

# DETECCIÓN Y MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA DE CORRIMIENTO (Frecuencia *Offset*) EN EL PEINE DE FRECUENCIAS ÓPTICAS DEL CENAM

Ricardo Gutierrez-Gómez<sup>1</sup>, Sergio López-Lopez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación y de Estudios Avanzados de IPN, Unidad Querétaro  
 Libramiento Norponiente #2000, Fracc. Real de Juriquilla. C.P. 76230  
 Centro Nacional de Metrología  
 km 4.5 Carretera a Los Cues, El Marqués Querétaro. C.P. 76246  
 (442) 211 0500. Ext. 3200

**Resumen:** En los últimos meses se ha tenido un avance importante en la implementación de mejoras al Patrón Nacional de Frecuencias Ópticas (PNFO) que se ha desarrollado en el CENAM. Entre estas mejoras destacan la generación del supercontinuo ensanchado a más de una octava por medio de una fibra encapsulada y el desarrollo de un interferómetro que permite el acople temporal y espacial de dos pulsos ultracortos provenientes de las regiones de frecuencias altas y bajas del peine, respectivamente, ambas mejoras permiten detectar y medir de manera eficiente la frecuencia de corrimiento del PNFO.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el Centro Nacional de Metrología de México, se han desarrollado dos peines de frecuencias ópticas, que constituyen la base del Patrón Nacional de Frecuencias Ópticas. El primer peine denominado FC-1 opera con una frecuencia de repetición de 840 MHz, mientras el segundo peine, FC-2, opera a una frecuencia 1.149 GHz, en ambos peines el ancho temporal de los pulsos generados, se estima alrededor de 20 fs. En los últimos meses se han realizado mejoras sustanciales al FC-2, entre estas mejoras se destaca la generación del supercontinuo por medio de una fibra óptica encapsulada de microestructura, la cual alineada de manera correcta, previene daños por sobrecalentamiento en la fibra, esto evita la necesidad de corte de los extremos de la fibra constantemente. Por otro lado, se ha implementado un interferómetro que permite acoplar espacial y temporalmente dos pulsos de luz provenientes de las regiones de baja y alta frecuencia respectivamente. Estas dos importantes mejoras en el PNFO, permiten de manera eficiente la detección y medición de la frecuencia de corrimiento del FC-2 por el método de autorreferencia. En el presente trabajo se presentan los avances obtenidos en la medición y control de la frecuencia de corrimiento del FC-2. En la sección 2 se presenta un resumen del origen físico de la frecuencia de corrimiento, así como la técnica de autorreferencia del peine para medir dicha frecuencia, en la sección 3 se describe el desarrollo experimental así como los resultados obtenidos, en la sección 4 damos algunas conclusiones y propuestas de trabajo a futuro.

## 2. Medición de la frecuencia de corrimiento por el método de autorreferencia

Ya se ha descrito en diversas publicaciones [1,2] que la ecuación que determina la frecuencia de emisión de uno de los modos del peine de frecuencias ópticas está dado por:

$$\nu_n = n f_r + f_o \quad (1)$$

Donde  $f_r$  es la frecuencia de repetición del peine,  $f_o$  es la frecuencia de corrimiento del peine y  $n$  es un número entero del orden entre  $10^6$  y  $10^7$  dependiendo de la frecuencia de repetición del peine.

### 2.1. Origen de la frecuencia de corrimiento

De [3] se establece que el origen de la frecuencia de corrimiento es la diferencia que existe entre los promedios de las velocidades de fase y de grupo de los pulsos generados dentro de la cavidad del láser de pulsos ultra cortos, en este sentido la frecuencia de corrimiento está dada por :

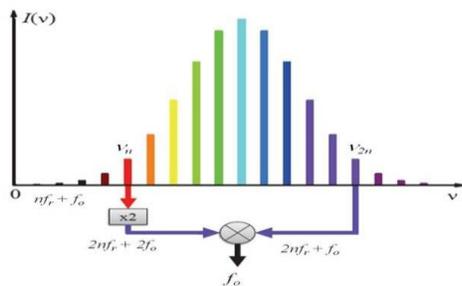
$$f_o = \frac{\omega_m}{2\pi} \left( 1 - \frac{\bar{v}_g}{\bar{v}_p(\omega_m)} \right) \quad (2)$$

Donde  $\bar{v}_g$  es el promedio de la velocidad de grupo del pulso y  $\bar{v}_p(\omega_m)$  el promedio de la velocidad de fase. De esta última ecuación se observa que  $f_o$  es independiente de  $n$ , es decir, es común a todos los modos, pero principalmente su origen se debe a la

diferencia entre los promedios de las velocidades de fase y de grupo dentro del pulso.

**2.2. Medición y control de la frecuencia de corrimiento.**

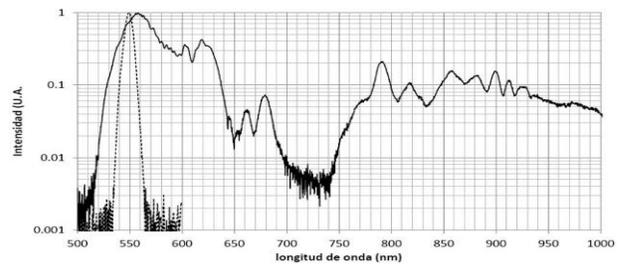
La medición de la frecuencia de corrimiento a partir del método de autorreferencia, en la teoría resulta muy sencillo, basta con doblar en frecuencia un diente del peine de baja frecuencia y compararlo con otro diente del mismo peine a una frecuencia alta cercana al doblado, tal como se muestra en la figura 1. La diferencia de ambas frecuencias nos da la frecuencia de corrimiento. Sin embargo en la práctica esto no es tan sencillo. Lo primero que se debe de garantizar, es tener un peine de frecuencias lo suficientemente ancho que garantice que exista simultáneamente la emisión de una frecuencia baja (rojo) y su doble (azul) (ensanchamiento a una octava). El segundo requisito, es que se pueda hacer una mezcla heterodina con dos pulsos ultra cortos de luz, el reto es hacer coincidir espacial y temporalmente los dos pulsos de luz.



**Fig 1.** Autorreferencia del peine. Se dobla la frecuencia de la región baja del peine y se mezcla con la región alta para obtener la frecuencia de corrimiento  $f_0$

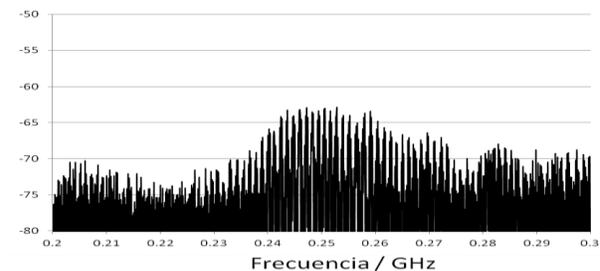
**3. RESULTADOS**

Las exigencias antes mencionadas, necesarias poder detectar y medir la frecuencia de corrimiento se han logrado cumplir para el FC-2. El ensanchamiento de espectro de emisión por medio de una fibra óptica encapsulada de microestructura del FC-2, se presenta en la figura 2, se puede apreciar que se obtiene una emisión que abarca una octava de frecuencias ópticas, la línea punteada es la emisión después del doblado de frecuencia de una región baja del peine. Se puede observar que esta emisión está dentro del espectro del peine de frecuencias por lo que es factible usar el método de autorreferencia para encontrar la frecuencia  $f_0$ .



**Fig 2.** Ensanchamiento de la emisión de pulsos ultracortos a más de una octava, lo que permite usar la técnica de autorreferencia para obtener la frecuencia  $f_0$ .

Por otro lado la mezcla heterodina se obtiene por medio de un interferómetro diseñado y construido en el laboratorio del PNFO, el resultado de la frecuencia de la mezcla que es igual a la frecuencia de corrimiento  $f_0$ , se muestra en la figura 3.



**5. CONCLUSIONES**

Como resultado de las mejoras implementadas al PNFO del CENAM se ha logrado detectar y medir eficientemente la frecuencia de corrimiento del peine FC-2 del PNFO del CENAM, el siguiente paso es tener el control de esta frecuencia y amarrarla en fase al Patrón Nacional de Tiempo, por medio de un lazo de amarre del tipo PID..

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte del CENAM para la realización de este proyecto, así mismo R Gutiérrez agradece al CONACYT por el apoyo económico recibido.

**REFERENCIAS**

[1] Reichert J. *et al.*, *Opt. Commun.*, **172** (1999) 59.  
 [2] Udem Th., Holzwarth R. and Hänsch T. W., *Nature*, **416** (2002) 233.  
 [3] Udem Th., F. Riehle. *Rivista del Nuovo Cimento*, Vol **30** No. 12, (2007).