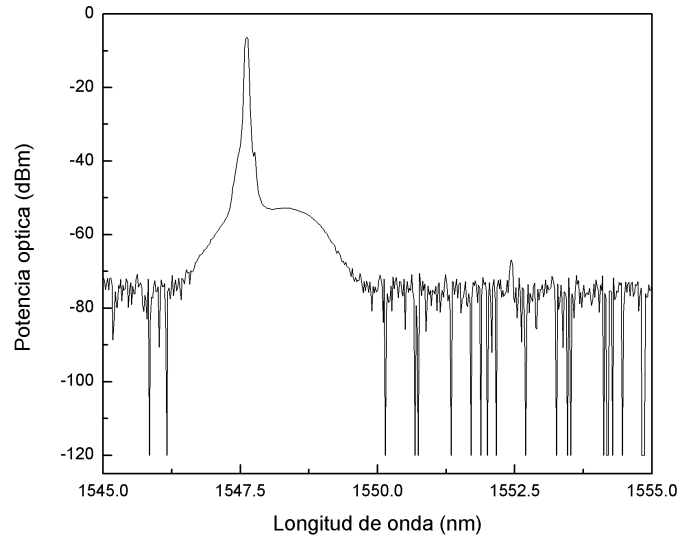


Figura 4.8: Espectro óptico a la salida del filtro óptico. Filtro centrado en 1547.5 nm.

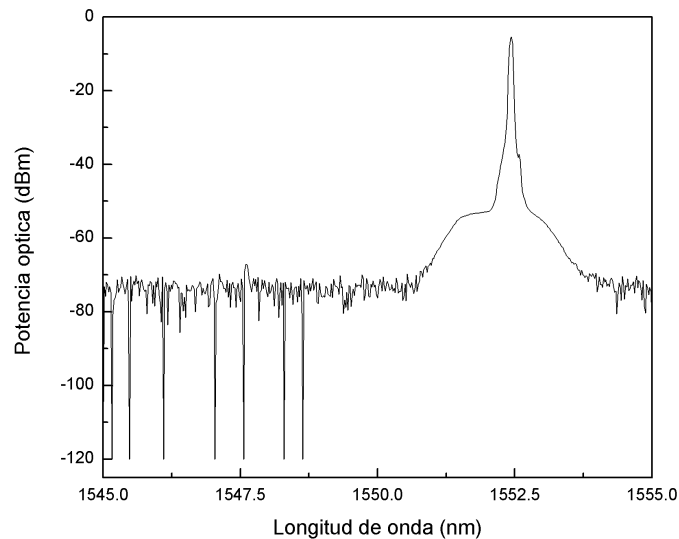


Figura 4.9: Espectro óptico a la salida del filtro óptico. Filtro centrado en 1552.5 nm.

A continuación cada señal se recibe en un fotodetector PIN (modelo DR-125G-A) . Debido a la limitada potencia óptica con la que llegaba la señal al fotodetector en este experimento, fue necesario utilizar un fotodetector PIN que incorpora un amplificador de RF. Esto hace que se incremente el nivel de potencia en aproximadamente 8 dBm. A la salida se tiene cada señal atenuada, por lo cual se utilizaron 3 amplificadores de 10 dB, para poder alcanzar el umbral mínimo de potencia con el cual las señales pueden ser recibidas en el televisor. Finalmente las señales son convertidas a HDMI y se conectan directamente al televisor mediante un cable HDMI.

Las películas HD fueron recibidas con buena calidad en el televisor, tal como se observa en la Figura 4.10. Para recibir en tiempo real cualquiera de las dos señales de información HDMI se ajustó el filtro óptico manualmente. Para obtener el espectro eléctrico de las señales recibidas se utilizó un analizador de espectros al cual se le conectó la salida de los amplificadores (debido a que era el último punto del esquema en el que la señal era de radiofrecuencia).

La Figura 4.10 muestra fotografías del arreglo experimental propuesto y de la recepción de una de las películas HD en el monitor de televisión digital.

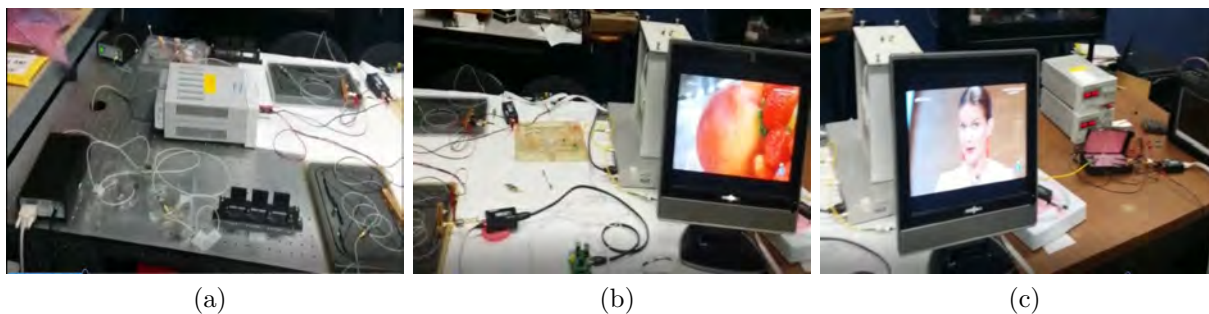


Figura 4.10: Fotografías del arreglo experimental propuesto. (a) Generación de las señales HDMI y de las señales ópticas.(b) Combinación de las señales y transmisión a través de la fibra óptica. (c) Recepción de cada señal en el monitor de televisión digital.

Las Figuras 4.11 y 4.12 presentan las capturas de las señales recibidas en el analizador de espectros eléctrico. Como se puede observar, las señales tienen niveles de potencia muy similares a las señales de entrada que varían entre -18 y -21 dBm en el primer lóbulo, ligeramente por encima de la potencia umbral mínima para ser recibida las señales correctamente en el televisor. Es importante destacar que los picos que se veían en las señales de entrada se han remarcado debido a los procesos de amplificación óptico y eléctrico al que se ha visto sometida la señal. Esto no impidió la excelente calidad de

ambas señales recibidas.

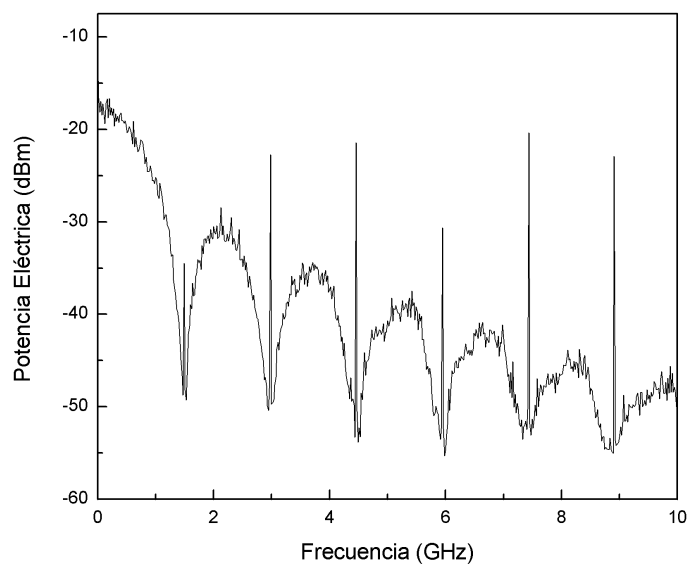


Figura 4.11: Señal HDMI recibida que moduló el láser a 1547.5 nm

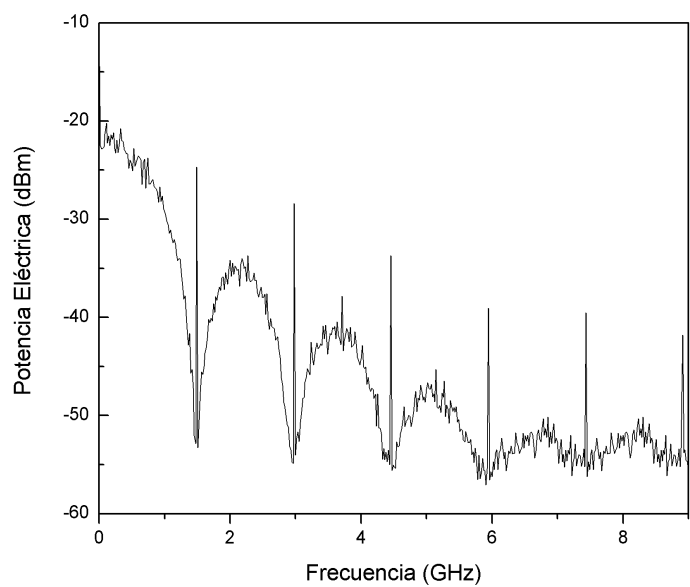


Figura 4.12: Señal HDMI recibida que moduló el láser a 1552.5 nm

4.5. Conclusiones

En este capítulo se describió la demostración experimental en tiempo real de un sistema RoF para la transmisión multicanalizada de señales HDMI. Las señales HDMI son señales de gran ancho de banda con una codificación NRZ. En el experimento, las películas HD tenían una frecuencia de 1.5 GHz; sin embargo la señal está dada por una función sinc que ocupa un ancho de banda total de 9 GHz. Se aprovechó el gran ancho de banda de la fibra óptica para transmitir estas señales al mismo tiempo en diferentes longitudes de onda. Se explicaron los procesos de generación y recepción de las señales HDMI para lo cual fue muy importante el empleo de tarjetas Raspberry Pi así como convertidores HDMI/SDI y SDI/HDMI. Se analizó el espectro de las señales en cada punto relevante del esquema, entre ellos: señales eléctricas de entrada del sistema, señales de salida de la fibra óptica, señales a la salida del filtro óptico, y las señales HDMI recibidas. Se logró el objetivo principal que era la transmisión en tiempo real de estas señales recibándose ambas películas con calidad eléctrica y de imagen.

Trabajo a Futuro

Como trabajo a futuro se propone el esquema planteado en la Figura 5.1. En este esquema se sustituyen las señales HDMI por señales 4K (resolución 4096x2160). Para esto se recomienda utilizar un generador de señales 4K-HDMI así como convertidores 4K-HDMI/SDI y SDI/4K-HDMI. Por otra parte se propone transmitir las señales 4K de forma inalámbrica utilizando antenas de bocinas en el rango de 0 a 10 GHz, pues las señales que se transmiten ocupan alrededor de 10 GHz. Para realizar este experimento será necesario estudiar las señales 4K-HDMI, así como el empleo de antenas de bocina para comunicación inalámbrica. Se deberán tener en cuenta los niveles de potencia de las señales antes de ser transmitidas de forma inalámbrica.

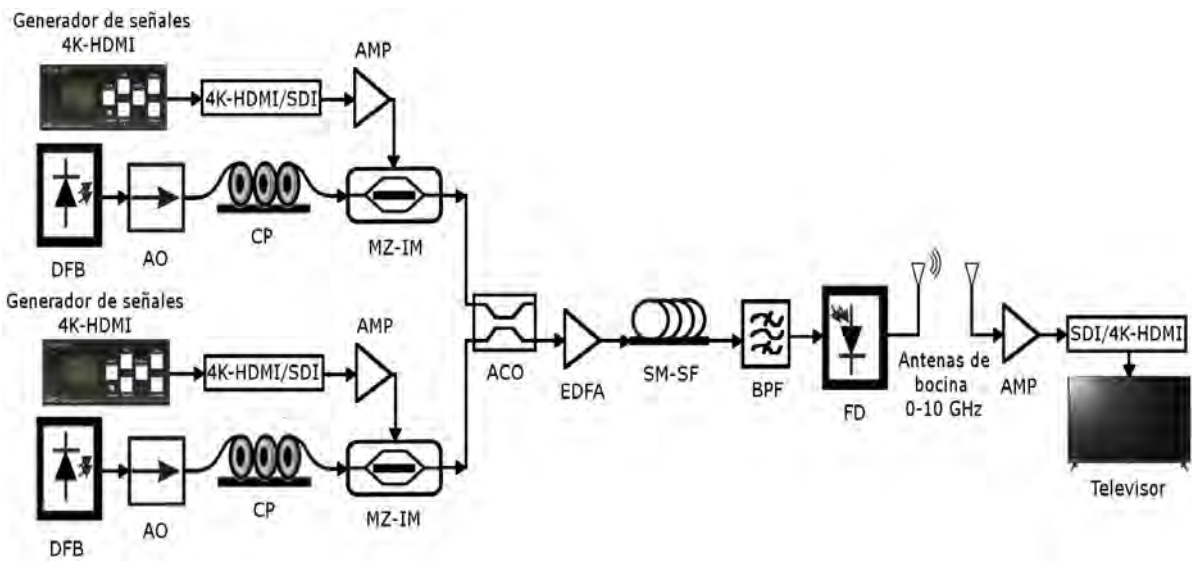


Figura 5.1: Esquema para trabajar a futuro incorporando señales 4K-HDMI y antenas de bocina para transmisión inalámbrica.

Referencias

- [1] Stavros Iezekiel. *Microwave photonics: devices and applications*, volume 3. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Robert A Minasian. Photonic signal processing of microwave signals. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54(2):832–846, 2006.
- [3] Jianping Yao. Microwave photonics. *Journal of Lightwave Technology*, 27(3):314–335, 2009.
- [4] David Wake, Anthony Nkansah, and Nathan J Gomes. Radio over fiber link design for next generation wireless systems. *Journal of Lightwave Technology*, 28(16):2456–2464, 2010.
- [5] Jianping Yao, Fei Zeng, and Qing Wang. Photonic generation of ultrawideband signals. *Journal of Lightwave Technology*, 25(11):3219–3235, 2007.
- [6] Yongning Ji, Mingjiang Zhang, Yuncai Wang, Peng Wang, Anbang Wang, Yuan Wu, Hang Xu, and Yongning Zhang. Microwave-photonic sensor for remote water-level monitoring based on chaotic laser. *International journal of bifurcation and chaos*, 24(03):1450032, 2014.
- [7] Jose Capmany, Beatriz Ortega, and Daniel Pastor. A tutorial on microwave photonic filters. *Journal of Lightwave Technology*, 24(1):201–229, 2006.
- [8] Shigeyuki Akiba, Masayuki Oishi, Jiro Hirokawa, Makoto Ando, Kyo Minoguchi, and Yoshihiro Nishikawa. Photonic architecture for beam forming of rf phased array antenna. In *Optical Fiber Communication Conference*, pages W2A–51. Optical Society of America, 2014.

-
- [9] Vincent J Urick, B Bucholtz, and Eric E Funk. High dynamic range, 100km digital radio-over-fiber links. In *Microwave Photonics*, pages 201–241. CRC Press, 2013.
- [10] Viyoma Sarup and Amit Gupta. A study of various trends and enabling technologies in radio over fiber (rof) systems. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126(20):2606–2611, 2015.
- [11] James Farmer, Brian Lane, Kevin Bourg, and Weyl Wang. *FTTx Networks: Technology Implementation and Operation*. Morgan Kaufmann, 2016.
- [12] Vincent Jude Urick, Keith J Williams, and Jason D McKinney. *Fundamentals of microwave photonics*, volume 1. John Wiley & Sons, 2015.
- [13] Hai-Han Lu, Hsiang-Chun Peng, Wen-Shing Tsai, Chun-Cheng Lin, Shah-Jye Tzeng, and Yi-Zsai Lin. Bidirectional hybrid catv/radio-over-fiber wdm transport system. *Optics letters*, 35(3):279–281, 2010.
- [14] Ming-Fang Huang, Arshad Chowdhury, Yu-Ting Hsueh, Jianjun Yu, and Gee-Kung Chang. Integration of rof with wdm-pon for lightwave centralized access networks. In *16th Opto-Electronics and Communications Conference*, pages 387–388. IEEE, 2011.
- [15] Bijayananda Patnaik and PK Sahu. Optimization of four wave mixing effect in radio-over-fiber for a 32-channel 40-gbps dwdm system. In *Electronic System Design (ISED), 2010 International Symposium on*, pages 119–124. IEEE, 2010.
- [16] Jagjit Singh Malhotra, Manoj Kumar, Ajay K Sharma, and Alok Kumar. Performance evaluation of 16 channel dwdm radio-over-fiber link. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 124(20):4120–4122, 2013.
- [17] Optical Signal-to-Noise Ratio. the q-factor in fiber-optic communication systems. *Maxim application note HFAN*, 9(2), 2008.
- [18] Wei Ji and Jun Chang. The radio-on-fiber-wavelength-division-multiplexed-passive-optical network (wdm-rof-pon) for wireless and wire layout with linearly-polarized dual-wavelength fiber laser and carrier reusing. *Optics & Laser Technology*, 49:301–306, 2013.
- [19] Gour Chandra Mandal, Rahul Mukherjee, Binoy Das, and Ardhendu Sekhar Patra. Bidirectional and simultaneous transmission of baseband and wireless signals over
-

- rsoa based wdm radio-over-fiber passive optical network using incoherent light injection technique. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 80:193–198, 2017.
- [20] John E Mitchell. Performance of ofdm at 5.8 ghz using radio over fibre link. *Electronics Letters*, 40(21):1353–1354, 2004.
- [21] Ming Chen, Xin Xiao, Jianjun Yu, Xinying Li, and Fan Li. Real-time generation and reception of ofdm signals for x -band rof uplink with heterodyne detection. *IEEE Photonics Technology Letters*, 29(1):51–54, 2017.
- [22] Xinying Li, Xin Xiao, Yuming Xu, Kaihui Wang, Li Zhao, Jiangnan Xiao, and Jianjun Yu. Real-time demonstration of over 20gbps v-and w-band wireless transmission capacity in one ofdm-rof system. In *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2017*, pages 1–3. IEEE, 2017.
- [23] Gerd Keiser. *Optical fiber communications*. McGraw-Hill, 2008.
- [24] David M Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.
- [25] Jia-Ming Liu. *Photonic devices*. Cambridge University Press, 2009.
- [26] Ignacio E Zaldívar-Huerta, Alejandro García-Juárez, Jorge Rodríguez-Asomoza, and Gustavo Aguayo-Rodríguez. A software tool to evaluate the frequency response of a microwave photonic filter in matlab based on a graphical user interface. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 125(1):318–323, 2014.
- [27] Henry Zanger and Cynthia Zanger. *Fiber optics: communication and other applications*. Merrill, 1991.
- [28] Universitat Politècnica de Valencia Beatriz Ortega Tamarit. Láseres monomodo. https://www.youtube.com/watch?v=BBVEk_NXeVM. Accessed: 2018-05-26.
- [29] Christophe Peucheret. Direct and external modulation of light. *Experimental Course in Optical Communication*, 2009.
- [30] Chi H Lee. *Microwave photonics*. CRC press, 2013.
- [31] Electro-Optics Technology. <https://www.eotech.com/56/technical-notes/faraday-rotators-and-optical-isolators>. Accessed: 2018-09-08.

-
- [32] Edward Collett. *Polarized light in fiber optics*. SPIE Press, 2003.
- [33] J.D. Jimenez S.A. Cotrino. https://opticacuantica.uniandes.edu.co/images/PDF/LabIntermedio/LabInt2014-1informefinalCotrino-Jimenez_paddle.pdf. Accessed: 2018-09-11.
- [34] Michel JF Digonnet and Herbert J Shaw. Analysis of a tunable single mode optical fiber coupler. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 30(4):592–600, 1982.
- [35] ANKUSH Kumar. Studies on optical components and radio over fiber system, 2009.
- [36] Silvano Donati. *Photodetectors*, volume 1. Prentice Hall PTR, 1999.
- [37] Stanley Electric Co. https://www.stanley-components.com/data/technical_note/TN014_e.pdf. Accessed: 2018-09-17.
- [38] Kazutoshi Kato. Ultrawide-band/high-frequency photodetectors. *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques*, 47(7):1265–1281, 1999.
- [39] Govind P Agrawal. *Fiber-optic communication systems*, volume 222. John Wiley & Sons, 2012.
- [40] Cisco Systems. https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/transceiver-modules/white_paper_c11-463661.html. Accessed: 2018-10-05.
- [41] CK Madsen and Jian H Zhao. Optical filter design and analysis: A signal processing approach john wiley & sons. *Inc. US, New York*, 1999.
- [42] Dongqing Li, editor. *Fabry-Perot Optical Filter*, pages 662–663. Springer US, Boston, MA, 2008.
- [43] Breck Hitz. https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Bragg_Gratings_Filter_WDM_Signals/a15318, 2003. Accessed: 2019-04-13.
- [44] Inc. DiCon Fiber Optics. <https://www.diconfiberoptics.com/products/scd0124/SCD0124B.pdf>, 2015. Accessed: 2019-04-13.
-

- [45] Steve Venuti, Jim Chase, and Laurie Iwami. High-definition multimedia interface (hdmi®). *Handbook of Visual Display Technology*, pages 1–13, 2016.
- [46] Rohde and Schwarz. https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/Eye_Measurements_on_HDMI_signals.pdf. Accessed: 2018-10-07.
- [47] Aniket Mani Tripathi. High definition multimedia interface (hdmi). Technical report, 2011.
- [48] Gerd Keiser. Optical fiber communications. *Wiley Encyclopedia of Telecommunications*, 2003.
- [49] Pasquale Daponte, Luca De Vito, and Sergio Rapuano. Prbs non-idealities affecting random demodulation analog-to-information converters. In *19th IMEKO Int. Workshop on ADC Modelling and Testing*, volume 1, pages 71–76. IMEKO Secretariat, 2016.
- [50] Joseph W Goodman. *Statistical optics*. John Wiley & Sons, 2015.
- [51] VPIphotonics. <http://vpiphotonics.com/index.php>. Accessed: 2018-06-12.
- [52] Anritsu Company. <https://rintintin.colorado.edu/~gifford/5830-AWL/Anritsu%20Eye%20Diagram.pdf>, 2014. Accessed: 2018-10-29.
- [53] ON Semiconductor. Understanding data eye diagram methodology for analyzing high speed digital signals. *Application Note.[Online]. Available: http://onsemi.com*, 2014.
- [54] Erik Grafarend and Joseph L Awange. *Applications of linear and nonlinear models: fixed effects, random effects, and total least squares*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [55] Raspberry Pi Foundation. <https://www.raspberrypi.org/documentation/faqs/>, 2017. Accessed: 2018-11-18.
- [56] S Yaakob, NM Samsuri, R Mohamad, NE Farid, IM Azmi, SM Mohd Hassan, N Khus-hairi, SA Eliche Ab Rahim, AI A Rahim, A Rasmi, et al. Live hd video transmission using 40ghz radio over fibre downlink system. In *Photonics (ICP), 2012 IEEE 3rd International Conference on*, pages 246–249. IEEE, 2012.

Generation of microwave signals by
heterodyning and multiplication
techniques: a comparison.

PROCEEDINGS OF SPIE

[SPIDigitalLibrary.org/conference-proceedings-of-spie](https://spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie)

Generation of microwave signals by heterodyning and multiplication techniques: a comparison

R. Sardiñas-Fernández, A. García-Juárez, I. E. Zaldívar-Huerta, L. A. González-Mondragón, L. J. Quintero-Rodríguez, et al.

R. Sardiñas-Fernández, A. García-Juárez, I. E. Zaldívar-Huerta, L. A. González-Mondragón, L. J. Quintero-Rodríguez, E. Avilez-Valenzuela, "Generation of microwave signals by heterodyning and multiplication techniques: a comparison," Proc. SPIE 10917, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII, 109171O (1 March 2019); doi: 10.1117/12.2506430

SPIE.

Event: SPIE OPTO, 2019, San Francisco, California, United States