

Peine de frecuencias ópticas basado en la mezcla de cuatro ondas en una fibra óptica altamente no lineal combinado con modulación electroóptica



Optical frequency comb based on four-wave-mixing in a highly nonli-near fiber combined with electro-optic modulation

Saquinaula Brito, José Luis; Muñoz Salcedo, José; Ortiz-Mata, Jhonny; León Batallas, Alberto

José Luis Saquinaula Brito
jsaquinaulab@unemi.edu.ec
Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

José Muñoz Salcedo
jmunozs@unemi.edu.ec
Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Jhonny Ortiz-Mata
jortizm2@unemi.edu.ec
Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Alberto León Batallas
aleonb2@unemi.edu.ec
Universidad Estatal de Milagro, Ecuador

Ecuadorian Science Journal
GDEON, Ecuador
ISSN-e: 2602-8077
Periodicidad: Semestral
vol. 6, núm. 1, 2022
esj@gdeon.org

Recepción: 14 Diciembre 2021
Aprobación: 01 Enero 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/606/6063067004/>

DOI: <https://doi.org/10.46480/esj.6.1.132>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Como citar: : Saquinaula Brito, J. L., Muñoz Salcedo, J., Ortiz Mata, J., & León Batallas, A. (2022). Peine de frecuencias ópticas basado en la mezcla de cuatro ondas en una fibra óptica altamente no lineal combinado con modulación electroóptica. Ecuadorian Science Journal, 6(1), 1-13. <https://doi.org/10.46480/esj.6.1.132>

Resumen: En los últimos 20 años los peines de frecuencias ópticas basados en lasers de femtosegundos representaron una revolución en el área de metrología y medidas de precisión, permitiendo medir directamente frecuencias de varias centenas de THz, así, como posibilitando el advenimiento de relojes atómicos ópticos. En este trabajo, estudiamos la generación de peines de frecuencias ópticas con base en moduladores electroópticos y fibras altamente no lineales, con el objetivo de implementar nuevas configuraciones y generar espectros con el mayor ancho de banda y alta coherencia entre las frecuencias generadas, aprovechando componentes comerciales disponibles en las comunicaciones ópticas.

Nosotros implementamos un peine de frecuencias ópticas basado en efectos no lineales a través de una fibra óptica altamente no lineal combinándolo con modulación electroóptica. Los resultados experimentales muestran un peine de frecuencias ópticas con más de 100 nm de ancho de banda centrado en 1550 nm y con 25 GHz de separación entre las frecuencias, usando dos láseres continuos.

Palabras clave: Mezcla de cuatro ondas, modulación electroóptica, optica no lineal, peine de frecuencias ópticas.

Abstract: In the last 20 years, optical frequency combs based on femtosecond lasers have represented a revolution in the area of metrology and precision measurements, making it possible to directly measure frequencies of several hundred terahertz, and affording the advent of optical atomic clocks. In this work, we study the generation of optical frequency combs based on electro-optic modulators and highly nonlinear fibers, with the goal of implementing new configurations and implement frequency combs with the largest bandwidth, while still preserving the coherence between the generated frequencies, and taking advantage of commercially available components developed for optical communications.

We implement an optical frequency comb based on nonlinear effects in a high nonlinear fiber (HNLF) in combination with electro-optic modulation. Experimental results show an optical frequency comb greater than 100 nm bandwidth centered in

1550 nm and 25 GHz between frequencies, using two single continuous lasers

Keywords: Four-wave mixing, electro-optic modulation, Nonlinear optics, optical frequency comb.

INTRODUCCIÓN

Importancia de los peines de frecuencias ópticas

El desarrollo de láseres pulsados en femtosegundos junto con técnicas de estabilización en frecuencia y además con la aparición de fibras de cristal fotónico, llevó a partir de 1999 la aparición de los llamados peines de frecuencias ópticas (OFC, Optical Frequency Comb), que permiten realizar medidas directas de frecuencias en el rango de centenas de Terahertz (Jun Ye, 2005). Los peines de frecuencias ópticas son ampliamente usados en diversas áreas, como por ejemplo; metrología, medidas de precisión de las constantes fundamentales, espectroscopia, relojes atómicos ópticos, comunicaciones ópticas y hasta la búsqueda de exoplanetas a través de la calibración de espectrómetros astrofísicos (Aakash Ravi, 2017).

Tradicionalmente un peine de frecuencias ópticas es implementado usando un láser de modos trabados (mode-locked), que utiliza dos mecanismos de servo control activo. Uno de estos sirve para estabilizar la frecuencia de repetición (f_{rep}) del tren de pulsos, a través del control de la longitud (L) de la cavidad óptica del láser ($f_{rep} = c/2L$). El otro mecanismo estabiliza la fase entre el campo eléctrico de cada pulso y su respectiva onda portadora (carrier-to-envelope phase, ϕ_{ceo}). En los láseres mode-locked, esta fase fluctúa de un pulso al siguiente, y esta fluctuación se origina en la diferencia de fase que existe entre la velocidad de fase y la velocidad de grupo que el pulso experimenta dentro de la cavidad óptica del láser originando una frecuencia en el rango de radio-frecuencias ($2\pi f_{ceo} = \phi_{ceo}/\tau_{rep}$, donde τ_{rep} es el tiempo entre pulsos consecutivos) que puede ser medido y estabilizado activamente. En el trabajo de (Fortier, 2019) y (Th. Udem, 1999) controlan un dispositivo que varíe la intensidad de la luz dentro de la cavidad óptica del láser. La medida de la frecuencia f_{ceo} requiere que el espectro del láser tenga un ancho de banda suficiente para cubrir una octava óptica. Por este motivo, el desarrollo de fibras de cristal fotónico fue importante, una vez que permitieron generar una octava.

La figura 1 muestra una ilustración del espectro del tren de pulsos generado correspondiente a un peine de frecuencias ópticas (f_n) que se relacionan directamente con la tasa de repetición f_{rep} y también con f_{ceo} , a través de la ecuación (1), donde n es un número entero (Jun Ye, 2005). Matemáticamente se expresa así:

$$f_n = n f_{rep} + f_{ceo} \quad (1)$$

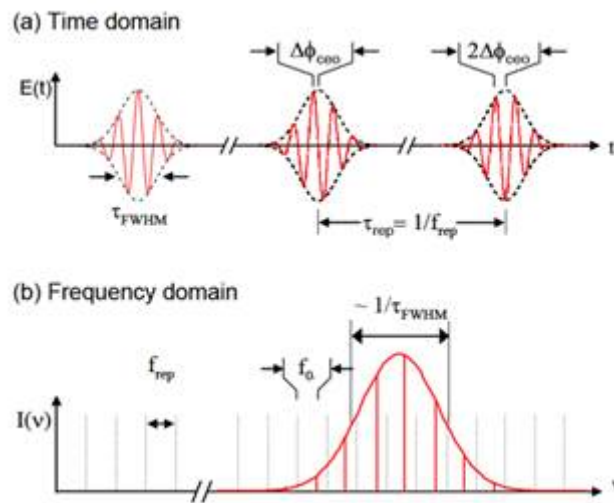


FIGURA 1

Ilustración de un peine de frecuencias en el dominio del tiempo (a) y frecuencia (b).

(Foreman, 2007)

Por tanto, midiendo frecuencias en RF (tanto f_{rep} y f_{ceo}) es posible conocer cualquier frecuencia óptica (f_n) del peine de frecuencias que constituye el espectro del láser mode-locked. Ahora, este espectro pasa a ser una “regla” que permite medir otras frecuencias como la de láseres continuos ultra-estables, mediante batimiento heterodino (Sutapa Ghosh, 2020).

Construir dispositivos para medir con precisión la frecuencia desconocida de un láser es una tarea costosa y complicada, porque la implementación requiere una variedad de dispositivos ópticos (free space) como por ejemplo, un láser de femtosegundos. Por tal motivo la motivación e importancia del trabajo radica en estudiar y generar otro tipo de peines de frecuencias ópticas, mucho menos costosas y más compactas (Chang, 2022).

En este trabajo se presentan implementaciones para generar un peine de frecuencias ópticas, basados en el fenómeno no lineal llamado mezcla de cuatro ondas (Four-Wave-Mixing, FWM), que utiliza dos láseres continuos que son inyectados en una fibra óptica altamente no lineal. Sistemas de este tipo han sido realizados por los investigadores (Arismar Cerqueira S. Jr, 2008) que generaron peines de frecuencias para crear nuevas longitudes de onda para canales WDM en telecomunicaciones. Además, con la ayuda de un modulador electroóptico con cavidad Fabry-Perot disminuimos la separación entre las frecuencias del peine.

Más recientemente, implementaciones similares a nuestro trabajo experimental fueron elaborados por (Vishal Sharma, 2020), el cual usa dos láseres continuos modulados con un mach-zehnder a 25 GHz de radio frecuencia. Esta señal pasa por una fibra óptica altamente no lineal, siendo aplicada por un EDFA. El resultado muestra un peine de frecuencias con 55 líneas coherentes y con una desviación máxima de potencia de 3 dB.

Peine de frecuencia basado en generación electroóptica

El modulador electroóptico que hemos utilizado nos permite crear frecuencias distanciadas uniformemente para cubrir la separación espectral entre dos láseres continuos, los cuales son usados para generar un peine de frecuencias ópticas en fibras altamente no lineales. La figura 2 muestra la estructura interna del dispositivo acoplado en fibra y que trabaja en la banda C de telecomunicaciones (Motonobu Kourogi, 1993). La luz incidente es modulada en fase a una tasa en microondas. La eficiencia de este modulador comercial es mayor que otros moduladores convencionales, en razón del uso de una cavidad óptica Fabry-Perot.

El dispositivo está compuesto de un cristal de niobato de litio (LiNbO₃), que produce una modulación de fase basado en el efecto electroóptico, en el cual se construye sobre una parte de la superficie del cristal una guía de onda para el láser incidente, mediante el dopaje con oxido de titanio.

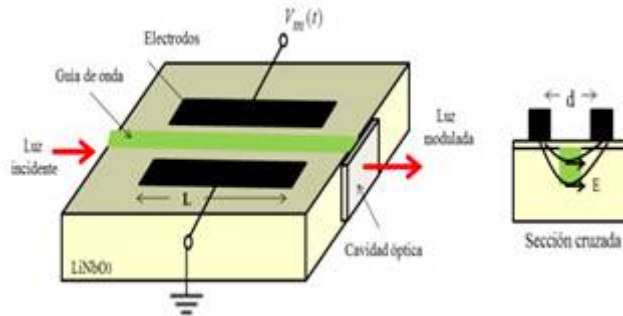


FIGURA 2

Ilustración de la estructura interna del modulador electroóptico con cavidad Fabry-Perot.

Autor

Además, cuenta con una cavidad óptica resonante creada por el pulimiento en las caras del niobato de litio. (Yuefeng QI, 2020) una cavidad para aumentar la potencia de las bandas laterales generadas por la modulación de fase, una vez que estas frecuencias entren en resonancia con la cavidad óptica.

La modulación es obtenida al modificar la fase de la onda portadora (láser incidente) de amplitud constante, en proporción directa con la amplitud de la onda de modulación (señal en microondas). Esto se consigue a través de la aplicación de un voltaje en los electrodos posicionados sobre el cristal, como indica la figura 2. El campo eléctrico producido por el voltaje tiene una interacción electroóptica con el LiNbO₃ induciendo un cambio en los índices de refracción del cristal (L. A. Huancachoque, 2019). En la entrada de la guía de onda tenemos una señal óptica de la forma:

$$E_{out} = (E_0 e^{-i\omega_0 t}) e^{i\frac{\pi}{2} \cos \omega_m t} \quad (2)$$

Donde ω_0 y E_0 son la frecuencia angular y la amplitud del del laser incidente, v_0 y ω_m son el voltaje y la frecuencia angular de la señal eléctrica y v_π es la tensión de media onda.

La ecuación 3 muestra la expresión matemática para la salida del láser modulado en fase. Utilizando identidades de Bessel podemos dejar expresado la señal como:

$$E_{out} = E_0 e^{-i\omega_0 t} \left[J_0(\delta) + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\delta) (e^{-i(\omega_0 + n\omega_m)t} + (-1)^n e^{-i(\omega_0 - n\omega_m)t}) \right] \quad (3)$$

Donde $\delta = \pi v_0 / v_\pi$ es el índice de modulación y $J_n(\delta)$ son las funciones de Bessel de primer orden. El espectro generado corresponde a la frecuencia del láser junto con las nuevas frecuencias en $\omega_0 + n\omega_m$, ($n = \pm 1, \pm 2, \dots$).

Peine de frecuencia basado en efectos no lineales

Los sistemas de comunicaciones ópticas presentan un comportamiento lineal cuando se trabaja con potencias de algunos milivatios. Por el contrario, cuando se aumenta la potencia óptica los efectos no lineales se tornan importantes (Arismar Cerqueira S. Jr, 2008). Uno de estos efectos es la mezcla de cuatro ondas (FWM, Four Wave Mixing), producido por la dependencia del índice de refracción con la intensidad del campo eléctrico del láser incidente (Agrawal, 2019).

Este efecto óptico se debe a la respuesta no lineal de los electrones ligados del silicio en la presencia de un campo electromagnético. En términos de la mecánica cuántica podemos decir que la mezcla de cuatro ondas ocurre cuando fotones de uno o dos láseres de entrada son eliminados y se crean nuevos fotones en

diferentes frecuencias, tal que la energía y el momento del sistema se conserva durante la interacción (Rajiv Ramaswami, 2010).

En el caso de que el efecto sea no degenerado tres fotones incidentes ω_1 , ω_2 y ω_3 (frecuencia de tres láseres de entrada) interactúan dentro de la fibra de tal forma que dos fotones ω_1 y ω_2 son eliminados y dos nuevos fotones son creados, ω_3 y $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$ (Rajiv Ramaswami, 2010), cumpliendo con la condición de casamiento de fase:

$$\Delta\beta = \beta_4 + \beta_3 - \beta_1 - \beta_2 = 0 \quad (4)$$

Donde β es el número de onda. En el proceso degenerado cuando dos fotones ω_1 y ω_2 ingresan a la fibra producen una rejilla de difracción de índice de refracción móvil (período espacial $2\pi/\Delta\beta$, donde $\Delta\beta = |\beta(\omega_2) - \beta(\omega_1)|$), la cual es modulada en tiempo con una frecuencia de batimiento $\Delta\omega = |\omega_2 - \omega_1|$; entonces la luz con frecuencia ω se difractará en la fibra inelásticamente generando frecuencias $\omega \pm \Delta\omega$, y a su vez estas van creando nuevos fotones con frecuencias $\omega \pm n\Delta\omega$ ($n = \pm 1, \pm 2 \dots$). Espectros obtenidos de esta manera se muestra en la figura 3 (Vishal Sharma, 2020).

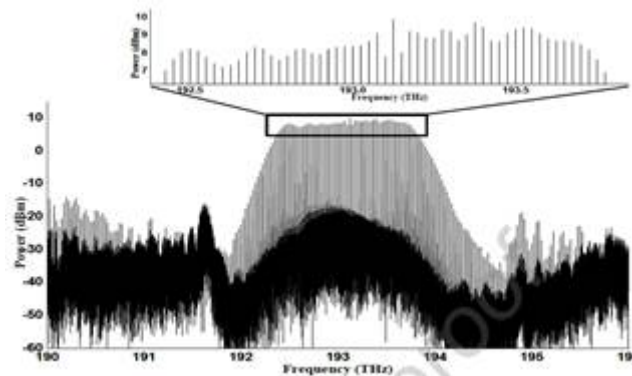


FIGURA 3

Espectro de un peine de frecuencias ópticas generado por FWM en fibras altamente no lineales. (Vishal Sharma, 2020)

Un factor crucial para la generación de nuevas frecuencias es el uso de fibras ópticas altamente no lineales (HNLF, highly nonlinear fibers). Al igual que las fibras convencionales monomodo está gobernado por un parámetro no lineal definido por:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{eff}} \quad (5)$$

Donde λ es la longitud de onda del laser incidente, A_{eff} es el area efectiva y n_2 es el indice de refracción no lineal. Para la mayoría de las fibras ópticas γ tiene un valor aproximado de $1 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ que es muy pequeño para ser utilizado en varias aplicaciones no lineales (Agrawal, 2019). Problema que se resolvió al crear nuevos tipos de fibras ópticas con $\gamma > 10 \text{ W}^{-1}/\text{km}$ llamadas fibras altamente no lineales. La tabla 1 muestra un comparativo de los parámetros más importantes entre una fibra convencional y una altamente no lineal (Jiao, 2008). Donde α es la atenuación y λ_0 es la longitud de onda de cero dispersión.

Parámetro	HNLF	SMF
$n_2(m^2/W)$	$(4\sim 6)\times 10^{-20}$	$(4\sim 6)\times 10^{-20}$
$A_{eff}(um^2)$	(9~20)	80
$\gamma(W^{-1}/Km)$	(10~30)	1.5
$\alpha (dB/Km)$	(0.5~1)	2
$\lambda_0(nm)$	> 1350	1310

TABLA 1

Comparación entre una fibra convencional (SMF) y una fibra no lineal (HNLF).

El proceso en cascada de la mezcla de cuatro ondas ocurre con la máxima eficiencia cuando se satisface la condición de casamiento de fase ($\Delta\beta = 0$), pero en la práctica es muy difícil obtenerlo porque está sujeto a los efectos de la dispersión y otros efectos no lineales tales como la automodulación de fase y la modulación de fase cruzada (Jinkun Zheng, 2018).

Para minimizar la falta de casamiento de fase, los láseres deben tratar de operar en la región anómala, de tal manera que el descasamiento lineal debido a la dispersión permita compensar el descasamiento debido a los efectos no lineales. Además, al aumentar la potencia de los láseres alrededor de estos se produce un ancho de banda que puede ofrecer una amplificación de las frecuencias del peine de frecuencias ópticas, este proceso es llamado amplificación paramétrica que permite crear nuevas señales sin necesariamente cumplir en su totalidad la condición de casamiento de fase, siempre y cuando las frecuencias se encuentren dentro de la región de ganancia óptica proporcionando un peine de frecuencias más amplio (Rajiv Ramaswami et al. 2010).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema con modulación electroóptica

Con el objetivo de implementar un peine de frecuencias ópticas, desarrollamos el esquema mostrado en la figura 4, basado en un modulador electroóptico y un láser continuo. Este paso es importante ya que sirve para expandir el peine de frecuencias ópticas basado en la mezcla de cuatro ondas y disminuir la separación en frecuencias de los láseres inyectados en la fibra altamente no lineal.

El modulador electroóptico (FP-EO) es un dispositivo acoplado en fibra que trabaja en la banda C de las telecomunicaciones (1530-1565 nm). Por diseño opera a una frecuencia de modulación de 25 GHz y la cavidad-Perot tiene una finesa de 56.6.

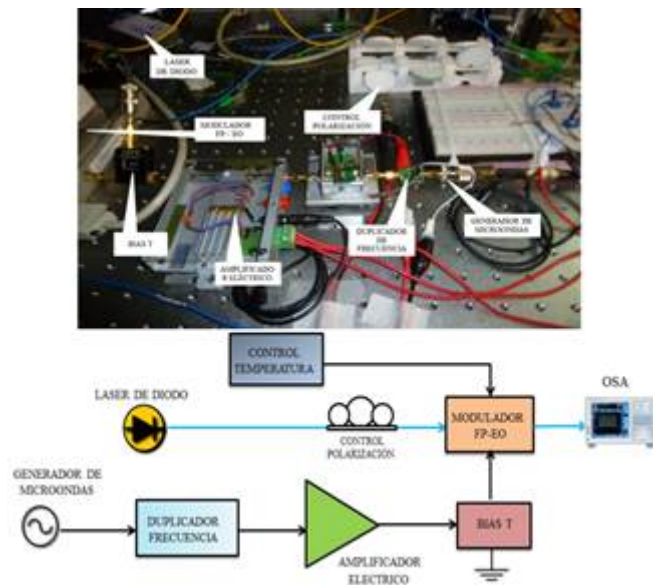


FIGURA 4
 Fotografía y configuración del peine de frecuencias ópticas
 generado por el modulador electroóptico con cavidad Fabry-Perot.
 Autor

Un láser de diodo (marca Rio-Orion con una longitud de onda de 1549.6 nm y potencia óptica de +10.9 dBm) sirve como señal portadora para el modulador electroóptico. Como disponemos en el laboratorio de un generador que proporciona solo hasta 20 GHz, utilizamos un multiplicador de frecuencia que posteriormente pasa a ser amplificada hasta +15 dBm antes de ingresar al modulador. El Bias T es usado para realizar un ajuste fino de resonancia del índice refracción dentro de la cavidad óptica.

Sistema con fibra óptica altamente no lineal

El esquemático en este caso es mostrado en la figura 5. Dos láseres continuos (Rio-Orion: $\lambda = 1549 \text{ nm}$, $P = +10.9 \text{ dBm}$; OE-Wave: $\lambda = 1556 \text{ nm}$, $P = +12.1 \text{ dBm}$) son combinados en un acoplador óptico (50/50) para pasar a través del modulador acústico-óptico (AOM), el cual produce pulsos con 40 ns de duración y separados por 7 μs con un bajo Duty-cycle. Esto permite que la ganancia del amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA) se recupere de un pulso a otro, permitiendo una mayor amplificación óptica, y por tanto mayor potencia de pico. El modulador de intensidad usado de la marca Gooch&Housego opera con una frecuencia de 80 MHz, el cual es proporcionado por un dispositivo controlador (DRIVER). Finalmente, después de que los láseres pulsados son amplificados ingresan a una fibra óptica altamente no lineal (longitud de $L = 15 \text{ m}$, cero de dispersión en $\lambda_{2D} = 1552 \text{ nm}$, coeficiente no lineal $14/\text{W}/\text{km}$) cuyo espectro es observado en un analizador de espectros ópticos (OSA).

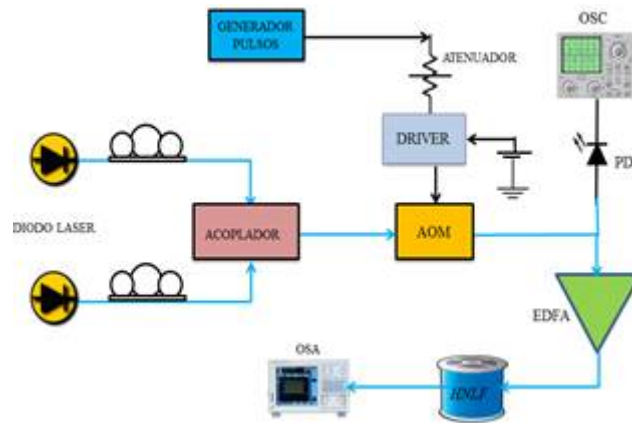


FIGURA 5

Configuración del peine de frecuencias ópticas generado por la mezcla de cuatro ondas.

Autor

Sistema combinado

Con la intención de reducir la frecuencia de separación del peine de frecuencias ópticas producido por el montaje experimental de la figura 5, se combinó los dos sistemas como lo muestra la figura 6.

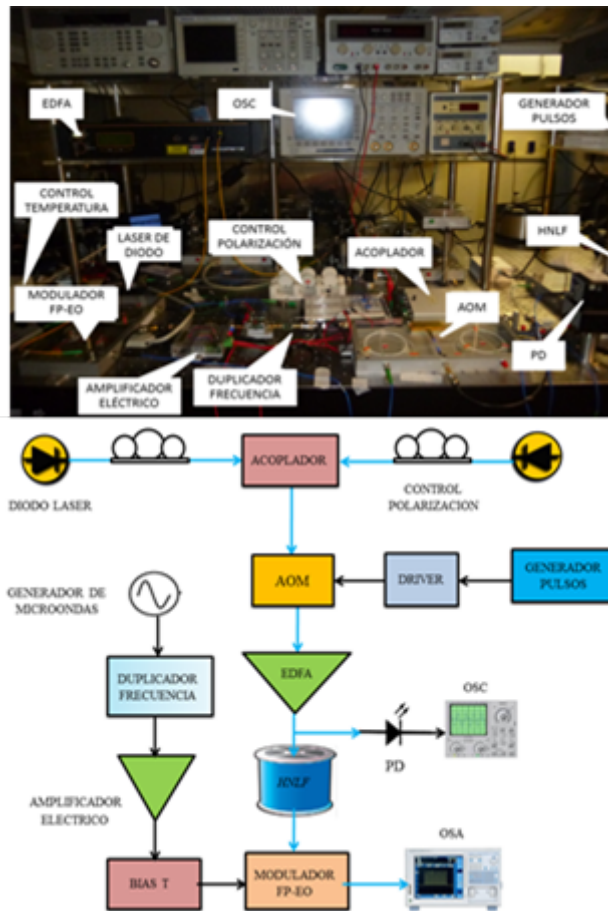


FIGURA 6

Montaje propuesto para generar un peine de frecuencias ópticas en una fibra altamente no lineal combinado con modulación electroóptica
Autor

El modulador electroóptico es colocado después de la fibra altamente no lineal (HNLF), de esta forma nuevas frecuencias separadas por 25 GHz son creadas en el espectro producido por el sistema combinado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Peine de frecuencias generado por la modulación electroóptica

El resultado del montaje experimental para generar el peine de frecuencias ópticas basado en el efecto electroóptico se indica en la figura 7. El espectro muestra una separación de 25.1 GHz entre las frecuencias, potencia óptica (integrada) de -12 dBm y un ancho de banda de 7 nm medido a 20 dB por debajo de la frecuencia central. Para estabilizar el peine implementamos un control de temperatura junto con una celda Peltier colocado junto al modulador electroóptico.

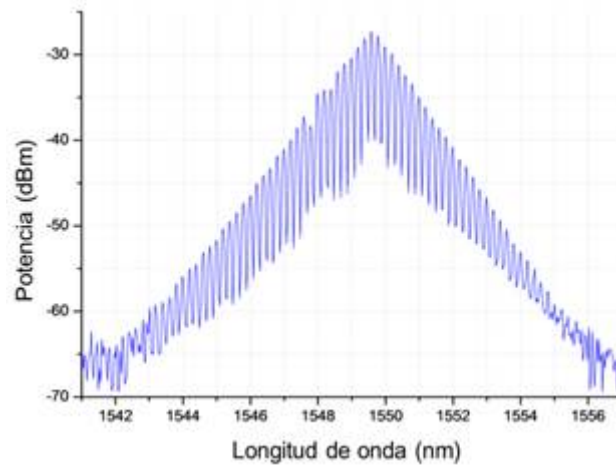


FIGURA 7

Espectro del peine de frecuencias creado por el modulador electroóptico Fabry-Perot.

Autor

Peine de frecuencias generado por una fibra óptica altamente no lineal

El espectro del peine de frecuencias ópticas implementando una fibra altamente no lineal y láseres modulados en intensidad se indica en la figura 8. Usamos un fotodetector (PD) para analizar la señal con el osciloscopio y obtener los parámetros de los pulsos en la entrada del EDFA (ancho del pulso: 31.8 ns; periodo: 6.9 us; potencia óptica media: +17.4 dBm) con el objetivo de medir la potencia de pico en la entrada de la fibra no lineal. Los controladores de polarización son utilizados para optimizar la eficiencia de la generación de las frecuencias de FWM. El espectro muestra las siguientes características: separación en frecuencias de 796 GHz (6.3 nm), potencia óptica integrada de +16.4 dBm y un ancho de banda de 242 nm medido a 20 dB por debajo de la frecuencia central.

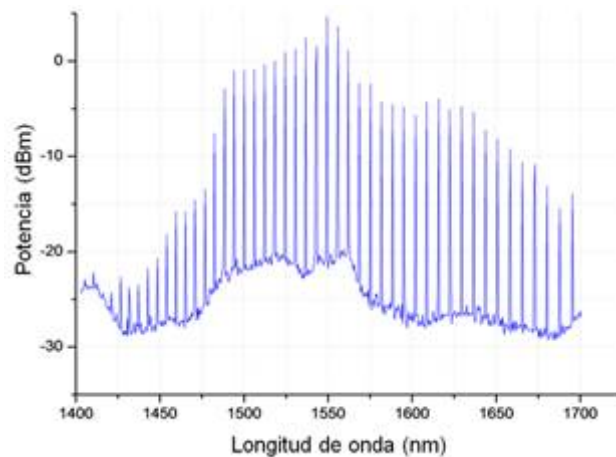


FIGURA 8

Espectro del peine de frecuencias obtenido con dos láseres modulados en intensidad usando el esquema de la figura 5. Fue utilizada una fibra de 15 m de longitud con cero de dispersión en 1552 nm.

Autor

Peine de frecuencias generado por una fibra óptica altamente no lineal combinado con modulación electroóptica

Por último, combinamos los dos sistemas con la finalidad de disminuir la separación entre las frecuencias del peine de la figura 8. La primera parte del montaje es la usada en la figura 5, donde los láseres continuos son combinados y luego modulados en intensidad para ingresar por la fibra óptica altamente no lineal. En la segunda parte, el peine de frecuencias pasa por el modulador electroóptico, de esta manera el peine disminuye la separación entre las frecuencias de 796 GHz a 25 GHz. El resultado es mostrado en la figura 9 (a).

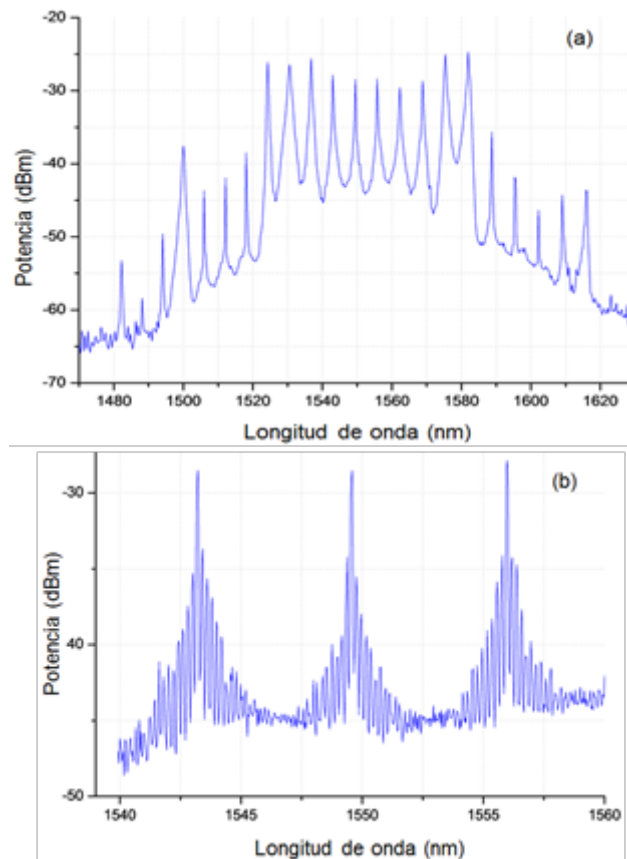


FIGURA 9

(a) Espectro del peine de frecuencias ópticas combinando los dos sistemas, (b) ampliación del peine entre 1540 nm y 1560 nm

Autor

Notamos que después de pasar por el modulador, el ancho de banda del peine de frecuencias basado en la mezcla de cuatro ondas fue reducido a 100 nm (20 dB por debajo de la frecuencia central). Esta reducción se debe al hecho de que el modulador opera en la banda C de telecomunicaciones (1530 nm – 1565 nm), haciendo que las frecuencias alejadas de este intervalo no sean moduladas. La figura 9(b) muestra una ampliación del espectro, en el cual observamos que solo en ciertas frecuencias fue producido un peine con 25 GHz de separación entre las frecuencias. Esto se debe al hecho de que apenas uno de los láseres pudo ser sintonizado.

Resulta algo complicado realizar un comparativo del peine de frecuencias con otros trabajos similares, debido a múltiples parámetros a tomar en cuenta, como son: longitud de la fibra, longitud de cero dispersión, frecuencia y potencia óptica, así como eléctrica, entre otros dispositivos electroópticos, más sin embargo, revisando trabajos similares (Arismar Cerqueira S. Jr, 2008) obtenemos un ancho de banda similar en la

banda C, cercano a los 100 nm (20 dB por debajo de la frecuencia central) pero con una potencia integrada mucho menor debido a que nuestro montaje experimental contaba solo con un preamplificador óptico para aumentar la amplitud del laser de bombeo y de la señal eléctrica (onda moduladora).

En trabajos como el de (Vishal Sharma, 2020) indican haber generado un peine de frecuencias con 55 líneas a 3 dB por debajo de la potencia central mientras que nuestro trabajo generó 17 líneas a 5 dB, esto es debido principalmente al uso entre 400 y 500 metros de fibra óptica altamente no lineal y nuestro montaje aproximadamente unos 15 m. Además, la separación entre las frecuencias de los lasers de bombeo usados en nuestro trabajo es de 796 GHz y la de ellos fue de 50 GHz, provocando un mayor rendimiento en la generación de líneas espectrales y mayor estabilidad en potencia.

CONCLUSIONES

En conclusión, hemos implementado sistemas eléctricos y ópticos para obtener peines de frecuencias ópticas, como otra opción a los basados en láseres de modos trabados, con la posibilidad de ser usado en metrología y espectroscopia. Dos peines de frecuencias han sido desarrollados: uno de ellos producido con un modulador electroóptico comercial, y el otro basado en la mezcla de cuatro ondas en una fibra óptica. Ambos utilizando láseres semiconductores continuos.

La implementación con el modulador electroóptico generó un peine de frecuencias ópticas con 7 nm de ancho de banda (1545 nm – 1552 nm, definido a 20 dB por debajo del máximo en 1553 nm) con una separación entre las frecuencias de 25.1 GHz. El peine de frecuencias basado en la creación en cascada de productos de la mezcla de cuatro ondas nos proporcionó un espectro que se extiende de 1458 nm hasta más de 1700 nm (considerando frecuencias con amplitud de 20 dB por debajo del máximo en 1689 nm) con una separación en frecuencias de 6.3 nm (796 GHz). Fue necesario modular los láseres con un modulador acústico-óptico y una fibra óptica cuyo parámetro de cero dispersión (1552 nm) esté localizado entre las longitudes de onda de los láseres. Finalmente, combinamos los dos sistemas para generar un peine de frecuencias con un ancho de banda de 100 nm y creando nuevas frecuencias (espaciadas 25.1 GHz) producto de la modulación electroóptica alrededor de cada frecuencia del peine producido por la fibra altamente no lineal.

En un futuro, una mayor expansión espectral en principio puede ser obtenido contando con una mayor potencia óptica y eléctrica aplicada al modulador electroóptico. Además, estabilizar en fase los dos láseres inyectados en la fibra permanece como una meta próxima, de tal manera que puedan ser utilizados para espectroscopia de alta precisión usando dos peines de frecuencias (dual spectroscopy) que es análogo a la espectroscopia de la transformada de Fourier.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el auspicio de la Fundación de Apoyo a la Investigación del estado de São Paulo (FAPESP):2013/20180-3 y 08/57857-2 y por el Consejo Nacional de desarrollo científico y tecnológico (CNPq): 574017/2008-9. De manera especial mi agradecimiento a los profesores Dr. Flavio Caldas da Cruz y Dr. Paulo Clóvis Dainese junior por la orientación y disponibilidad de los equipos de laboratorio del grupo de fenómenos ultrarrápidos y comunicaciones ópticas del departamento de electrónica cuántica de la UNICAMP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aakash Ravi, D. P. (2017). Astro-comb calibrator and spectrograph characterization using a turn-key laser frequency comb. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 3. doi:10.1117/1.JATIS.3.4.045003

- Agrawal, G. P. (2019). *Nonlinear Fiber Optics* (Sixth ed.). Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/C2018-0-01168-8>
- Arismar Cerqueira S. Jr, J. M.-F. (2008). Highly efficient generation of broadband cascaded four-wave mixing products. *Optics Express*, 16.
- Chang, L. L. (2022). Integrated optical frequency comb technologies. *Nat. Photon*, 16, 95-108. doi:<https://doi.org/10.1038/s41566-021-00945-1>
- Foreman, S. M. (2007). *Femtosecond Frequency combs for Optical Clocks and Timing Transfer*. (D. thesis, Ed.) University of Colorado .
- Fortier, T. B. (2019). 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications. *Commun Phys*, 153. doi:<https://doi.org/10.1038/s42005-019-0249-y>
- Jiao, Z. (2008). *Broadband Optical Supercontinuum Generation Using Low-Cost Multimode 975-nm Pump Laser*. (D. thesis, Ed.) Concordia University Montreal.
- Jinkun Zheng, W. Z. (2018). Four-wave mixing effect on high-power continuous-wave all-fiber lasers. *Modern Physics Letters B*. doi:DOI: 10.1142/S0217984918502755
- Jun Ye, S. T. (2005). *Femtosecond optical frequency comb technology, principle and application*. Springer.
- L. A. Huancachoque, M. L. (2019). Flatness Improved Comb Generation by Electro-optic Phase and Mach-Zehnder Modulators Cascade. *IEEE-International Microwave and Optoelectronics Conference*. doi:10.1109/IMOC43827.2019.9317569
- Motonobu Kourog, K. N. (1993). Wide-Span Optical Frequency Comb Generator for Accurate Optical Frequency Difference Measurement. *IEEE*, 29.
- Rajiv Ramaswami, K. S. (2010). *Optical Networks* (Third ed.). Elsevier Science.
- Sutapa Ghosh, G. E. (2020). Fast High-Resolution Measurement of an Arbitrary Optical Pulse Using Dual-Comb Spectroscopy. *Phys. Rev. Applied*, 14. doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.014061>
- Th. Udem, J. R. (1999). Absolute Optical Frequency Measurement of the Cesium D1 Line with a Mode-Locked Laser. *Phys. Rev. Lett*, 82. doi:<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.3568>
- Vishal Sharma, S. S. (2020). Demonstration of optical frequency comb generation using four-wave mixing in highly nonlinear fiber. *Optik*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.166948>
- Yuefeng QI, M. W. (2020). Novel Fiber Optic Current Transformer With New Phase Modulation Method. *Photonic Sensors*, 10. doi:DOI:10.1007/s13320-020-0581-6