

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño
Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MyDCI)



Generador de Pulsos Ópticos para Sistemas de Comunicaciones Ópticas

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Doctor en Ciencias e Ingeniería en Eléctrica

Ramón Muraoka Espíritu

Ensenada, Baja California, México 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de ingeniería, Arquitectura y Diseño
Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

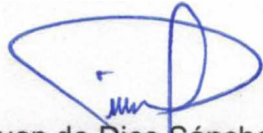
Generador De Pulsos Ópticos Para Sistemas De Comunicaciones Ópticas

TESIS

Que para obtener el grado de doctor en ciencias presenta:

Ramón Muraoka Espíritu

Aprobada por:



Dr. Juan de Dios Sánchez López
Director de Tesis



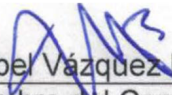
Dr. Arturo Arvizu Mondragón
Co-director de Tesis



Dr. Joel Santos Aguilar
Miembro del Comité



Dr. Juan Iván Nieto Hipólito
Miembro del Comité



Dra. Mabel Vázquez Briseño
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, junio 2022

Resumen de la tesis que presenta **Ramón Muraoka Espíritu** como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias e Ingeniería en Eléctrica. Ensenada, Baja California, México. Abril de 2022.

Generador de Pulsos Ópticos para Sistemas de Comunicaciones Ópticas

La fotónica de microondas es un área interdisciplinaria que estudia la interacción de las microondas con señales ópticas; siendo algunas de sus principales aplicaciones la distribución, el filtraje, el control, el procesamiento y la generación de señales de ondas milimétricas.

Actualmente existe un gran interés en esta última aplicación, en particular en los generadores de formas de onda fotónicas, con especial énfasis en generadores para sistemas de radio sobre fibra (RoF) para las actuales y futuras redes de Internet de nueva generación.

Los generadores fotónicos tienen ventajas importantes en comparación con los generadores puramente electrónicos. Gracias a que el procesamiento es en el dominio óptico los generadores fotónicos tienen un mayor ancho de banda, frecuencias de operación más altas, bajas pérdidas, inmunidad a la interferencia electromagnética, bajo costo y versatilidad de sintonización frecuencial, entre otras.

En el presente trabajo abordamos el desarrollo de un generador fotónico de onda triangular, el cual elegimos debido a su variedad de aplicaciones además de que al tener un borde lineal ascendente y descendente en cuanto a su intensidad óptica, presentará ventajas importantes sobre cualquier otra forma de onda, por ejemplo, sobre una senoidal, entre otras.

La implementación de generadores fotónicos se basa principalmente en el uso de moduladores electro-ópticos de Niobato de Litio (LiNbO_3) para su eficiente operación en

longitudes de onda de telecomunicaciones y con una relativa simplicidad de manejo en sus voltajes de corriente continua y parámetros de señal de radiofrecuencia (RF).

En particular, para implementar generadores de onda triangular basada en moduladores electro-ópticos, se han propuesto diferentes estructuras empleando ya sea un modulador Mach-Zehnder con un solo manejador (SD-MZM), un modulador Mach-Zehnder con doble manejador (DD-MZM) o un Mach-Zehnder Paralelo Dual con doble manejador (DPMZM).

Usualmente, estos esquemas mencionados utilizan diodos láser monomodo (LD) como fuentes ópticas debido a sus excelentes características, tales como bajo ancho de línea, alta coherencia, entre otras. Sin embargo, son más caras que las fuentes ópticas de baja coherencia. Por lo que, debido a su menor costo, es muy conveniente implementar generadores de formas de onda basados en fuentes ópticas de baja coherencia.

Entonces, en este trabajo, proponemos un esquema simple para generar formas de onda triangulares basadas en una señal senoidal única de radiofrecuencia y una fuente óptica de baja coherencia (un diodo superluminiscente (SLD)).

El esquema propuesto, original a lo mejor de nuestro conocimiento, fue presentado por primera vez en este trabajo y opera de la siguiente forma: cuando aplicamos la señal del diodo superluminiscente modulado a un interferómetro con línea de retardo, obtenemos varios armónicos no deseados además de los componentes armónicos impares requeridos. Un filtro de rechazo de banda formado por la interferencia de la portadora se sintoniza con una línea de retardo óptico (ODL) para eliminar la segunda componente espectral, dejando la señal únicamente con componentes impares obteniendo así, una forma de onda triangular (la cual consiste solo en armónicos de orden impar).

La caracterización del esquema propuesto fue llevada a cabo empleando VPI Photonics Maker, una poderosa herramienta de simulación de comunicaciones ópticas ampliamente

reconocida en el ámbito científico y académico que permite emplear parámetros de dispositivos comerciales y así, obtener resultados que serán útiles para nuestras implementaciones experimentales. Esta característica es muy conveniente pues uno de nuestros objetivos es poder implementar en un futuro nuestro esquema en el laboratorio.

En esta tesis obtuvimos resultados satisfactorios en cuanto a la generación de formas de onda triangulares con frecuencias de pulso de 100, 150, 250 y 300 MHz en lugar de utilizar frecuencias superiores del orden de GHz. Elegimos tales frecuencias pues si bien las aplicaciones de telecomunicaciones como la generación de señales de radio sobre fibra (RoF) o de banda ultraancha (UWB) utilizan la banda de GHz de forma extensiva, nuestro trabajo se centra en la banda de RF de cientos de MHz debido a sus diversas aplicaciones en varios campos como RADAR, control óptico de antenas de RF, sensores de fibra óptica, pruebas optoelectrónicas y otras aplicaciones de procesamiento de señales e instrumentación.

Resumen aprobado por:



Dr. Juan de Dios Sánchez López

Director de tesis

Palabras clave: generador fotónico, pulsos ópticos, onda triangular

Abstract of the thesis presented **by Ramón Muraoka Espíritu** as a partial requirement to obtain the Doctor of Science and Engineering degree in Electric. Ensenada, Baja California, México. April, 2022.

Optical Pulse Generator for Optical Communications Systems

Microwave photonics is an interdisciplinary area that studies the interaction of microwaves with optical signals; some of its main applications are the distribution, filtering, control, processing, and generation of millimeter-wave signals.

There is great interest in this last application, particularly in photonic waveform generators, emphasizing generators for radio over fiber (RoF) systems for current and future next-generation Internet networks.

Photonic generators have important advantages compared to purely electronic generators. Because the processing is in the optical domain, photonic generators have enormous bandwidth, higher operating frequencies, low losses, immunity to electromagnetic interference, low cost, and frequency tuning versatility.

In the present work, we approach the development of a triangular wave photonic generator. We chose such a wave due to its variety of applications; besides having a rising and falling linear edge in terms of its optical intensity, it will present important advantages over any other wave, for example, on a sine wave, among others.

The implementation of photonic generators is mainly based on Lithium Niobate (LiNbO₃) electro-optic modulators for their efficient operation in telecommunications wavelengths and with the relative simplicity of handling in their direct current voltages and radio frequency (RF) signal parameters.

In particular, to implement triangle wave generators based on electro-optic modulators, different structures have been proposed employing either a single-drive Mach-Zehnder

modulator (SD-MZM) or a dual-drive Mach-Zehnder modulator (DD- MZM) or a dual-driven Dual Parallel Mach-Zehnder (DPMZM).

Usually, these mentioned schemes use single-mode (LD) laser diodes as optical sources due to their excellent characteristics, such as low linewidth and high coherence, among others. However, they are more expensive than low-coherence optical sources. Therefore, it is very convenient to implement waveform generators based on low coherence optical sources due to their lower cost.

So, in this work, we propose a simple scheme to generate triangular waveforms based on a single sinusoidal radio frequency signal and a low-coherence optical source (a superluminescent diode (SLD)).

The proposed scheme (original to the best of our knowledge) was presented for the first time in this work. It operates as follows: when we apply the modulated superluminescent diode signal to a delay line interferometer, we obtain several unwanted harmonics and the required odd harmonic components. A band-reject filter formed by carrier interference is tuned to an optical delay line (ODL) to remove the second spectral component, leaving the signal with only odd components, thus obtaining a triangular waveform (which consists only in harmonics of odd order).

We carried out the characterization of the proposed scheme using VPI Photonics Maker, a powerful optical communications simulation tool widely recognized in the scientific and academic field that allows the use of commercial device parameters and thus obtain results that will be useful for our experimental implementations. This feature is very convenient because one of our goals is to be able to implement our scheme in the laboratory in the future. In this thesis, we obtained satisfactory results regarding the generation of triangular waveforms with pulse frequencies of 100, 150, 250, and 300 MHz instead of using

frequencies higher than the order of GHz. We chose such frequencies because although telecommunications applications such as radio over fiber (RoF) or ultra-wideband (UWB) signal generation use the GHz band extensively, our work focuses on the hundreds of MHz RF bands. Because of its diverse applications in various fields such as RADAR, optical monitoring of RF antennas, fiber optic sensors, optoelectronic testing, and other instrumentation and signal processing applications.

Abstract approved by:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "J. de Dios", enclosed within a blue oval shape. The signature is positioned above a horizontal line.

Dr. Juan de Dios Sánchez López

Thesis Advisor

Keywords: photonic generator, optical pulses, triangular wave.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis hijos y mi esposa, por ser ellos mi más grande inspiración para culminar con este grado académico.

Agradecimientos

En este trabajo de tesis doctoral quiero agradecer, primeramente, a Dios, por permitirme llegar a esta etapa de mi vida, darme salud y bienestar para lograr mis metas.

A mi esposa, mis hijos, mis padres y mi hermano, por su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios y mi vida profesional y académica.

A mis directores de tesis Dr. Arturo Arvizu Mondragón y Dr. Juan de Dios Sánchez López, por compartir su experiencia, consejos y conocimientos he podido llegar hasta este momento tan importante en mi vida.

A los miembros del comité Dr. Juan Iván Nieto Hipólito, Dra. Mabel Vázquez Briseño y Dr. Joel Santos Aguilar.

A todos mis maestros del posgrado, por compartir sus conocimientos y enseñanzas que lograron fomentar en mí el amor por el estudio que hoy culmina con la obtención del grado académico.

A mis amigos y compañeros por estar siempre presentes.

A la UABC unidad Ensenada y a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño que me han dado tanto.

Contenido

	página
Resumen español	i
Resumen inglés	iv
Dedicatorias	vii
Agradecimientos	viii

Capítulo	página
----------	--------

1	Capítulo	Introducción.....	1
1.1		Introducción.....	1
1.2		Pulsos ópticos.....	3
1.3		Estado del arte.....	5
1.4		Justificación.....	8
1.5		Planteamiento del problema.....	9
1.6		Hipótesis.....	10
1.7		Objetivo.....	10
	1.7.1	Objetivo general.....	10
	1.7.2	Objetivos específicos.....	10
1.8		Metodología.....	11
2	Capítulo	Técnicas de generación de pulsos	12
2.1		Técnicas de generación de pulsos.....	12
2.2		Mode-Locked Laser.....	12
2.3		Electro-optic modulator.....	13
2.4		Laser arrays.....	13

3	Capítulo	EL modulador electro-óptico.....	14
3.1		El modulador Mach-Zehnder.....	15
3.2		Configuración “single drive”.....	16
3.3		Configuración “dual drive”.....	17
3.4		Configuración “dual parallel”.....	18
4	Capítulo	Generador de pulsos monociclo con modulador Mach-Zehnder doble paralelo	20
4.1		El modulador doble paralelo (DPMZM).....	20
4.2		Generación del pulso	22
4.3		Experimento para la generación de un pulso monociclo.....	25
4.4		Generación del pulso monociclo de manera experimental.....	27
4.5		Utilizando un modulador doble paralelo (DMZM) en simulador.....	33
5	Capítulo	Generador de forma de onda triangular con una fuente de amplio espectro y un modulador SDMZM.....	35
5.1		Principio de operación.....	36
5.2		Generación fotónica de forma de onda triangular.....	38
5.3		Simulación.....	41
5.4		Resultados.....	44
6	Capítulo	Conclusiones y trabajo futuro	49
7	Referencias bibliográficas		52

Lista de figuras

Figura 1. Esquema a bloques de un sistema de comunicación óptica.....	2
Figura 2. Aplicaciones de radio sobre fibra.	4
Figura 3. Representación de desarrollo y aplicaciones relacionadas con OFC y pulsos ópticos.	7
Figura 4. Configuración de electrodos a) x-cut single drive, b) z-cut single drive y c) z-cut dual-drive.	15
Figura 5. Estructura de un modulador de fase de Niobato de Litio (LiNbO_3).....	16
Figura 6. Diagrama del modulador Mach-Zehnder single drive.	17
Figura 7. Diagrama del modulador Mach-Zehnder dual drive.	18
Figura 8. Diagrama del modulador Mach-Zehnder dual parallel.	19
Figura 9. Arquitectura del modulador doble paralelo Mach-Zehnder (DPMZM).....	21
Figura 10. Diagrama de funcionamiento para generar un pulso monociclo con un DPMZM.	23
Figura 11. Principio de generación del pulso monociclo.	24
Figura 12. Fotografía del montaje experimental.	24
Figura 13. Esquema para caracterizar los puertos VRF1, VRF2 y los voltajes de control Vdc1, Vdc2 y Vdc3.....	25
Figura 14. a) curva de respuesta del MZ1, b) curva de respuesta para el MZ2.....	27
Figura 15. Esquema del montaje experimental para generar el pulso óptico monociclo.....	28
Figura 16. a) Espectro del pulso eléctrico en la salida del divisor de potencia y su forma de onda, b) pulso monociclo generado ópticamente.....	29
Figura 17. a) Espectro del pulso óptico monociclo y su forma de onda, b) Espectro de un solo pulso óptico y su forma de onda.	31
Figura 18. Acercamientos al espectro del pulso óptico monociclo de la Figura 17-a.	32
Figura 19. Forma de onda triangular generada con un esquema con un DPMZM.....	34
Figura 20. Esquema a bloques típico de un filtro fotónico de señales de RF.	37
Figura 21. Esquema a bloques del esquema propuesto.	37
Figura 22. Diagrama esquemático del generador de forma de onda triangular (SLD: diodo superluminiscente; SDMZM: modulador electro-óptico; RF: Oscilador local; ODL: línea de retardo óptico; PD: fotodetector, OSC: osciloscopio, ESA: Analizador de espectros eléctrico).	39

Figura 23. Diagrama esquemático de simulación, AWGN: Generador de ruido blanco Gaussiano aditivo, SDMZM: Modulador Mach-Zehnder.....	42
Figura 24. Espectro de la fuente óptica.....	43
Figura 25. Con OL a 100MHz con retardo de 0.5 ns [(a) forma de onda de 100-MHz, (b) espectro eléctrico, (c) filtro fotónico], y retardo de 2.5 ns [(d) forma de onda triangular de 100-MHz, (e) espectro eléctrico y (f) filtro fotónico].....	45
Figura 26. Con OL a 150MHz con retardo de 0.5 ns [(a) forma de onda, (b) espectro eléctrico, (c) filtro fotónico], y con retardo de 5 ns [(d) forma de onda triangular de 150-MHz, (e) espectro eléctrico y (f) filtro fotónico].....	46
Figura 27. Con OL a 250MHz con retardo de 0.5 ns [(a) forma de onda, (b) espectro eléctrico, (c) filtro fotónico], y con retardo de 1ns [(d) forma de onda triangular de 250-MHz, (e) espectro eléctrico y (f) filtro fotónico].....	47
Figura 28. Con OL a 300MHz con retardo de 0.5 ns [(a) forma de onda, (b) espectro eléctrico, (c) filtro fotónico], y con retardo 7.5 ns [(d) forma de onda triangular de 300-MHz, (e) espectro eléctrico y (f) filtro fotónico].....	48

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de las comunicaciones ópticas inalámbricas.....	2
Tabla 2. Resultado en “OSA Publishing’s Digital Library” y “IEEE Xplore Digital Library”.....	6
Tabla 3. Clasificación de bandas de frecuencia de las microondas.....	8
Tabla 4. Resultados para el puerto VRF2.....	26
Tabla 5. Especificaciones técnicas de los componentes comerciales definidos en la simulación.....	42

1 Capítulo

Introducción

1.1 Introducción.

Para poner en contexto el tema en el cual se estará desarrollando este trabajo, empezaremos por definir el concepto de la Tecnología Fotónica, que bien se puede decir que es la tecnología utilizada para generar, procesar, transmitir y detectar fotones.

Una aplicación básica de esta tecnología es el transporte de información utilizando fuentes de luz como transmisores diodos emisores de luz (LED) o diodos laser (LD), como medio de transmisión o canal, las fibras ópticas o espacio libre y como receptor pueden ser fotodiodos.

En el ámbito de las comunicaciones ópticas inalámbricas o por fibra óptica y realizando una analogía con los sistemas de radiofrecuencia, la portadora óptica es equivalente a una portadora de radio frecuencia, pero con una frecuencia en la banda de los Tera-Hertz (1 THz = 1000 GHz).

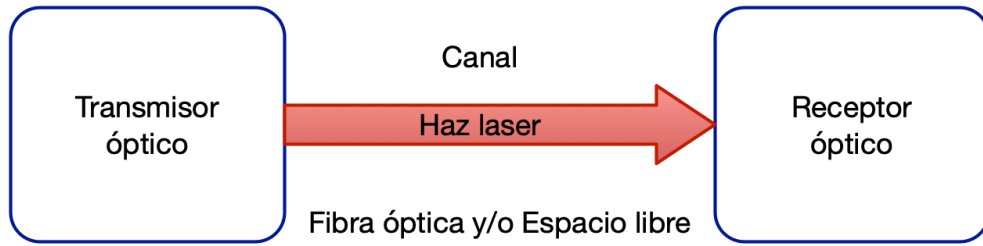


Figura 1. Esquema a bloques de un sistema de comunicación óptica.

Actualmente la tecnología fotónica en sistemas de comunicaciones, evoluciona constantemente debido al surgimiento de nuevos dispositivos y en los sistemas actuales han alcanzado un cierto grado de madurez.

Nuestro trabajo estará orientado a la utilizarse en las comunicaciones ópticas inalámbricas y pueden potencialmente emplearse en una amplia gama de aplicaciones.

Para cerrar el abanico de aplicaciones hay clasificaciones basadas en el rango de transmisión las comunicaciones ópticas inalámbricas y pueden ser estudiadas en cinco categorías [1].

En la Tabla 1 se observan las categorías y la clasificación de las comunicaciones ópticas según su rango de transmisión.

Tabla 1. Clasificación de las comunicaciones ópticas inalámbricas.

Categorías	Clasificación en Rango de transmisión	Ejemplo
1	Ultra corto	Comunicación Chip a Chip.
2	Corto	Red inalámbrica de área corporal (WBAN) y red de área personal inalámbrica (WPAN), las comunicaciones submarinas.

3	Medio	infrarrojo en interiores, las comunicaciones inter-vehicular y vehículo a infraestructura.
4	Largo	Conexión entre edificios.
5	Ultra largo	Enlaces entre satélites, enlaces de espacio profundo.

La categoría 4 y 5, en un rango de transmisión “Largo” y “ultra largo”, la comunidad involucrada a adoptado los términos de: Comunicación Óptica en Espacio Libre, Free Space Optics, Free Space Optical Communications o FSO.

El interés actual para los creadores de redes de comunicación fotónica es crear la solución para redes totalmente ópticas o fotónicas.

1.2 Pulsos ópticos.

Los pulsos ópticos han atraído considerable interés debido a sus potenciales aplicaciones en muchos campos, como la física, la espectroscopia, la química, la biología, la electrónica, las comunicaciones ópticas, sistemas de procesamiento de señales ópticas, medición óptica, procesamiento de materiales, y la fabricación óptica [2].

Hoy en día hay una demanda creciente de sistemas de baja transmisión de energía y de alta velocidad, la tecnología de radio de ultra banda ancha (UWB) se convierte en una técnica importante para ser utilizada en la nueva generación enlaces inalámbricas de banda ancha de corto alcance [3].

Las principales ventajas que ofrece UWB son la alta velocidad de datos, la inmunidad a la propagación por multi-trayectorias, la flexibilidad en la reconfiguración de la velocidad de datos y potencia, la ubicación exacta del usuario móvil, y la fácil protección de datos.

Aplicaciones de UWB incluyen redes de área local y amplia, redes de sensores, comunicaciones de emergencia, radares y aplicaciones militares. Una solución conveniente para ampliar el entorno de UWB es a través de redes de fibra óptica que prestan servicios en la zona de cobertura amplia.

Para esto es necesario la generación de pulsos ópticos o conversión de eléctrico-óptico utilizando moduladores de intensidad [4].

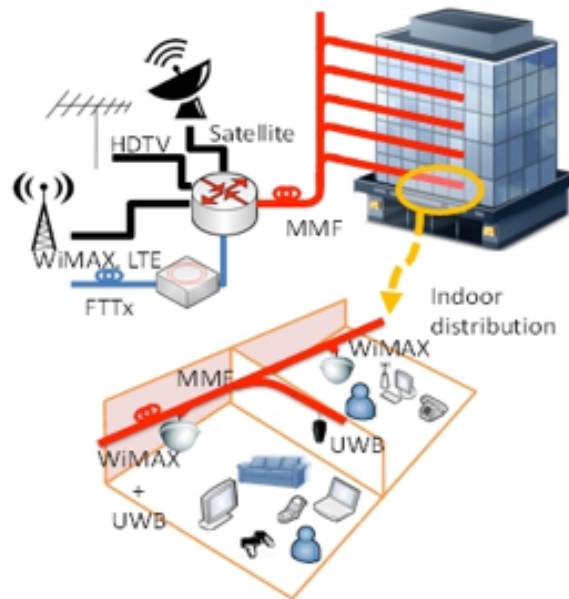


Figura 2. Aplicaciones de radio sobre fibra.

En la Figura 2 se puede observar aplicación de radio sobre fibra, las señales de radio son transportadas por una fibra óptica para ampliar la cobertura de la aplicación de RF.

1.3 Estado del arte.

En esta sección revisamos la literatura que utilizan los moduladores electro-ópticos con diferentes arquitecturas para la generación de pulsos ópticos y OFC para diversas aplicaciones en sistemas de comunicación.

La estrategia utilizada para la revisión de la literatura se basa en parte en una guía para revisiones sistemáticas apropiada para investigadores de ingeniería de software [7].

Considerando criterios de inclusión en campos de: fibra óptica, comunicaciones ópticas, diseño óptico, sistemas ópticos, óptica física, moduladores, fotónica de microondas y fotónica.

Considerando criterios de exclusión de temas relacionados en: conversores de analógico a digital, materiales, imagenología, computación óptica, óptica no lineal, óptica ultrarrápida y satélites.

Los resultados de los artículos seleccionados bajo los criterios de inclusión y exclusión mencionados anteriormente sobre dos bibliotecas OSA e IEEE, se muestran en la Tabla 2

Tabla 2. Resultado en “OSA Publishing’s Digital Library” y “IEEE Xplore Digital Library”

Filtro de búsqueda	OSA	IEEE
Dual Parallel Mach-Zehnder Modulator, OFC	6	5
Optical frequency combs, Dual Parallel Mach-Zehnder Modulator	11	8
Optical frequency combs, DPMZM	2	2
Optical pulse Generation, DPMZM	4	6
Optical pulse Generation, OFC, Modulators	2	10
Mach-Zehnder Modulator, DD-MZM, combs	0	1
Optical pulse Generation, DD-MZM	1	6
Dual-drive Mach-Zehnder Modulator, OFC, DD-MZM	0	2

En la Figura 3 se representa el mapa conceptual de todos los trabajos formando tres interesantes apartados: técnicas de generación, modulador electro-óptico y aplicaciones, relacionadas con OFC y pulsos ópticos.

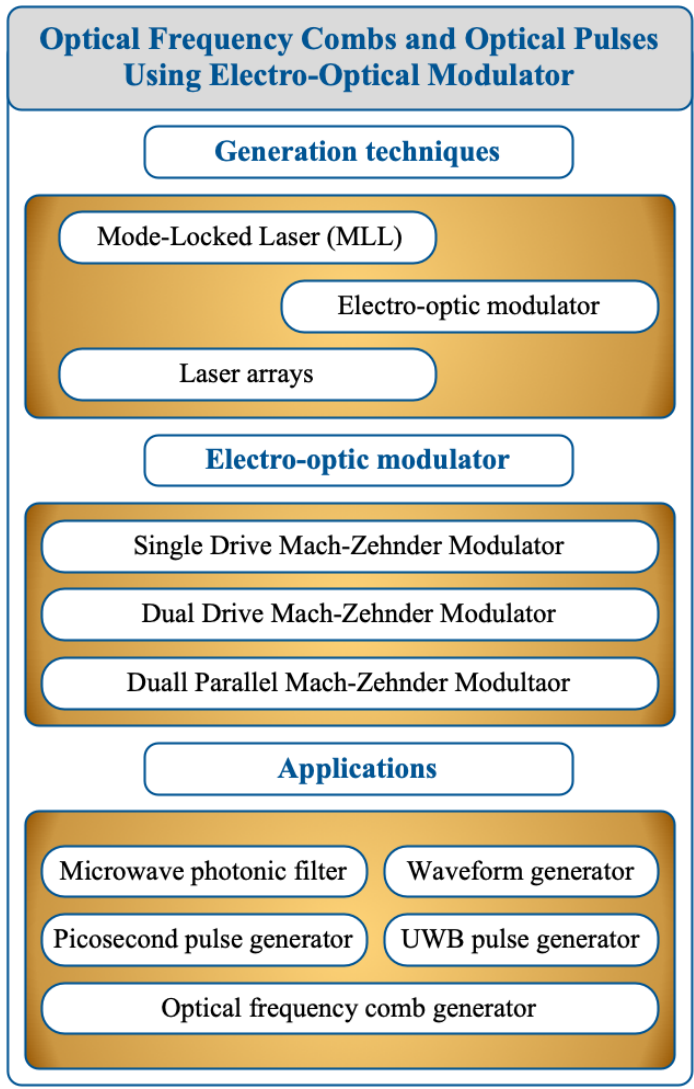


Figura 3. Representación de desarrollo y aplicaciones relacionadas con OFC y pulsos ópticos.

Lo que logramos observar con el resultado de esta búsqueda es que la utilización de moduladores electro ópticos es utilizado para aplicaciones de generador de pulsos y generador de formas de onda, sin embargo, en todos los casos que consultamos es utilizado como fuente óptica el laser mono modo. De ahí resulta interesante la utilización de fuentes ópticas de amplio espectro para la generación de pulso y/o formas de onda ópticas.

1.4 Justificación.

La fotónica de microondas es un área interdisciplinaria que estudia la interacción de las microondas y las señales ópticas, algunas de sus principales aplicaciones en los sistemas de fotónica de microondas incluyen generación fotónica, distribución, control y procesamiento de señales de ondas milimétricas[5].

En general, los temas cubiertos por la fotónica de microondas incluyen el control óptico de arreglos de antenas, procesamiento todo óptico de señales de microondas, filtraje, mezclado, generadores formas de onda, radio sobre fibra (RoF), generación de pulsos de banda ultra ancha (UWB), UWB sobre fibra (UWBoF) y convertidor analógico digital fotónico.

Una de la principales motivaciones para la utilización de la fotónica para aplicaciones de ingeniería de microondas es el amplio ancho de banda y las baja pérdida que ofrece la fotónica, por esos es posible la implementación de alto rendimiento de la generación y el procesamiento de señales de microondas, mientras que en el dominio eléctrico las mismas funciones pueden no ser implementables o se vuelve complicada y costosa[6].

Las señales de microondas están incluidas en las bandas de radio frecuencia (RF) en el intervalo de 300 MHz a 300 GHz, el cual esta dividido en bandas de frecuencia como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de bandas de frecuencia de las microondas.

Banda	Rango de frecuencia (GHz)	Siglas
Ultra Alta Frecuencia	0.3 - 3	UHF
Super Alta Frecuencia	3-30	SHF
Extra Alta Frecuencia	30 - 300	EHF

1.5 Planteamiento del problema.

Actualmente existen tres métodos principalmente para generar peines de frecuencia óptica (OFC) [8][9]: el láser de bloqueo de modo (MLL), arreglos de láseres y la utilización de moduladores electro-ópticos (EOM).

El método de generación basado en EOM es conveniente y económico porque las líneas de peine se pueden ajustar fácilmente [10]. Las mejoras de usar un modulador Mach-Zehnder (MZM) son: alta estabilidad, baja inestabilidad y control independiente del espaciado del peine y la longitud de onda central [11].

En todas las propuestas las fuentes ópticas que se utilizan son las de alta coherencia o de espectro angosto, resultando esquemas complejos en algunos casos y costosos, actualmente no hay propuestas de generación de pulsos ópticos con la utilización de fuentes ópticas de baja coherencia o de espectro amplio por lo que se observa un nicho de oportunidad, lo cual presentaría ventajas de menor costo.

1.6 Hipótesis.

En base a lo anterior se plantea la siguiente hipótesis:

- Es posible obtener esquema para la generación de pulsos ópticos con la utilización de un modulador electro-óptico sencillo (SDMZM).
- Es posible utilizar fuentes de baja coherencia o de amplio espectro para obtener un generador de pulsos ópticos.
- Es posible obtener un esquema para la generación de pulsos ópticos que conste de una cantidad mínima de componentes.

1.7 Objetivo.

En base a las hipótesis previamente planteadas, en este trabajo se plantea el siguiente objetivo general, que se abordara realizando los objetivos específicos.

1.7.1 Objetivo general.

Obtener un esquema optimizado de un generador de pulsos ópticos, basado en esquemas de filtrado fotónico con la utilización de fuentes ópticas de amplio espectro.

1.7.2 Objetivos específicos.

- Realizar montajes experimentales con esquemas que integren el modulador electro-óptico.
- Realizar la simulación de los sistemas propuestos

1.8 Metodología.

La recopilación de la información sobre el tema se realizará mediante la consulta de publicaciones científicas, conferencias, tesis, libros y otras fuentes tales como Internet.

Se seleccionará la información que resulte más relevante y que ayude a la realización del proyecto de investigación y en base a esta información se obtendrán los requerimientos para el diseño del generador de pulsos ópticos.

Una vez que se tenga el diseño, y los resultados de la simulación sean satisfactorios con lo que se espera del generador de pulsos ópticos y el sistema, se procederá al montaje experimental.

2 Capítulo

Técnicas de generación de pulsos

2.1 Técnicas de generación de pulsos.

Actualmente existen tres métodos para generar peine de frecuencia óptica (OFC) [8][9]: el láser de bloqueo de modo (MLL) y la modulación de fase de un láser de onda continua (CW) utilizando moduladores electro-ópticos (EOM).

2.2 Mode-Locked Laser.

Esta técnica genera un flujo de pulsos ópticos ultracortos fijando las fases relativas de todos los modos de láser longitudinales. Las técnicas actuales de bloqueo de modo son efectivas en un ancho de banda tan grande que los pulsos resultantes pueden tener una duración de 6 fs o menos [8]. Sin embargo, los generadores basados en MLL tienen poca adaptabilidad y estabilidad porque el entorno influye fácilmente en el resonador [10].

2.3 Electro-optic modulator.

El método de generación basado en EOM es conveniente y económico porque las líneas de peine se pueden ajustar fácilmente [10]. Las mejoras de usar un modulador Mach-Zehnder (MZM) son: alta estabilidad, baja inestabilidad y control independiente del espaciado del peine y la longitud de onda central [11].

2.4 Laser arrays.

Esta técnica puede considerarse compleja debido a su implementación técnica considerando los circuitos de empaquetamiento, acoplamiento óptico y control [12].

3 Capítulo

EL modulador electro-óptico

Los materiales electro-ópticos cambian su índice de refracción cuando se aplica un campo eléctrico externo [13], uno de estos materiales es el niobato de litio LiNbO_3 que es uno de los materiales elegidos para la fabricación de moduladores electro-ópticos, debido a que tiene una gran electro-coeficiente óptico y alta transparencia óptica en las longitudes de onda del infrarrojo cercano [14].

El primer parámetro de diseño para el modulador de LiNbO_3 es la orientación de los ejes del cristal hacia la guía de ondas ópticas y los electrodos. El corte del cristal de LiNbO_3 afecta la eficiencia del modulador y las topologías de los electrodos afectan el ancho de banda y los voltajes del controlador [14].

Entre las estructuras más comunes de acoplamiento de la señal eléctrica a la guía de ondas ópticas en el diseño de los moduladores de niobato de litio, también denominada configuración de electrodos, se encuentran x-cut single drive, z-cut single drive y la z-cut dual drive, como se muestra en la Figura 4.

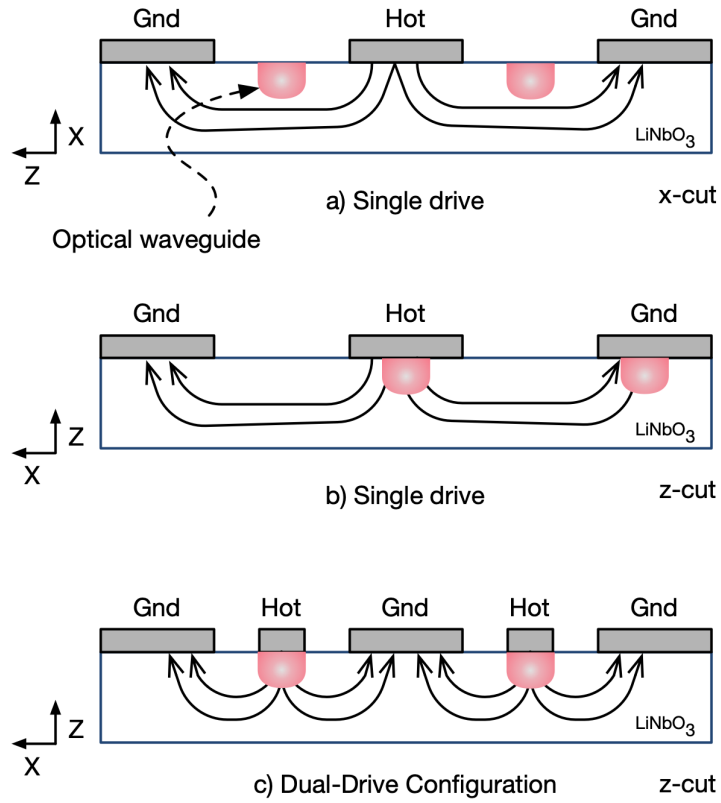


Figura 4. Configuración de electrodos a) x-cut single drive, b) z-cut single drive y c) z-cut dual-drive.

3.1 El modulador Mach-Zehnder.

Un cambio de fase no afecta la intensidad del haz de la fuente. Sin embargo, un modulador de fase puesto en un brazo de un interferómetro tipo Mach-Zehnder, puede funcionar como modulador de intensidad.

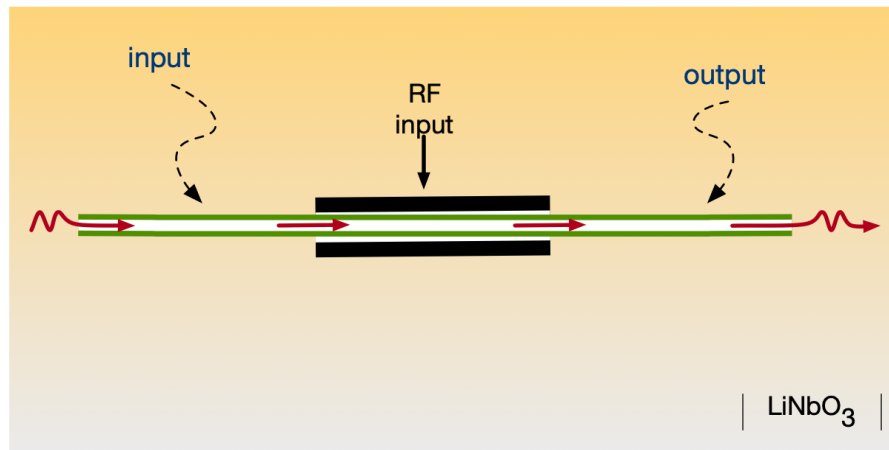


Figura 5. Estructura de un modulador de fase de Niobato de Litio (LiNbO₃)

En telecomunicaciones la técnica de modulación más utilizada es la modulación externa, se utiliza un modulador de intensidad basado en la estructura interferométrica Mach-Zehnder, llamado Mach-Zehnder Modulator (MZM). A continuación, se muestran las tres estructuras más utilizadas de los moduladores como elemento principal de los esquemas de peine de frecuencia y pulso óptico.

3.2 Configuración “single drive”.

El modulador de intensidad Mach-Zehnder single drive (SD-MZM) basado en la arquitectura interferométrica Mach-Zehnder se muestra en la Figura 6.

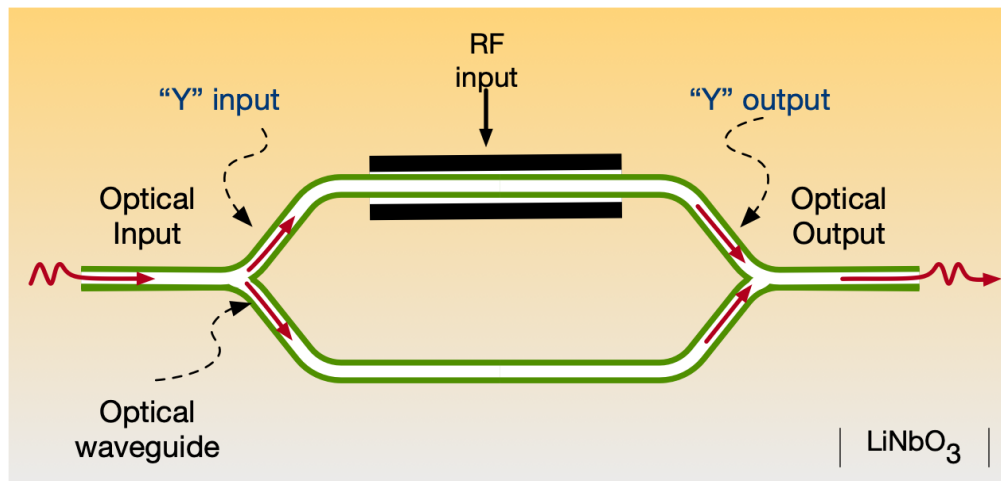


Figura 6. Diagrama del modulador Mach-Zehnder single drive.

La señal óptica en la entrada es separada en dos caminos por la entrada "Y", la señal que pasa por el brazo superior tiene un cambio de fase proporcional a la señal eléctrica de entrada en el puerto RF por efecto electro-óptico, y la salida "Y" los dos caminos se recombinan y habrá interferencia destructiva o constructiva, dependiendo de la diferencia de fase entre las dos señales, este mecanismo permite obtener una señal modulada en intensidad.

3.3 Configuración "dual drive".

En un esquema de modulador Mach-Zehnder dual-drive (DD-MZM), la arquitectura consiste en dos moduladores de fase (PM), ambos brazos arriba y abajo, pueden ser modulados independientemente [15], esto significa que pueden ser excitados por señal de RF diferente, de la misma manera que el modulador Mach-Zehnder single drive (SD-MZM), la entrada óptica está separada en dos caminos por la entrada "Y" y recombinada por la salida "Y"

resultando en una interferencia destructiva o constructiva en la salida óptica. La arquitectura DD-MZM tiene dos electrodos o entradas de RF como se muestra en la Figura 7.

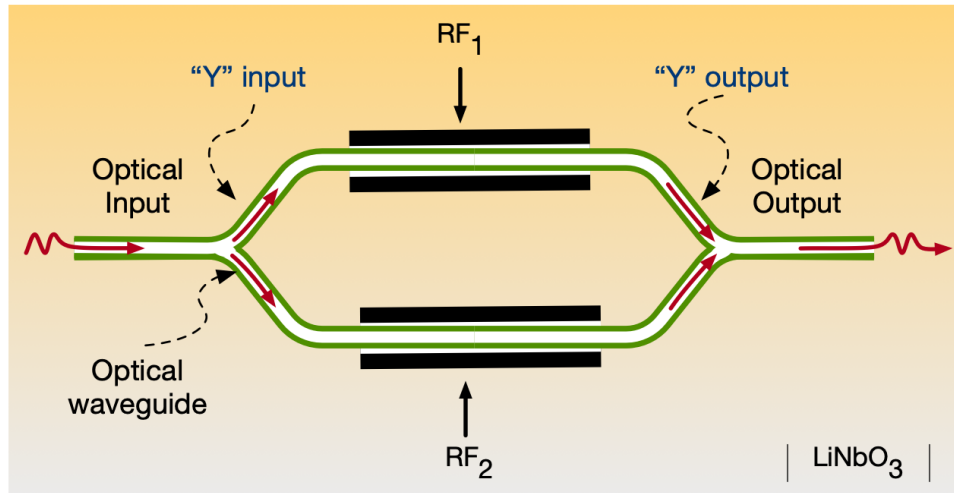


Figura 7. Diagrama del modulador Mach-Zehnder dual drive.

3.4 Configuración “dual parallel”.

La configuración básica del modulador Dual Parallel Mach-Zehnder (DPMZM), consiste en dos MZM interconectados en paralelo por entrada "Y" y salida "Y", formando una tercera arquitectura interferométrica MZ o principal, es decir, dos MZ embebidos (MZ1 y MZ2) en los brazos superior e inferior respectivamente de una arquitectura MZ principal [16] [17], como se muestra en la Figura 8.

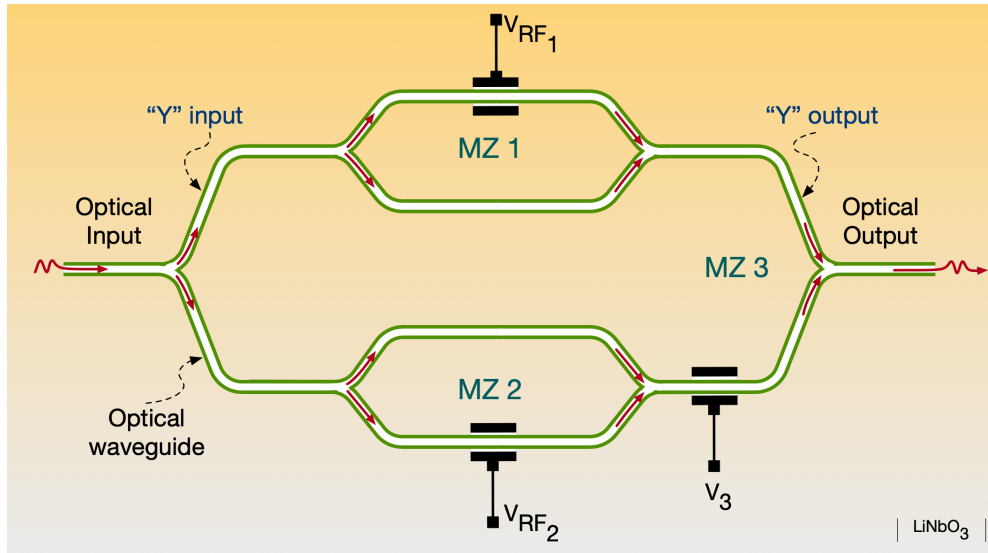


Figura 8. Diagrama del modulador Mach-Zehnder dual parallel.

4 Capítulo

Generador de pulsos monociclo con modulador Mach-Zehnder doble paralelo

4.1 El modulador doble paralelo (DPMZM).

El modulador óptico DPMZM consiste de una estructura integrada con dos moduladores Mach-Zehnder (MZ), el paralelo de MZ1 y MZ2 en cada brazo de la estructura principal que se representa por el MZ3. El voltaje de control en el MZ3 es utilizado para ajustar la diferencia de fase óptica entre MZ1 y MZ2, o dicho de otra forma, las salidas del MZ1 y MZ2 se combinan constructivamente o destructivamente por medio del voltaje de control V_{dc3} , como se observa en la Figura 9.

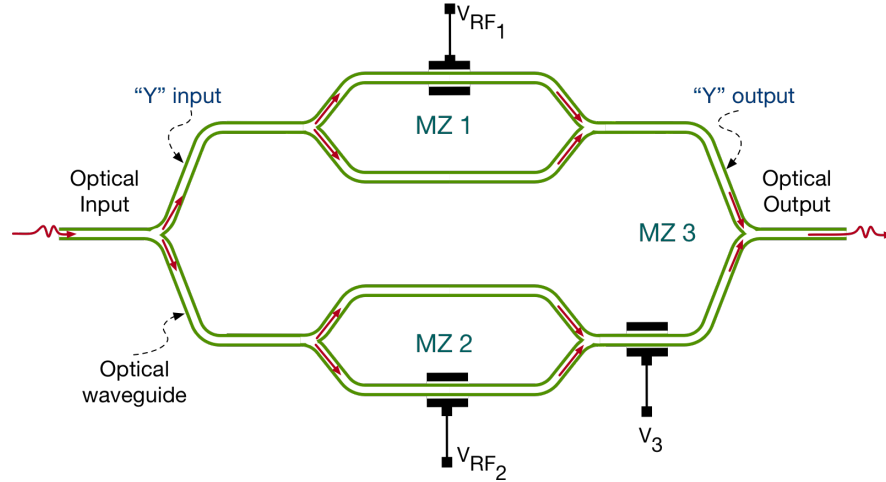


Figura 9. Arquitectura del modulador doble paralelo Mach-Zehnder (DPMZM).

Asumiendo que el campo de la fuente óptica está definido como: $E_{in}(t) = |E_0|e^{j\omega t}$ donde E_0 es la amplitud compleja del campo óptico y ω es la frecuencia angular de la portadora óptica.

Las señales eléctricas de un pulso Gaussiano ideal de $RF_{1,2}$ están expresadas como $V_{RF_{1,2}}(t) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$, que a su vez son aplicados al MZ1 y MZ2 respectivamente, donde $\frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}}$ es la amplitud máxima del pulso y σ^2 es la varianza de la función. La salida del MZ3 se puede expresar como [18]:

$$E_{out_MZ3}(t) = E_{out_MZ1} \exp\left(j \frac{\pi V_{dc3}}{2 V_{\pi3}}\right) + E_{out_MZ2} \exp\left(-j \frac{\pi V_{dc3}}{2 V_{\pi3}}\right) \quad (1)$$

donde E_{out_MZ1} y E_{out_MZ2} son la salida de los campos ópticos del MZ1 y MZ2, V_{dc3} y $V_{\pi3}$ son el voltaje de control en el MZ3 y el valor de voltaje de media onda de MZ3, respectivamente.

La salida del campo óptico en el MZ1 y MZ2 se puede expresar como:

$$E_{out_MZ1}(t) = E_{in}(t) \left[\cos \left(\beta_1 V_{RF1}(t) + \frac{\varphi_1}{2} \right) \right] \quad (2)$$

$$E_{out_MZ2}(t) = E_{in}(t) \left[\cos \left(\beta_2 V_{RF2}(t) + \frac{\varphi_2}{2} \right) \right] \quad (3)$$

donde $\beta_1 = \frac{\pi V_{RF1}}{V_{\pi 1}}$ y $\beta_2 = \frac{\pi V_{RF2}}{V_{\pi 2}}$ son los índices de modulación para MZ1 y MZ2 respectivamente. También V_{RF1} , V_{RF2} , ω_{RF1} , ω_{RF2} son la amplitud y frecuencia angular del MZ1 y MZ2 respectivamente, $V_{\pi 1,2}$ es el voltaje de media onda para cada MZ, $\varphi_1 = \frac{\pi V_{dc1}}{V_{\pi 1}}$ y $\varphi_2 = \frac{\pi V_{dc2}}{V_{\pi 2}}$, es el cambio de fase entre los dos brazos del MZ1 y MZ2 respectivamente, controlado por el voltaje de control V_{dc1} y V_{dc2} [19].

4.2 Generación del pulso

El generador de pulsos ópticos propuesto esta basado en utilizar el DPMZM como elemento principal.

Para este caso, los voltajes de control aplicados en las terminales V_{dc1} , V_{dc2} , V_{dc3} , se encargan de que un modulador esté trabajando en pendiente positiva y el otro en pendiente negativa y así es posible generar pulsos ópticos con formas invertidas, ahora se les aplica pulsos Gaussianos eléctricos debidamente sincronizados en los puertos V_{RF1} y V_{RF1} respectivamente para el MZ1 y MZ2, y en el MZ3 se realiza la combinación óptica de los dos pulsos para formar el pulso óptico monociclo, esto también está representado en la Figura 10.

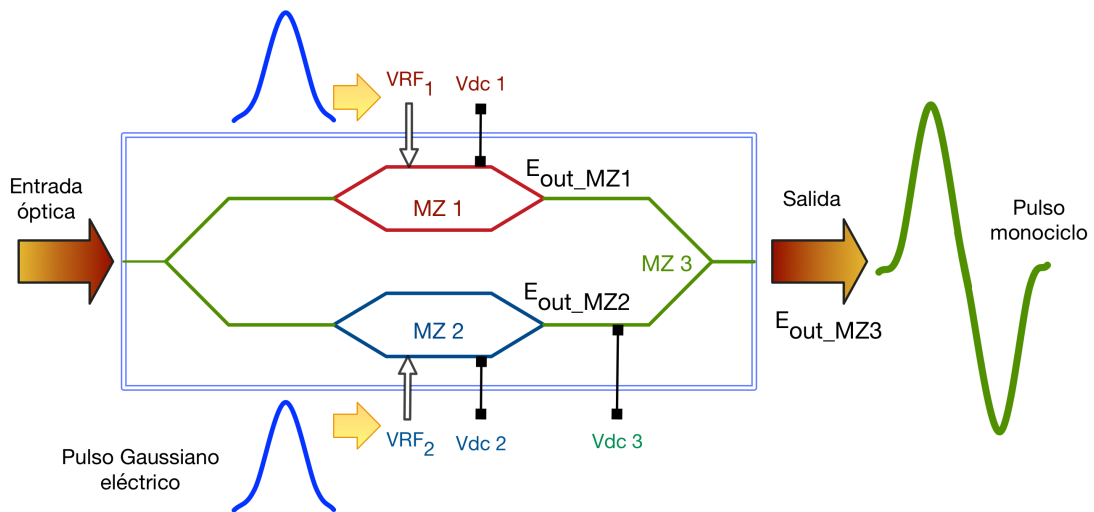


Figura 10. Diagrama de funcionamiento para generar un pulso monociclo con un DPMZM.

El principio de generación del pulso monociclo está representado en la Figura 11, donde se muestra la función de respuesta de un modulador MZ. Esta curva es la transmitancia óptica del dispositivo en función del desfase óptico inducido sobre la señal óptica. Como hemos mencionado anteriormente si introducimos un pulso Gaussiano debidamente sincronizado a las terminales de V_{RF1} y V_{RF2} del modulador óptico y se aplica un voltaje de control en las terminales V_{dc1} y V_{dc2} que coloquen al punto A y B en la zona lineal de su función de respuesta. Es posible generar un pulso negativo con la pendiente negativa de la función de respuesta del MZ1 y utilizando la pendiente positiva se logra generar un pulso positivo en el MZ2. La salida de estos dos moduladores se combinan en el MZ3 para formar un pulso Gaussiano tipo monociclo [20].

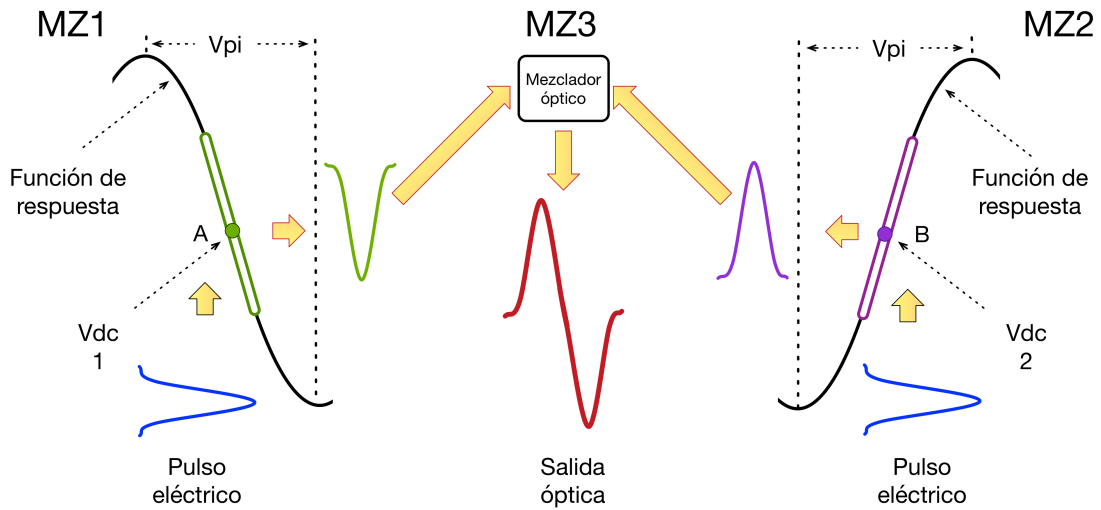


Figura 11. Principio de generación del pulso monociclo.

En la Figura 12 se muestra una imagen fotográfica del experimento realizado en laboratorio para la generación del pulso monociclo.

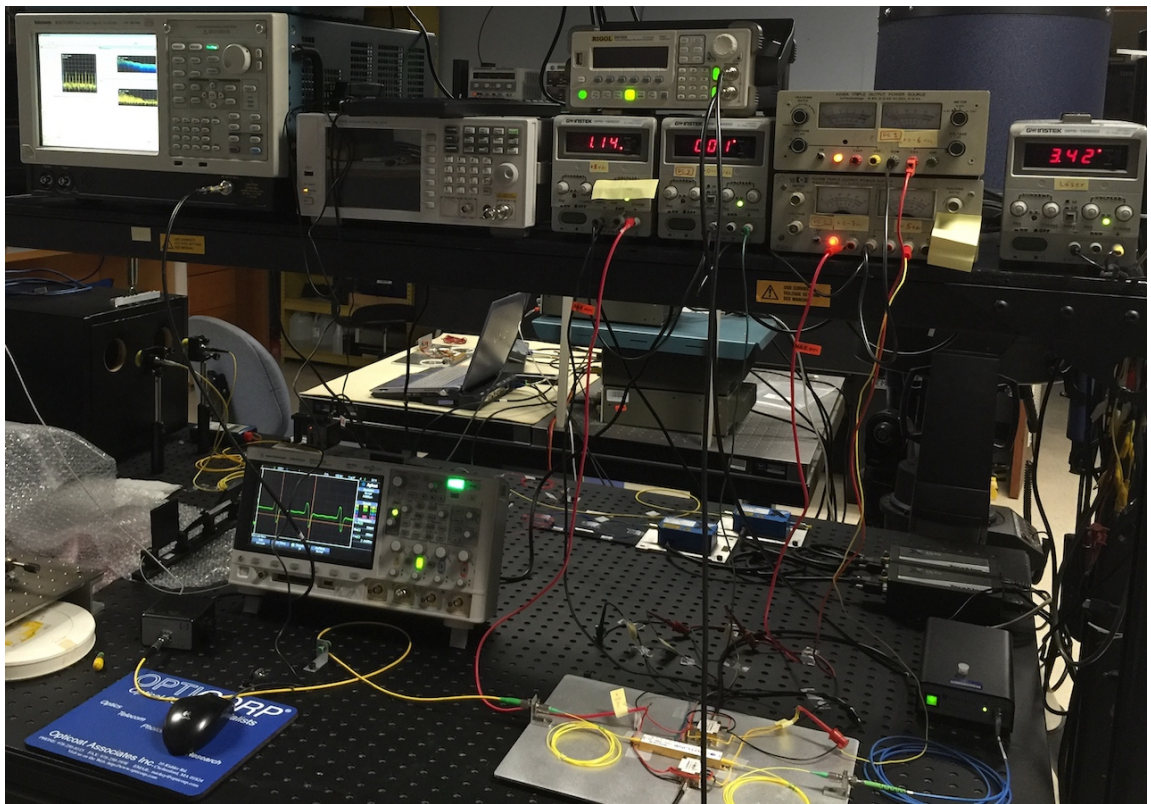


Figura 12. Fotografía del montaje experimental.

4.3 Experimento para la generación de un pulso monociclo

La primera etapa del montaje experimental propuesto se muestra en la Figura 13. Con este esquema se caracteriza cada puerto V_{RF1} y V_{RF2} , donde se conectaron generadores de funciones con señales senoidales y en los voltajes de control V_{dc1} , V_{dc2} y V_{dc3} , un barrido de voltaje de dc. Como fuente óptica se utiliza un láser emitiendo a 1550nm, que es inyectado directamente hacia el modulador DPMZM, en la salida del modulador se conecta un atenuador óptico para limitar la potencia que llega al fotorreceptor y en el osciloscopio se adquirieron las curvas de la función de respuesta de cada modulador.

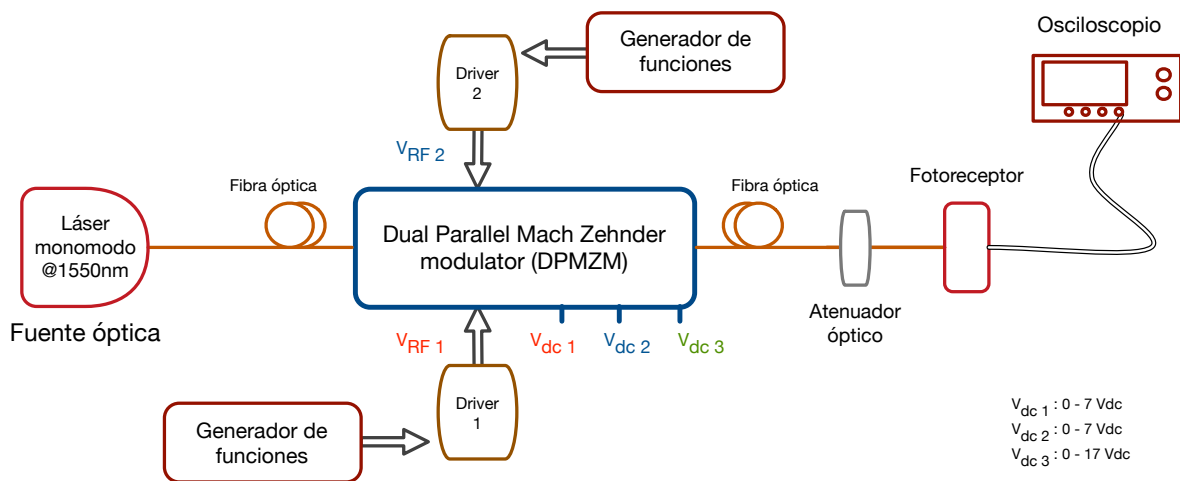


Figura 13. Esquema para caracterizar los puertos V_{RF1} , V_{RF2} y los voltajes de control V_{dc1} , V_{dc2} y V_{dc3} .

En la Tabla 4 son mostrados los valores que resultaron mediante los experimentos para los puertos V_{RF1} y V_{RF2} . Se determina que los voltajes de control V_{dc1} , V_{dc2} y V_{dc3} adecuados para colocar el punto de operación en la región lineal y con pendiente negativa en la curva de

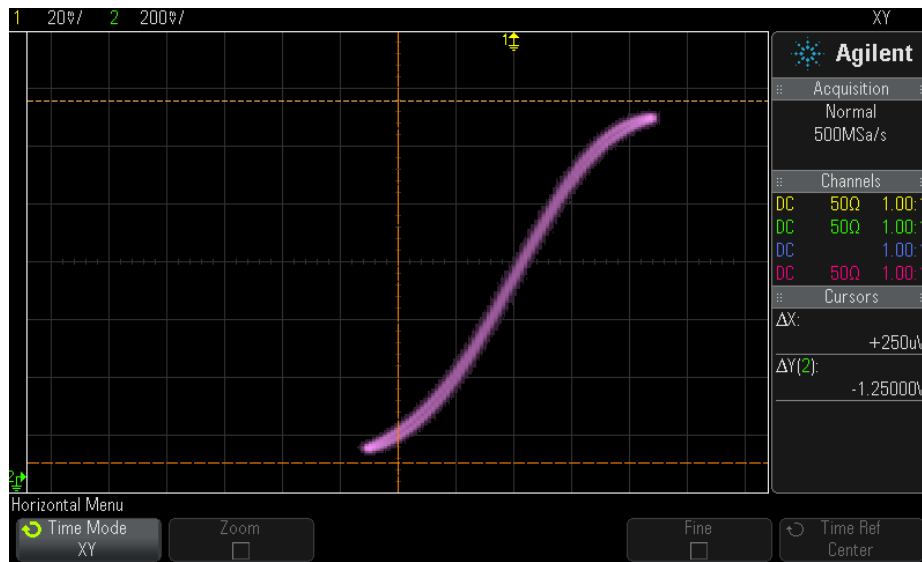
respuesta del modulador del MZ1 (Figura 14-a). De igual manera a partir de los resultados experimentales para el puerto V_{RF2} , se determinan los voltajes de control V_{dc1} , V_{dc2} y V_{dc3} adecuados para colocar el punto de operación en la región lineal y con pendiente positiva en la curva de respuesta del modulador MZ2 (Figura 14-b).

Tabla 4. Resultados para el puerto V_{RF2} .

Para V_{RF1}	Valor	Para V_{RF2}	Valor
$V_{dc1} =$	6 V	$V_{dc1} =$	6 V
$V_{dc2} =$	1 V	$V_{dc2} =$	3.13 V
$V_{dc3} =$	0.74 V	$V_{dc3} =$	3.21 V
Salida del generador:	800 mVpp @ 1MHz	Salida del generador:	300 mVpp @ 1MHz
Máximo =	1.15 V (-13.79 dBm)	Máximo =	1.3 V (-13.18 dBm)
Mínimo =	90 mV (-26.43 dBm)	Mínimo =	50 mV (-31.3 dBm)
Extinción =	12.64 dB	Extinción =	18.12 dB



a)



b)

Figura 14. a) curva de respuesta del MZ1, b) curva de respuesta para el MZ2.

4.4 Generación del pulso monociclo de manera experimental

Conociendo el modo de funcionamiento del DPMZM por la caracterización anteriormente mencionada, se propone el montaje experimental de la Figura 15 para generar un pulso Gaussiano monociclo.

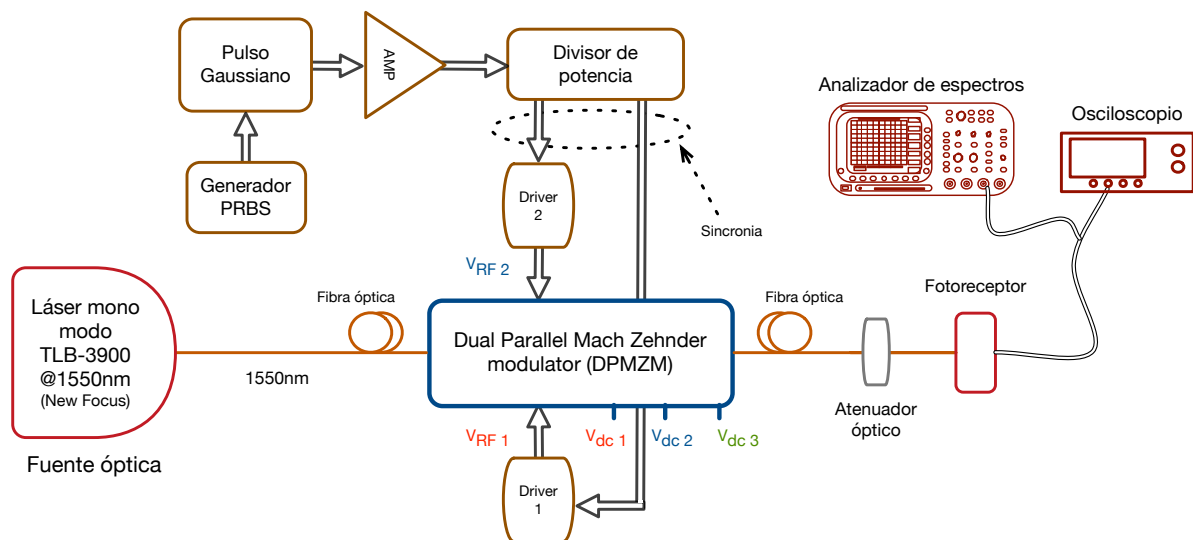
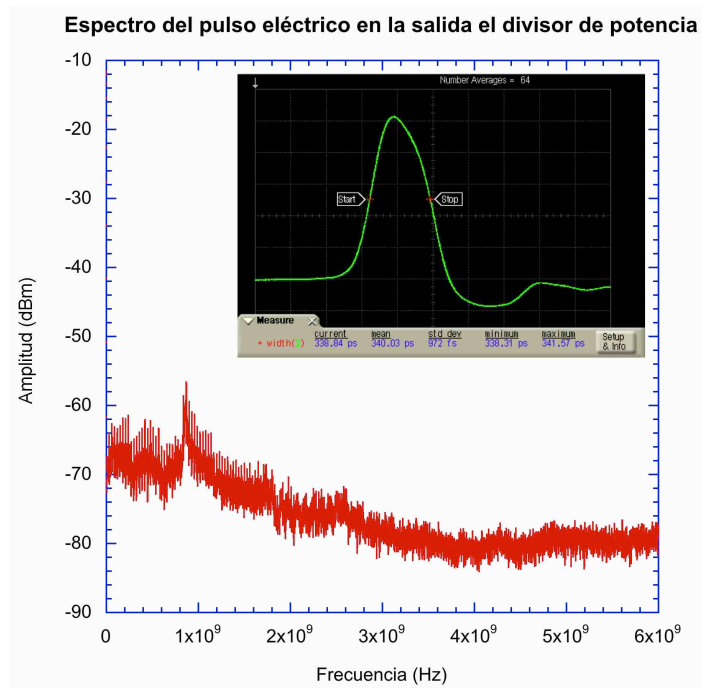


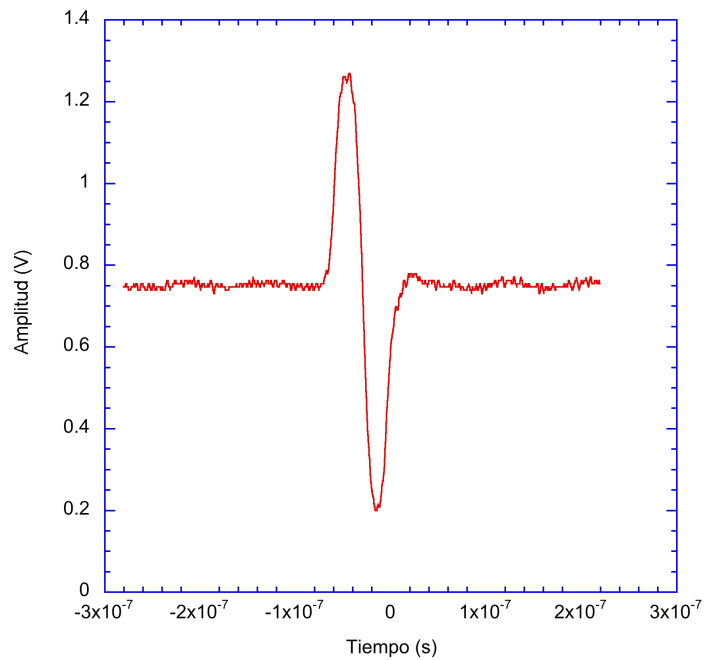
Figura 15. Esquema del montaje experimental para generar el pulso óptico monociclo.

En el montaje experimental implementado, nuevamente tenemos algunos de los elementos del montaje anterior (Figura 13), sumándole un generador de secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS), un pulso Gaussiano eléctrico (Figura 16), un amplificador de RF, un divisor de potencia y para la captura se utilizó un analizador de espectros Tektronix RSA5126B con un rango de frecuencia de 1Hz – 26.5GHz¹.

¹, Agradecemos a Tektronix Inc. por el préstamo del analizador de espectros eléctrico para la realización de este trabajo.



a)

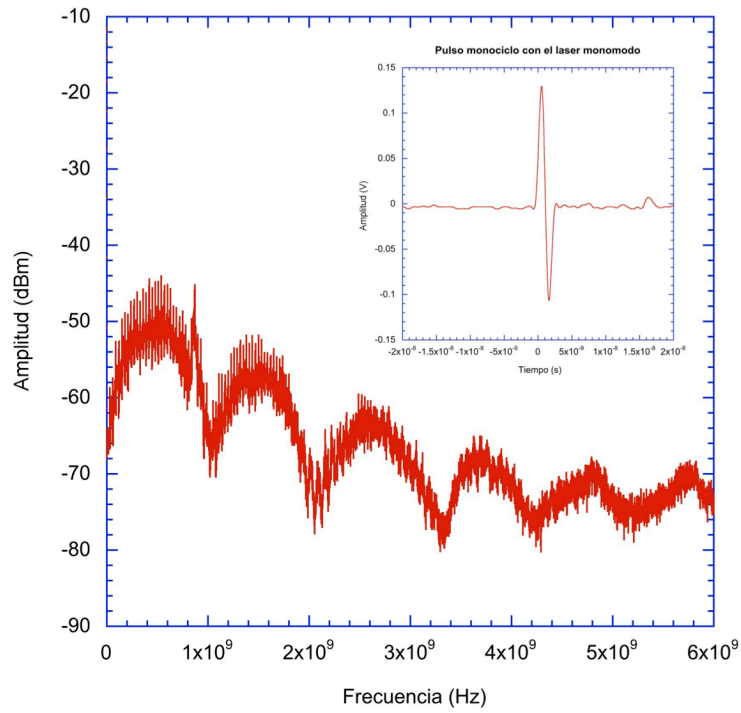


b)

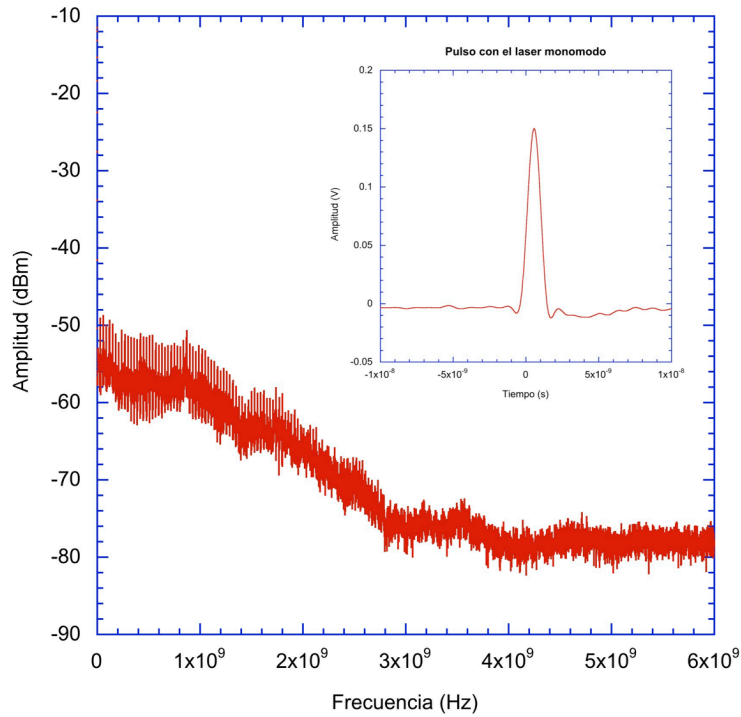
Figura 16. a) Espectro del pulso eléctrico en la salida del divisor de potencia y su forma de onda, b) pulso monociclo generado ópticamente.

Realizando lo anterior se configura el generador PRBS con un patrón de salida de $2^{17} - 1$ bits a una frecuencia de reloj de 30MHz, el pulso eléctrico tiene 3GHz de ancho espectral y es necesario sincronizar los pulsos eléctricos en los dos puertos V_{RF1} y V_{RF2} y se ajustan los voltajes de control V_{dc1} , V_{dc2} y V_{dc3} , para generar un solo pulso o el pulso monociclo, utilizando un láser monomodo de 1550nm de longitud de onda con 20 mW de potencia óptica.

Podemos observar que la forma de onda y el espectro en frecuencia del pulso eléctrico (Figura 16-a) no es puramente Gaussiano y por medio de este generador de pulsos ópticos se puede generar un solo pulso mejorando su forma de onda y su espectro, en la Figura 17-b se ve el corte bien definido a los 3GHz de frecuencia cuando es generado un solo pulso óptico.



a) El pulso monociclo y su espectro en frecuencia



b) Un pulso

Figura 17. a) Espectro del pulso óptico monociclo y su forma de onda, b) Espectro de un solo pulso óptico y su forma de onda.

En la Figura 17-a se observan los resultados experimentales de la generación fotónica del pulso monociclo, se observa su espectro en frecuencia y su forma de onda, la forma de onda está balanceada en amplitud y en el espectro se observa un corrimiento en frecuencia alejándose de la componente de dc.

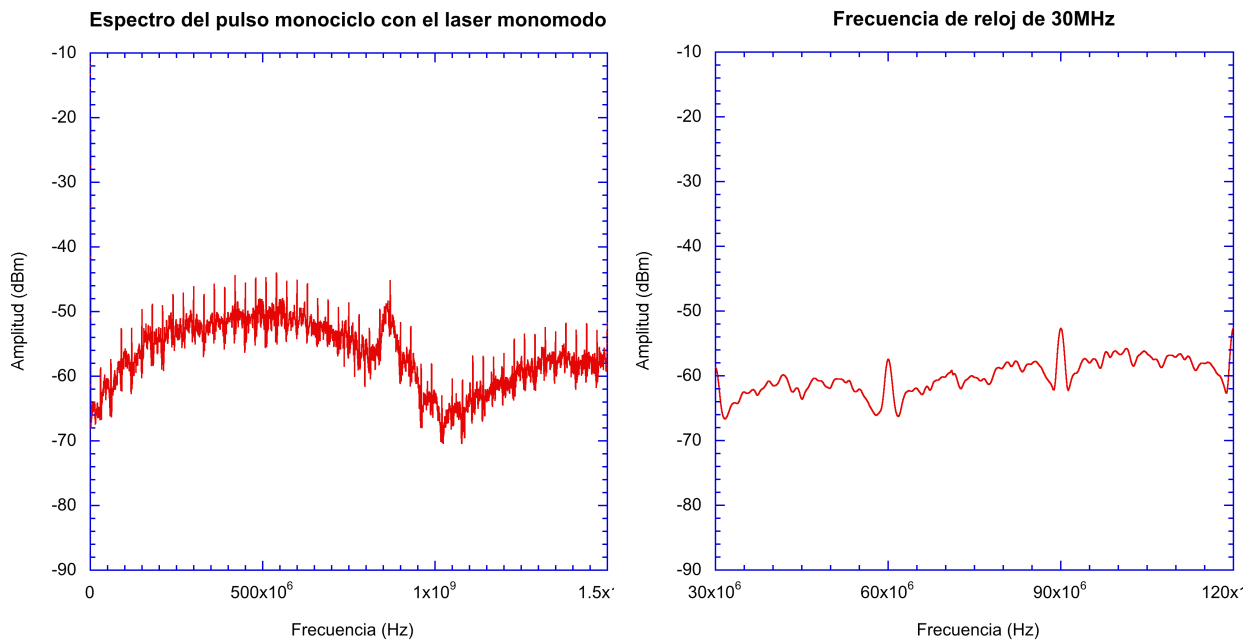
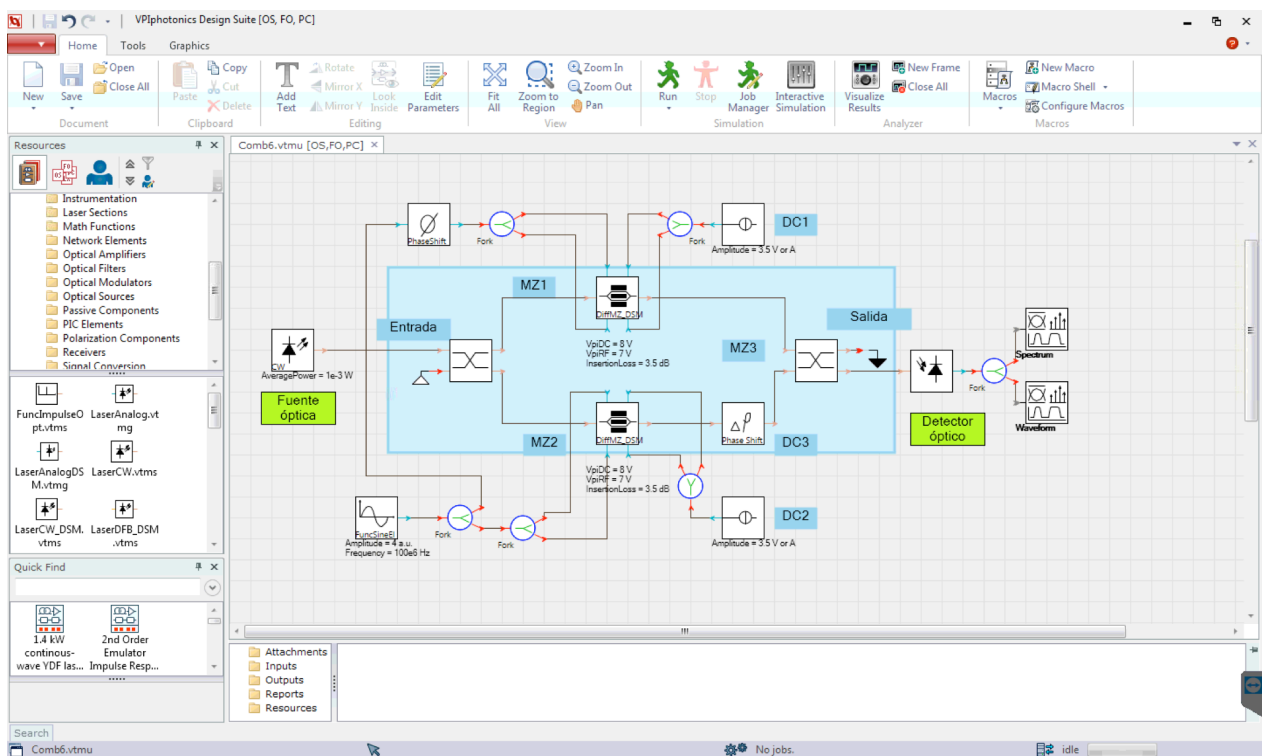


Figura 18. Acercamientos al espectro del pulso óptico monociclo de la Figura 17-a.

En la Figura 18 se muestran acercamientos del espectro del monociclo donde se ve la presencia de la frecuencia de reloj del generador PRBS cada 30MHz del espectro del pulso monociclo.

4.5 Utilizando un modulador doble paralelo (DMZM) en simulador.

Con la herramienta de simulación VPI Photonics, se desarrolló un esquema utilizando un modulador doble paralelo (DPMZM) para generar forma de onda triangular, utilizando un laser monomodo.



La señal generada por este esquema está representada en la Figura 19, la forma de onda triangular con su espectro en frecuencia ausente de armónicos par.

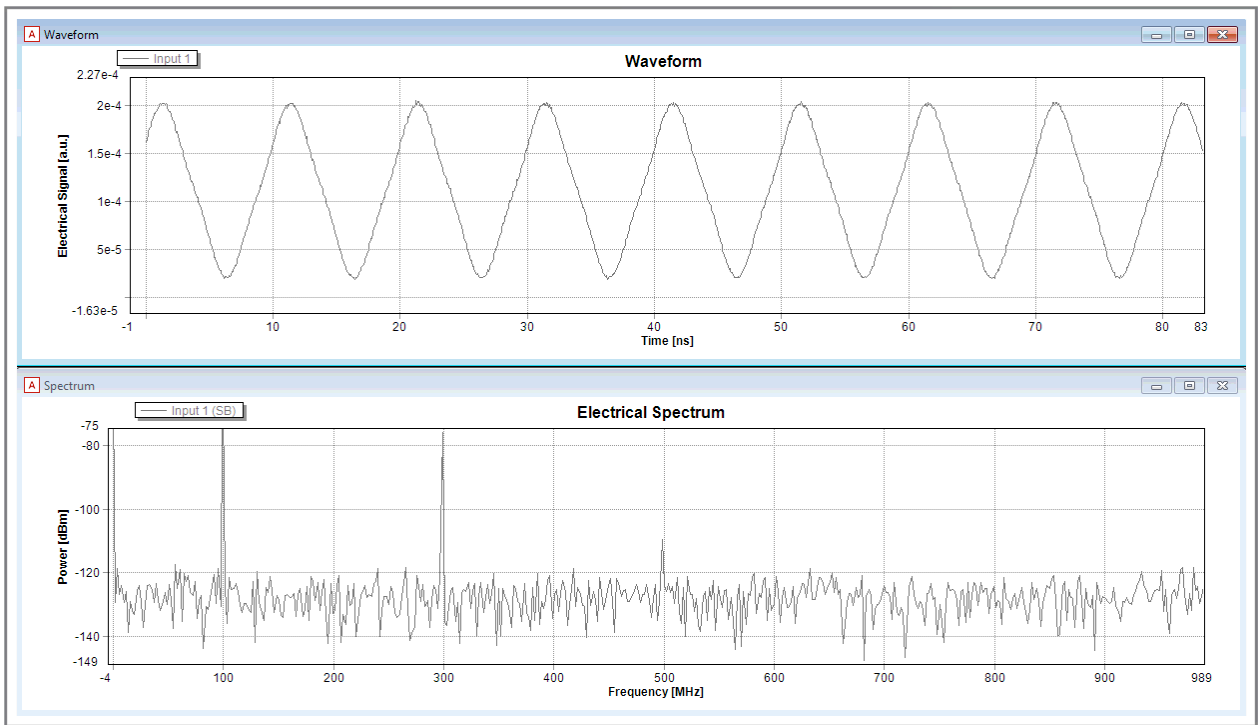


Figura 19. Forma de onda triangular generada con un esquema con un DPMZM.

5 Capítulo

Generador de forma de onda triangular con una fuente de amplio espectro y un modulador SDMZM.

Con este esquema fotónico es posible generar pulsos ópticos con forma de onda triangular utilizando una fuente de baja coherencia, modulada a partir de una sola señal senoidal de radio frecuencia como oscilador local (OL) y con la sintonización de un filtro rechaza-banda (notch) para eliminar el segundo armónico de las componentes espectrales generadas, debido a que una onda triangular solo consiste de armónicos de orden impar. No se requiere de ajustes en las variables del esquema como el voltaje de media onda del modulador, amplitud del OL, solo es necesario variaciones en la línea de retardo para obtener la forma de onda triangular. El esquema propuesto esta desarrollado en un ambiente de simulación y constituido de elementos ópticos y optoelectrónicos con parámetros de dispositivos de tipo comercial. Se obtienen buenos resultados para señales de forma de onda triangular a la salida del detector con frecuencias de pulso de [100, 150, 250 y 300] MHz.

5.1 Principio de operación

La Figura 20 muestra el diagrama de bloques de un filtro fotónico típico para señales de radiofrecuencia o microondas, compuesto por cuatro bloques: la fuente óptica, el modulador electro-óptico, los elementos fotónicos y el fotorreceptor. El filtrado fotónico tiene ciertas ventajas sobre los totalmente electrónicos, como la inmunidad electromagnética, la reconfigurabilidad, la capacidad de sintonización, entre otras [21].

En la Figura 20, una señal de entrada $V_{RF}(t)$ que modula la señal óptica de onda continua $E_{CW}(t)$. Podemos realizar la modulación óptica a través de diferentes configuraciones de arquitectura utilizando una fuente de frecuencia única o de amplio espectro. Dichas estructuras consisten en un modulador electro-óptico combinado con elementos fotónicos como acopladores, líneas de retardo óptico, amplificadores de fibra óptica, amplificadores ópticos semiconductores, etc. La señal óptica resultante se detecta para obtener una señal eléctrica de RF utilizando el receptor obteniendo una señal de salida $V_{out}(t)$.

La señal de RF eléctrica es $V_{RF}(t) = V_{in} \cos(2\pi f_{RF}t)$, donde V_{in} indica la amplitud y f_{RF} la frecuencia de la señal de RF respectivamente. El $E_{CW}(t) = E_{CW_0} e^{j2\pi\nu_0 t}$ es el campo óptico de la fuente óptica, donde E_{CW_0} es la amplitud y $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}$ la frecuencia óptica, c la velocidad de la luz, λ_0 la longitud de onda, y finalmente $E_m(t)$ es la fuente óptica modulada.

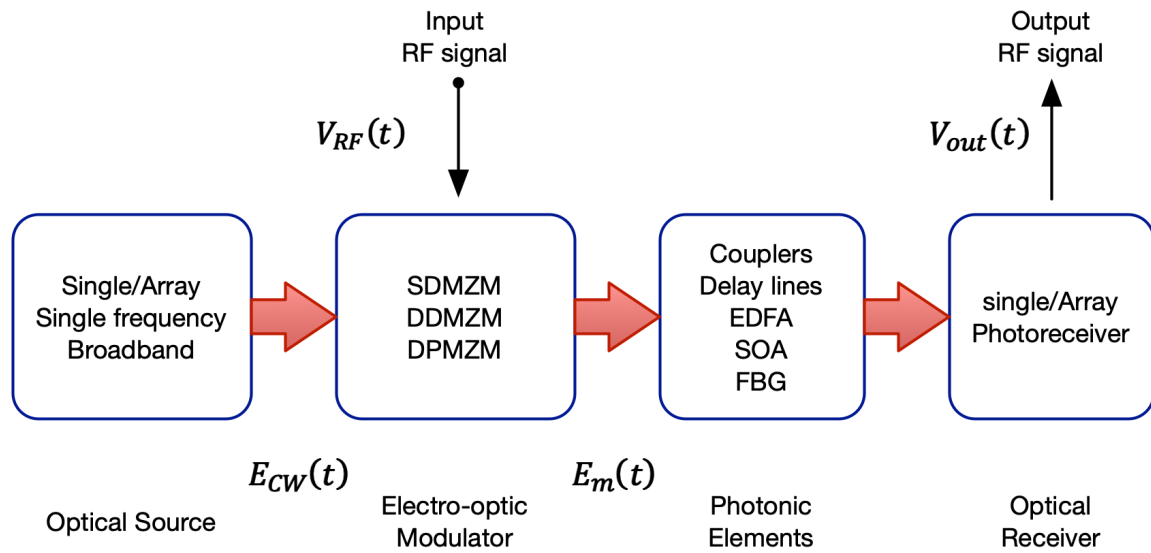


Figura 20. Esquema a bloques típico de un filtro fotónico de señales de RF.

Para este caso implementamos el filtro fotónico con la configuración que se muestra en la Figura 21. El cual consiste de una fuente de amplio espectro $E_{CW}(t)$, un modulador electro-óptico con retardadores ópticos y acopladores y finalmente el foto-receptor.

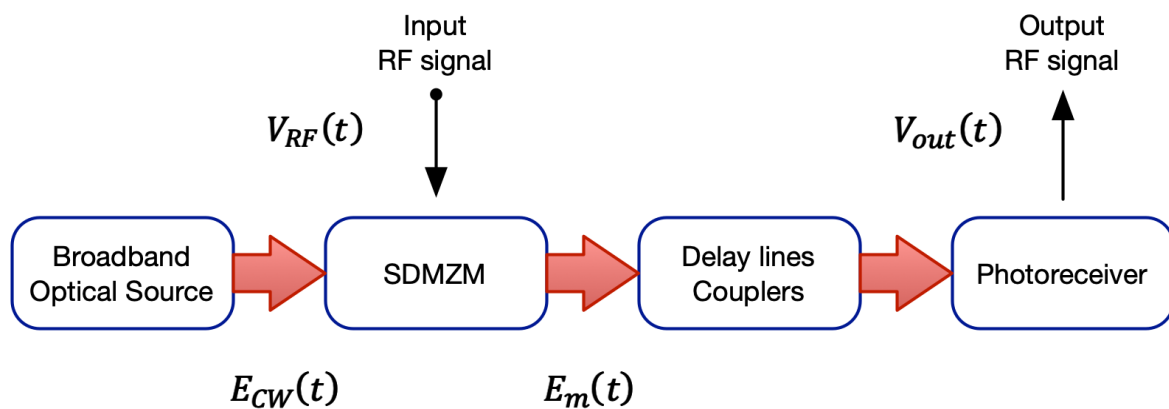


Figura 21. Esquema a bloques del esquema propuesto.

5.2 Generación fotónica de forma de onda triangular

Como sabemos por el análisis de Fourier, una onda triangular solo consta de armónicos de orden impar (1). Por lo tanto, debemos suprimir cualquier armónico de orden par, usando un filtro-notch fotónico y sintonizándolo con la línea de retardo, la configuración del esquema se muestra en la Figura 22.

La serie de Fourier para una forma de onda triangular viene dada por [22]:

$$T_{tr}(t) = DC + \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{k^2} \cos k\omega t \quad (1)$$

Donde DC es constante, ω es la frecuencia angular fundamental y k es el armónico de la serie, donde solo están presentes los armónicos impares y pueden aproximarse mediante un número finito de componentes de la serie de Fourier.

Estrictamente hablando, la serie de Fourier de una forma de onda triangular es infinita, pero para aplicaciones prácticas, dicha onda se puede obtener con solo dos armónicos [22] porque los armónicos de mayor frecuencia son de amplitud mínima (*change with $\frac{1}{k^2}$*) y no tienen una contribución significativa a la forma de onda final. Por lo tanto, la serie de Fourier se puede simplificar como:

$$T_{tr}(t) = DC + \cos(\omega t) + \frac{1}{9} \cos(3\omega t) \quad (2)$$

Con base en el diagrama de bloques de la Figura 21, implementamos el sistema que se muestra en la Figura 22 para generar señales con una forma de onda triangular.

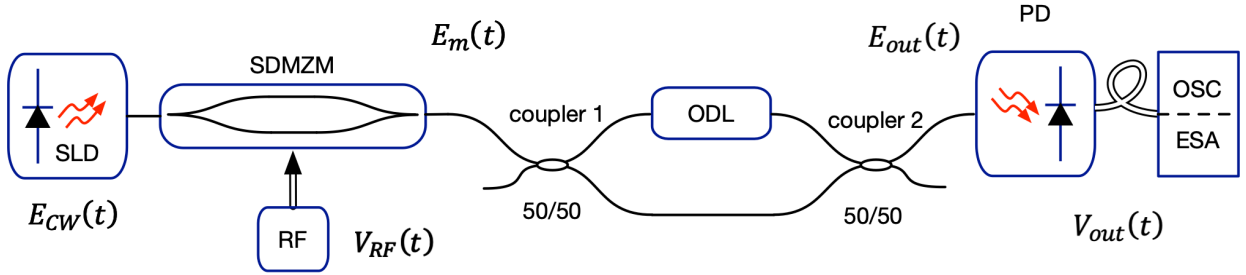


Figura 22. Diagrama esquemático del generador de forma de onda triangular (SLD: diodo superluminiscente; SDMZM: modulador electro-óptico; RF: Oscilador local; ODL: línea de retardo óptico; PD: fotodetector, OSC: osciloscopio, ESA: Analizador de espectros eléctrico).

La portadora óptica $E_{CW}(t)$ (ecuación 3) consta de un diodo superluminiscente (SLD) cuya radiación se introduce en el modulador electro-óptico (SDMZM) impulsado por una señal de RF senoidal $V_{RF}(t)$ (oscilador local (LO), ecuación 4).

$$E_{CW}(t) = E_{CW_0} e^{j2\pi\nu_0 t} \quad (3)$$

$$V_{RF}(t) = V_{in} \cos(2\pi f_{RF} t) \quad (4)$$

Dividimos la señal óptica $E_m(t)$ (ecuación 5) usando el acoplador-1 de 3 dB, y luego se inserta una línea de retardo variable (ODL) en un brazo del acoplador-1.

$$E_m(t) = E_{CW_0} e^{j2\pi\nu_0 t} \cdot \cos \left[m_1 \cos(2\pi f_{RF} t) + \frac{\theta}{2} \right] \quad (5)$$

siendo $m_I = \frac{\pi v_0}{V_\pi}$ el índice de modulación, V_π el voltaje de media onda del modulador de intensidad Mach-Zehnder (MZIM) y $\theta = \frac{\pi V_{DC}}{V_\pi}$, siendo la fase relativa entre las dos ramas y V_{DC} el voltaje de polarización de cc de MZIM respectivamente.

Ambas salidas del acoplador-1 ($E_m(t - \tau)$ and $E_m(t)$) ingresan al acoplador-2 obteniendo la señal $E_{out}(t)$, ecuación 6, τ_{ODL} es el retardo óptico.

$$E_{out}(t) = \frac{E_m(t)}{\sqrt{2}} + \frac{E_m(t-\tau_{ODL})}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

Usamos una de las salidas del acoplador-2 para obtener una onda eléctrica $i(t)$ de la ecuación 7, a través del fotodetector (PD), donde \Re es la responsividad del PD y * indica el complejo conjugado.

$$i(t) = \frac{\Re}{2} [E_m^2(t) + E_m^2(t - \tau) + E_m^*(t)E_m(t - \tau) + E_m(t)E_m^*(t - \tau)] \quad (7)$$

Para un valor constante de θ , los dos primeros términos de la ecuación 7 son constantes y corresponden al término de CC de la ecuación (1) y, como se mencionó anteriormente, para obtener la señal de onda triangular eléctrica deseada, debemos eliminar los componentes espectrales par no deseados que aparecen. después de la fotodetección.

Siguiendo con la ecuación 7, los términos de CC,

$$\langle |E_m|^2 \rangle = \langle |E_m(t - \tau)|^2 \rangle = m_I^2 E_{CW}^2,$$

$\langle \cdot \rangle =$ tiempo promedio

El termino de interferencia:

$$2\langle E_m(t)E_m(t - \tau) \rangle = \langle 2E_{CW_0}^2 E_I^2 \Re\{exp[j2\pi\nu_0\tau]exp[-j2\pi f_{RF}\tau]\} \rangle,$$

$\Re =$ parte real

Por lo tanto, la corriente:

$$i(t) = \langle \Re E_{CW_0}^2 m_I^2 [1 + \Re\{exp[j2\pi(\nu_0 - f_{RF})\tau]\}] \rangle$$

$$i(t) = \Re E_{CW_0}^2 m_I^2 [1 + \cos(2\pi(\nu_0 - f_{RF})\tau)] \quad (8)$$

Para un f_{RF} dado, se elige el retardo interferométrico τ para cancelar las componentes espectrales pares.

5.3 Simulación

Como nuestro objetivo es implementar nuestro esquema en el futuro en el laboratorio, utilizamos parámetros de componentes físicos (ver Tabla 5) para obtener resultados que serán útiles para nuestras implementaciones experimentales. Utilizando la herramienta de simulación de comunicaciones ópticas ampliamente reconocida VPI Photonics Maker.

Tabla 5. Especificaciones técnicas de los componentes comerciales definidos en la simulación.

Componente	Modelo y especificaciones
SLD	Exalos EXS1510 3dB-BW = 64nm
SDMZM	RAMAR 202-PM15 BW = 1GHz
ODL	Combinando fibra óptica y espacio libre
PD	DET08CFC BW = 5GHz

El diagrama de la Figura 23 representa los bloques utilizados en el simulador; las flechas en rojo son señales ópticas y las azules son señales eléctricas. El selector de señal pasará una frecuencia a la vez con su correspondiente retardo para ser detectada y observada en los analizadores de señal.

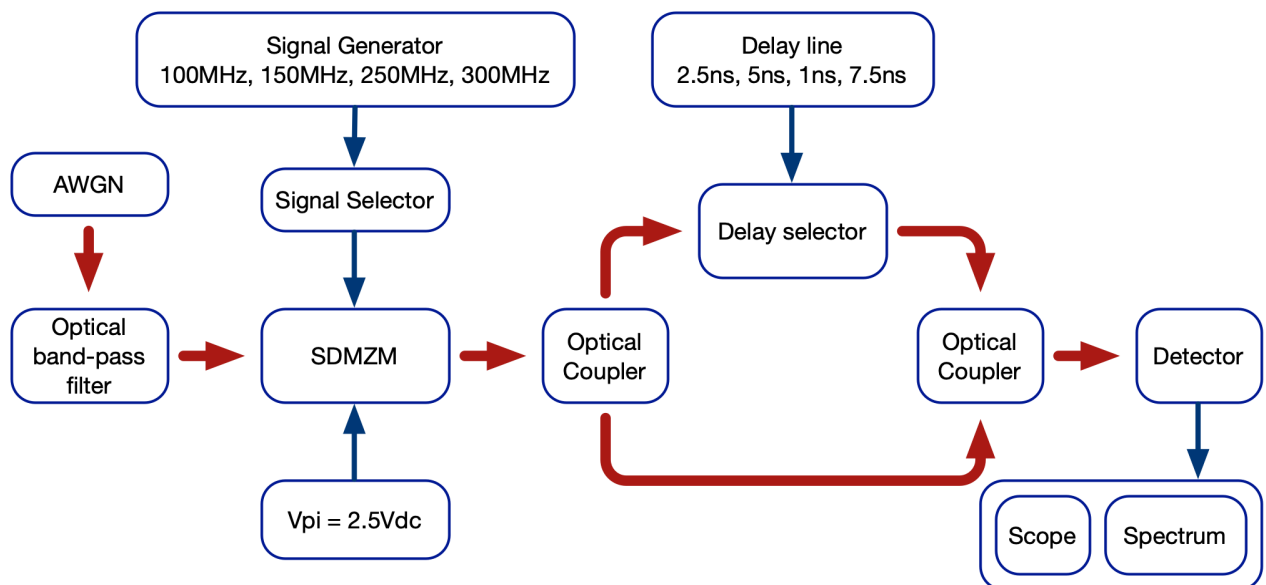


Figura 23. Diagrama esquemático de simulación, AWGN: Generador de ruido blanco Gaussiano aditivo, SDMZM: Modulador Mach-Zehnder.

Modulamos la fuente óptica a través del SDMZM con una señal senoidal de 100 MHz, 150 MHz, 250 MHz y 300 MHz en el puerto RF con una amplitud de 1,2 V, y fijamos el voltaje de media onda para el modulador en 2,5 Vdc . Además, los valores de retardo de 2,5 ns, 5 ns, 1 ns, 7,5 ns, respectivamente, se seleccionan para eliminar el segundo armónico generado por cada frecuencia del oscilador local.

La fuente óptica de baja coherencia consta de un diodo emisor de luz superluminiscente (SLED) que emite en onda continua (CW) y está centrado en 1553,6 nm con un espectro de emisión espontánea amplificado como se muestra en la Figura 24 y un ancho de banda de 3 dB de 64,5 nm.

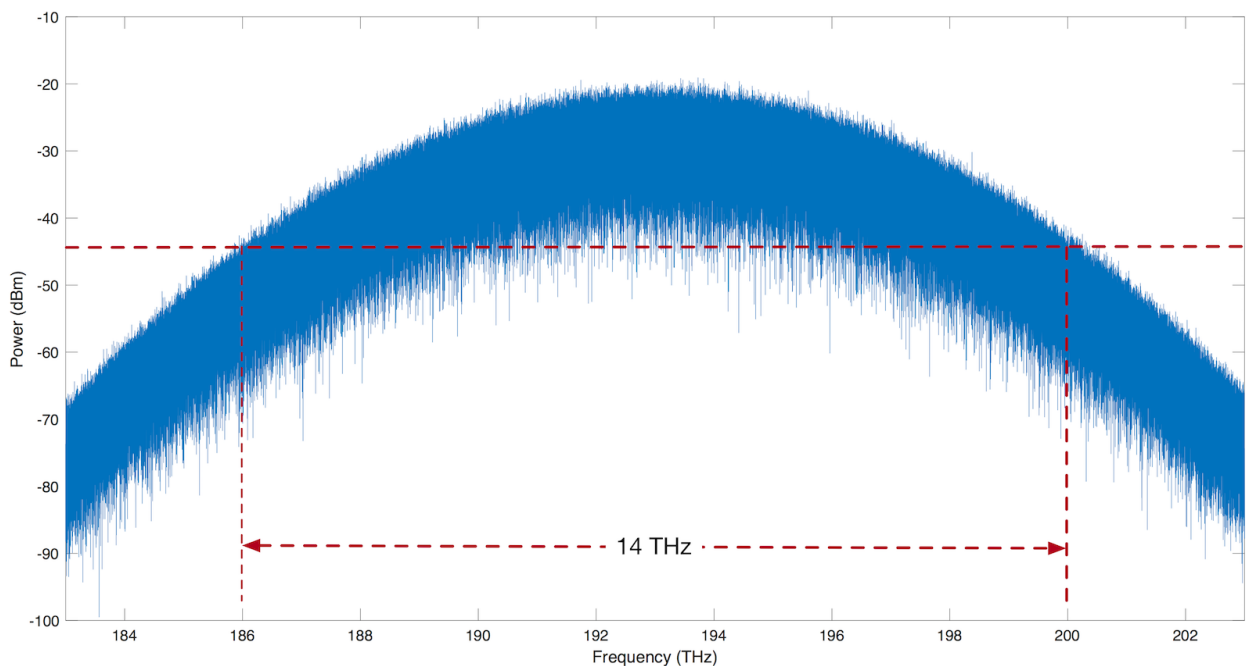


Figura 24. Espectro de la fuente óptica.

5.4 Resultados

Al puerto RF se le aplica una señal senoidal de 100 MHz, la cual al pasar por el esquema propuesto y al ser detectada, muestra la forma de onda y su espectro eléctrico como se muestra en la Figura 25 (a, b); en la Figura 25 (c), se observa el filtro fotónico con la línea de retardo en 0,5 ns.

La relación de potencia entre el primer y el tercer armónico es de 19,4 dB, que se acerca al valor teórico de 19,08 dB [23]; esta diferencia se debe al ancho de banda del filtro Notch.

Generamos la forma de onda triangular suprimiendo el segundo armónico con el filtro Notch a 200 MHz como frecuencia central y un ancho de banda de 50 MHz y una tasa de extinción de 40 dB, como se ve en la Figura 25 (f).

Cuando el oscilador local tiene una frecuencia de 150 MHz, la línea de retardo recibe un valor de 5 ns; a 250 MHz, el retraso es de 1 ns y a 300 MHz, el retraso es de 7,5 ns.

Con estos valores de retardo, se coloca el filtro para eliminar la segunda componente espectral, es decir, la componente de 300MHz, 500MHz y 600MHz, respectivamente, para formar la onda triangular, su espectro y el filtro de muesca, como se ve en la Figura 26. (d, e, f), Figura 27 (d, e, f) y Figura 28 (d, e, f) respectivamente.

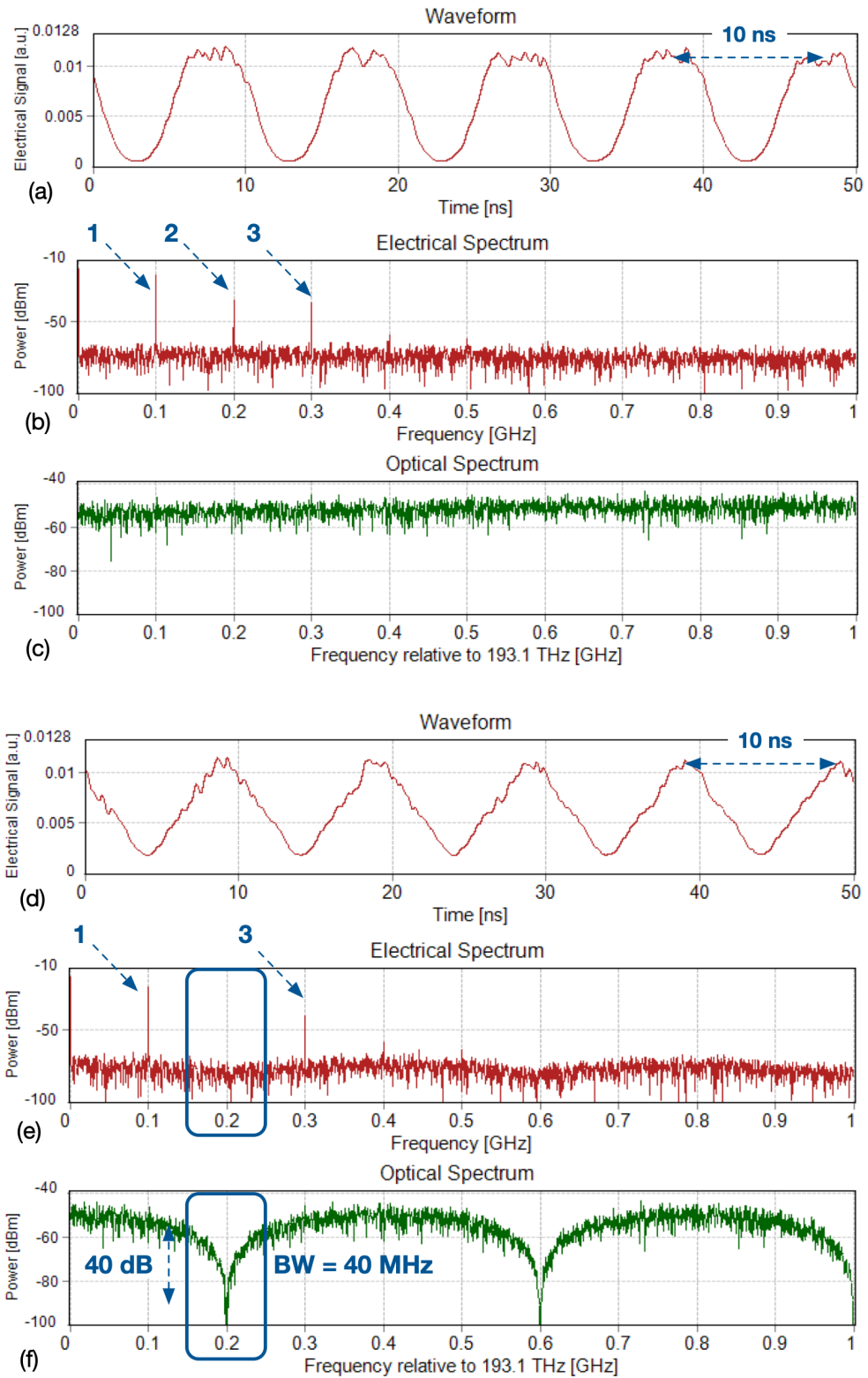


Figura 25. Con OL a 100MHz con retardo de 0.5 ns [(a) forma de onda de 100-MHz, (b) espectro eléctrico, (c) filtro fotónico], y retardo de 2.5 ns [(d) forma de onda triangular de 100-MHz, (e) espectro eléctrico y (f) filtro fotónico].

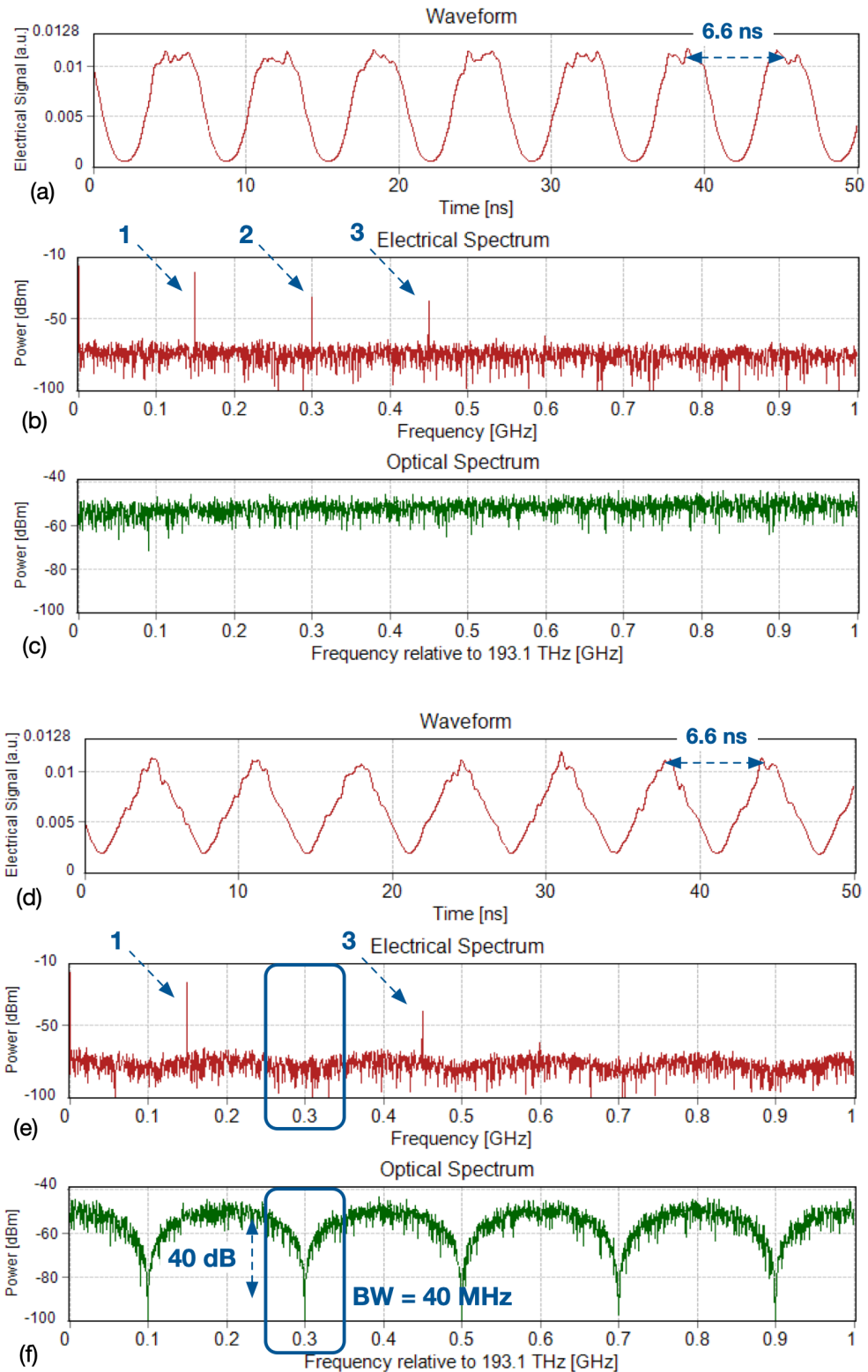


Figura 26. Con OL a 150MHz con retardo de 0.5 ns [(a) forma de onda, (b) espectro eléctrico, (c) filtro fotónico], y con retardo de 5 ns [(d) forma de onda triangular de 150-MHz, (e) espectro eléctrico y (f) filtro fotónico].

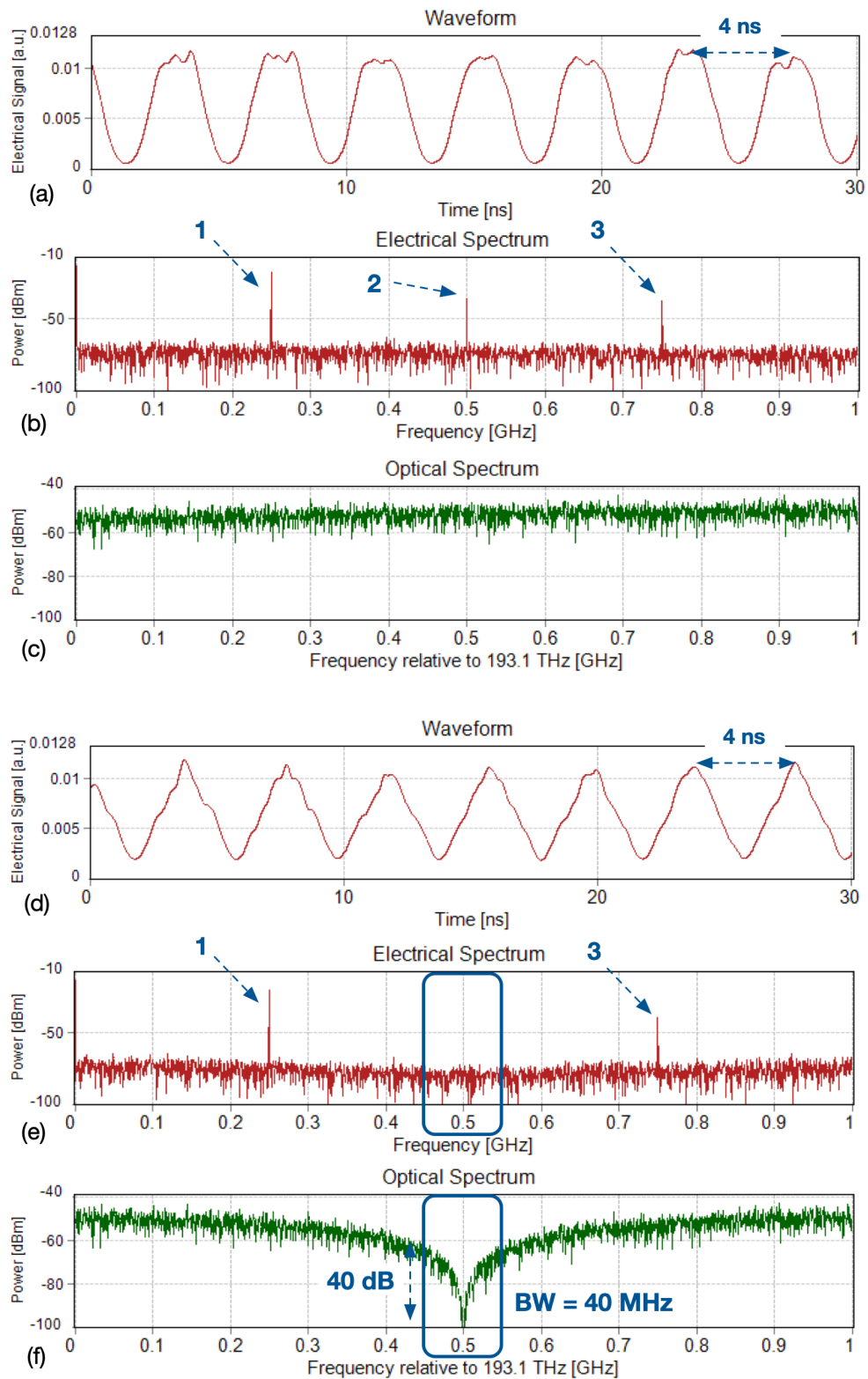


Figura 27. Con OL a 250MHz con retardo de 0.5 ns [(a) forma de onda, (b) espectro eléctrico, (c) filtro fotónico], y con retardo de 1ns [(d) forma de onda triangular de 250-MHz, (e) espectro eléctrico y (f) filtro fotónico].

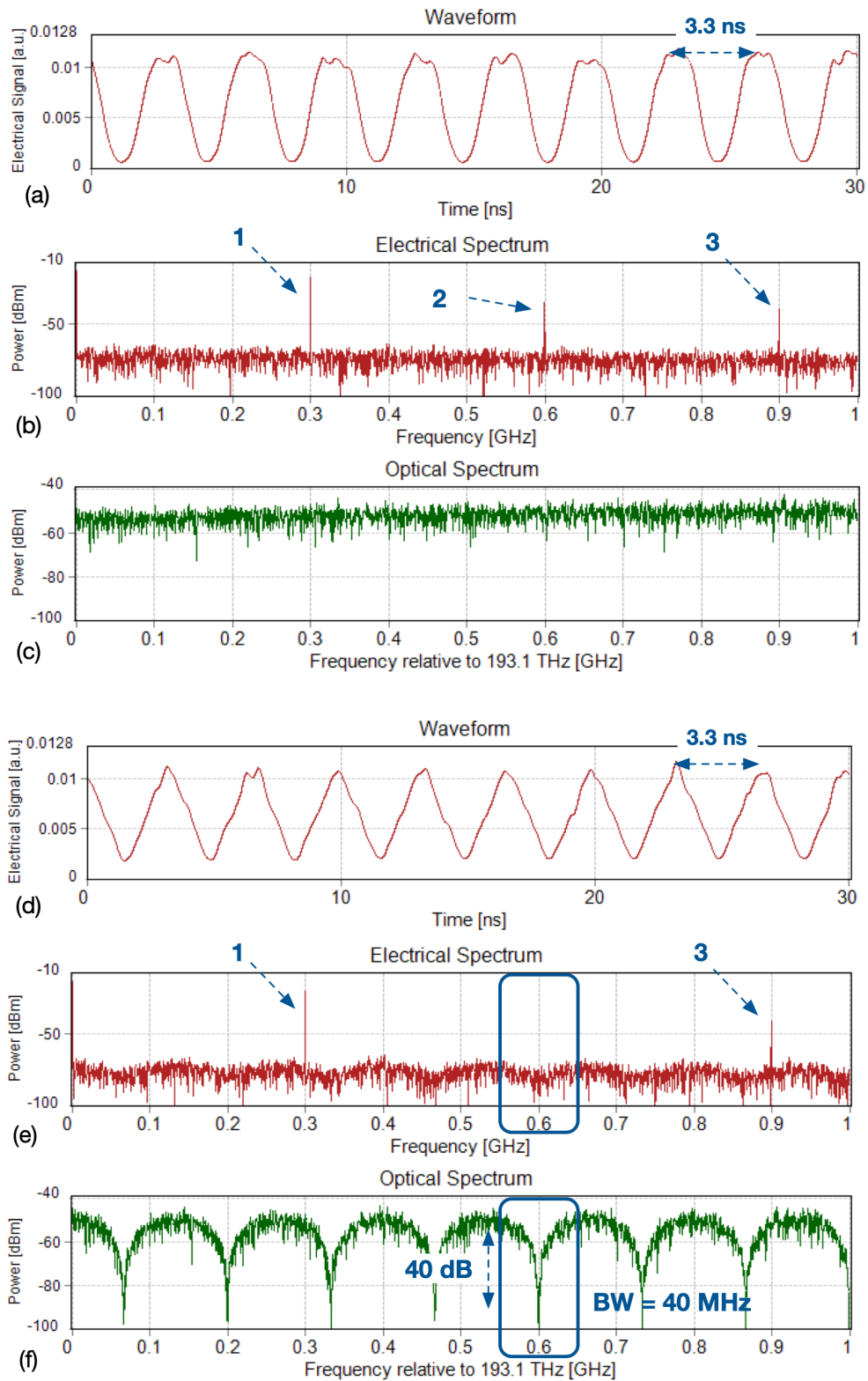


Figura 28. Con OL a 300MHz con retardo de 0.5 ns [(a) forma de onda, (b) espectro eléctrico, (c) filtro fotónico], y con retardo 7.5 ns [(d) forma de onda triangular de 300-MHz, (e) espectro eléctrico y (f) filtro fotónico].

6 Capítulo

Conclusiones y trabajo futuro

En el presente trabajo abordamos el desarrollo de un generador fotónico de onda triangular, el cual elegimos debido a su variedad de aplicaciones además de que al tener un borde lineal ascendente y descendente en cuanto a su intensidad óptica, presentará ventajas importantes sobre cualquier otra forma de onda, por ejemplo, sobre una senoidal, entre otras.

La implementación de generadores fotónicos se basa principalmente en el uso de moduladores electro-ópticos de Niobato de Litio (LiNbO_3) para su eficiente operación en longitudes de onda de telecomunicaciones y con una relativa simplicidad de manejo en sus voltajes de corriente continua y parámetros de señal de radiofrecuencia (RF).

En particular, para implementar generadores de onda triangular basada en moduladores electro-ópticos, se han propuesto diferentes estructuras empleando ya sea un modulador Mach-Zehnder con un solo manejador (SD-MZM), un modulador Mach-Zehnder con doble manejador (DD-MZM) o un Mach-Zehnder Paralelo Dual con doble manejador (DPMZM).

Usualmente, estos esquemas mencionados utilizan diodos láser monomodo (LD) como fuentes ópticas debido a sus excelentes características, tales como bajo ancho de línea, alta coherencia, entre otras. Sin embargo, son más caras que las fuentes ópticas de baja coherencia. Por lo que, debido a su menor costo, es muy conveniente implementar generadores de formas de onda basados en fuentes ópticas de baja coherencia.

Entonces, en este trabajo, proponemos un esquema simple para generar formas de onda triangulares basadas en una señal senoidal única de radiofrecuencia y una fuente óptica de baja coherencia (un diodo superluminiscente (SLD)).

El esquema propuesto, original a lo mejor de nuestro conocimiento, fue presentado por primera vez en este trabajo y opera de la siguiente forma: cuando aplicamos la señal del diodo superluminiscente modulado a un interferómetro con línea de retardo, obtenemos varios armónicos no deseados además de los componentes armónicos impares requeridos. Un filtro de rechazo de banda formado por la interferencia de la portadora se sintoniza con una línea de retardo óptico (ODL) para eliminar la segunda componente espectral, dejando la señal únicamente con componentes impares obteniendo así, una forma de onda triangular (la cual consiste solo en armónicos de orden impar).

La caracterización del esquema propuesto fue llevada a cabo empleando VPI Photonics Maker, una poderosa herramienta de simulación de comunicaciones ópticas ampliamente reconocida en el ámbito científico y académico que permite emplear parámetros de dispositivos comerciales y así, obtener resultados que serán útiles para nuestras

implementaciones experimentales. Esta característica es muy conveniente pues uno de nuestros objetivos es poder implementar en un futuro nuestro esquema en el laboratorio.

En esta tesis obtuvimos resultados satisfactorios en cuanto a la generación de formas de onda triangulares con frecuencias de pulso de 100, 150, 250 y 300 MHz en lugar de utilizar frecuencias superiores del orden de GHz. Elegimos tales frecuencias pues si bien las aplicaciones de telecomunicaciones como la generación de señales de radio sobre fibra (RoF) o de banda ultraancho (UWB) utilizan la banda de GHz de forma extensiva, nuestro trabajo se centra en la banda de RF de cientos de MHz debido a sus diversas aplicaciones en varios campos como RADAR, control óptico de antenas de RF, sensores de fibra óptica, pruebas optoelectrónicas y otras aplicaciones de procesamiento de señales e instrumentación.

Se propone como trabajo futuro la implementación de un montaje experimental en laboratorio con frecuencias en el orden los GigaHertz.

7 Referencias bibliográficas

- [1] M. A. Khalighi, M. Uysal, C. Marseille, and E. Engineering, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. c, pp. 1–29, 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2329501.
- [2] H. Murata, A. Morimoto, T. Kobayashi, and S. Yamamoto, "Optical pulse generation by electrooptic-modulation method and its application to integrated ultrashort pulse generators," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 1325–1331, 2000, doi: 10.1109/2944.902186.
- [3] H. Taki, S. Azou, and A. Hamie, "On Optimizing the Operating Conditions of a Mach-Zehnder Modulator for IR-UWB over Fiber Transmission," *Digit. Inf. Commun. Technol. its Appl. (DICTAP), 2015 Fifth Int.*, no. 169–172, 2015.
- [4] M. Mirshafiei, A. Ghazisaeidi, D. Lemus, S. LaRochelle, and L. a. Rusch, "Upconversion of gain-switched laser pulses for optical generation of UWB signals," *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 2, pp. 207–214, 2012, doi: 10.1109/JLT.2011.2179521.
- [5] J. Yao, "Microwave photonics," *J. Light. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 314–335, 2009, doi: 10.1109/MWSYM.2006.249900.
- [6] J. Yao, "Photonic integrated circuits for microwave photonics," *2017 IEEE Photonics Conf. Part II*, pp. 1–2, 2017, doi: 10.1109/PC2.2017.8283405.
- [7] B. Kitchenham, "Procedures for performing systematic reviews," *Keele, UK, Keele Univ.*, vol. 33, no. TR/SE-0401, p. 28, 2004, doi: 10.1.1.122.3308.

- [8] D. J. Jones *et al.*, "Carrier-Envelope Phase Control of Femtosecond Mode-Locked Lasers and Direct Optical Frequency Synthesis," *Science (80-.)*, vol. 288, no. 5466, pp. 635–639, 2000, doi: 10.1126/science.288.5466.635.
- [9] Y. Dou, H. Zhang, and M. Yao, "Generation of flat optical-frequency comb using cascaded intensity and phase modulators," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 9, pp. 727–729, 2012, doi: 10.1109/LPT.2012.2187330.
- [10] Q. Zhang *et al.*, "Research of dual-band microwave photonic filter for WLAN based on optical frequency comb," *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 21, p. 5520, 2016, doi: 10.1364/AO.55.005520.
- [11] I. Morohashi, T. Sakamoto, N. Yamamoto, H. Sotobayashi, and T. Kawanishi, "Broadband Optical Comb Generation using Mach-Zehnder-Modulator-Based Flat Comb Generator with Feedback Loop," no. OCTOBER, pp. 2–4, 2010, doi: 10.1109/ECOC.2010.5621188.
- [12] M. A. Esmail, A. Ragheb, H. Fathallah, and M. S. Alouini, "Experimental demonstration of outdoor 2.2 Tbps super-channel FSO transmission system," *2016 IEEE Int. Conf. Commun. Work. ICC 2016*, pp. 169–174, 2016, doi: 10.1109/ICCW.2016.7503783.
- [13] K. Iizuka, *Elements of Photonics. volume II*, vol. 1. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [14] E. L. Wooten *et al.*, "A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 69–82, 2000, doi: 10.1109/2944.826874.
- [15] P. Cao, X. Hu, J. Wu, L. Zhang, and X. Jiang, "Reconfigurable UWB Pulse Generation Based on a Dual-Drive Mach – Zehnder Modulator Reconfigurable UWB Pulse Generation Based on a Dual-Drive Mach – Zehnder Modulator," *IEEE Photonics J.*, vol. 6, no. 5, 2014, doi: 10.1109/JPHOT.2014.2352632.

- [16] W. Li, L. X. Wang, J. Y. Zheng, M. Li, and N. H. Zhu, "Photonic MMW-UWB Signal Generation via DPMZM-Based Frequency Up-Conversion," *IEEE PHOTONICS Technol. Lett.*, vol. 25, no. 19, pp. 1875–1878, 2013.
- [17] I. L. Gheorma and G. K. Gopalakrishnan, "Flat frequency comb generation with an integrated dual-parallel modulator," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 19, no. 13, pp. 1011–1013, 2007, doi: 10.1109/LPT.2007.898766.
- [18] X. Yang and J. Yan, "Generation of high order UWB pulses based on a single dual parallel March-Zehnder modulator," *ICOON 2015 - 14th Int. Conf. Opt. Commun. Networks, Proc.*, pp. 14–16, 2015, doi: 10.1109/ICOON.2015.7203672.
- [19] W. Li, W. T. Wang, and N. H. Zhu, "Photonic Generation of Radio-Frequency Waveforms Based on Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator," *IEEE Photonics J.*, vol. 6, no. 3, 2014, doi: 10.1109/JPHOT.2014.2325863.
- [20] Q. Chang, Y. Tian, T. Ye, J. Gao, and Y. Su, "A 24-GHz Ultra-Wideband Over Fiber System Using," *October*, vol. 20, no. 19, pp. 1651–1653, 2008.
- [21] J. Capmany, B. Ortega, and D. Pastor, "A Tutorial on Microwave Photonic Filters," *J. Light. Technol.*, vol. 24, no. 1, pp. 201–229, 2006.
- [22] W. Liu and J. Yao, "Photonic generation of microwave waveforms based on a polarization modulator in a sagnac loop," *J. Light. Technol.*, vol. 32, no. 20, pp. 3637–3644, 2014, doi: 10.1109/JLT.2014.2312819.
- [23] G.-F. Bai *et al.*, "Versatile photonic microwave waveforms generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator without other dispersive elements," *Opt. Commun.*, vol. 396, pp. 134–140, 2017, doi: 10.1016/j.optcom.2017.03.050.