CAPÍTULO 4

MODULACIÓN ÓPTICA

Las señales de información no siempre pueden ser transmitidas de manera directa por lo que debemos someterlas a un proceso de cambio que se conoce como "modulación" para una adecuada transmisión.

Dependiendo de la naturaleza de la señal y el canal por el que será transmitida, las técnicas de modulación varían ya que se debe tomar en cuenta aquellos parámetros que sean deseables o no durante el manejo de la señal.

Por ejemplo, si nuestra señal de información es de tipo eléctrica debemos considerar que el medio en que la señal es transmitida puede presentar interferencias que comprometan la integridad de nuestra información.

Por otro lado, si nuestra señal es de naturaleza óptica, sabremos que las interferencias electromagnéticas no representan una amenaza para nuestra señal. Sin embargo, sabemos que el medio de transmisión debe ser aquel donde exista la menor pérdida, por ejemplo, la fibra óptica.

La información en forma de luz es dirigida hacia una caja negra que contendrá algún mecanismo que nos permita modificar y/o transformar el haz [14].

Cuando el canal de transmisión es la fibra óptica, la modulación que se lleva a cabo es en base a la intensidad luminosa. En este caso nuestra señal luminosa viajará por una guía de onda que se crea dentro del sensor $LiNbO_3$ debido a la difusión de titanio, de manera que se afectará la fase de nuestra señal modificando la intensidad de la misma.

4.1 Moduladores ópticos

Los sensores electro-ópticos tienen la habilidad de modular la luz, es decir, modificar su intensidad. Para ello, podemos utilizar una señal de control de distintas naturalezas: temperatura, estrés mecánico, campo eléctrico, composiciones químicas cuya reacción modifica los índices de refracción, etc.

El esquema general de un modulador óptico se presenta en la Figura 4.1 donde se puede observar que mediante un estímulo eléctrico la entrada óptica es procesada por el dispositivo para obtener una señal de salida. La Figura 4.2 es más apegada a la estructura del sensor que utilizaremos, ya que mediante una fibra óptica monomodal, se direccionará la luz para ser

modulada bajo el efecto electro-óptico de nuestro sensor y así obtener a la salida nuestra señal modulada.

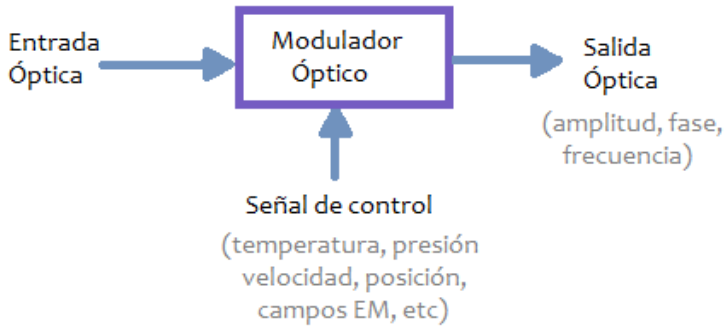

Figura 4.1 Esquema General Modulador Óptico

Existe una configuración de sensores electro-ópticos que consiste en colocar un material de milímetros de grosor entre los electrodos, sin embargo, para una magnitud de campo eléctrico en el orden de Megas ($1x10^6$), se tiene un voltaje inducido del orden de Kilos ($1x10^3$), lo cual hace poco viable el manejo de la información, ya que es ese voltaje representa la señal de nuestro sistema.

La ecuación con la que podemos comprobar lo anterior, es la que define al campo eléctrico (E) en relación a distancia entre electrodos (d) y voltaje inducido (V) se menciona a continuación:

$$E = \frac{V}{d}. \qquad \text{[volts/metro]} \qquad \text{(ec. 4.1)}$$

Para nuestro proyecto, no utilizaremos la configuración mencionada por las razones explicadas. En su lugar, el sensor tendrá una configuración co-planar (Figura 4.2) donde la distancia entre electrodos es del orden de micras; dado que están colocados sobre el material (y no a los extremos), lo cual hace posible la inducción de un campo eléctrico considerablemente alto con el mínimo de voltaje inducido lo cual hace factible la utilización de la señal de salida en etapas posteriores al sensor.

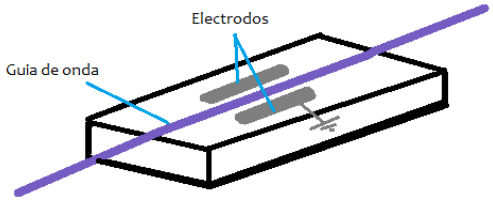

Figura 4.2 Sensor óptico de estructura co-planar

Para este proyecto, una señal de información, proveniente de un generador de funciones, será inyectada a uno de los electrodos. En nuestro sensor LiNbO3, el material de los electrodos es oro, lo cual permite un excelente conductor y no habrá limitaciones en cuanto al voltaje inducido.

En este proyecto utilizaremos la modulación de coherencia que consiste en introducir retardos ópticos entre los paquetes de ondas que emite la fuente luminosa de baja coherencia.

Debido a que la modulación se está llevando a cabo directamente en la onda luminosa, se modifica directamente la fase de la señal, lo que permite alcanzar altas frecuencias.

4.2 Modulación por retardo óptico

Existe la modulación de coherencia luminosa que es un tipo de modulación que permite multicanalización ya que se basa en modificar la fase del haz de luz [2].

Para esta técnica de modulación, generamos los retardos ópticos con una fuente de baja coherencia, los cuales pueden ser portadores de información.

Se requiere también la utilización de dispositivos que sean capaces de introducir retardos ópticos grandes, es decir, debe ser mayor que el tiempo de coherencia de la fuente.

Nuestro campo eléctrico, contendrá la información que queremos modular, es decir, es nuestra señal de información dinámica que variará proporcionalmente la intensidad de la señal luminosa.

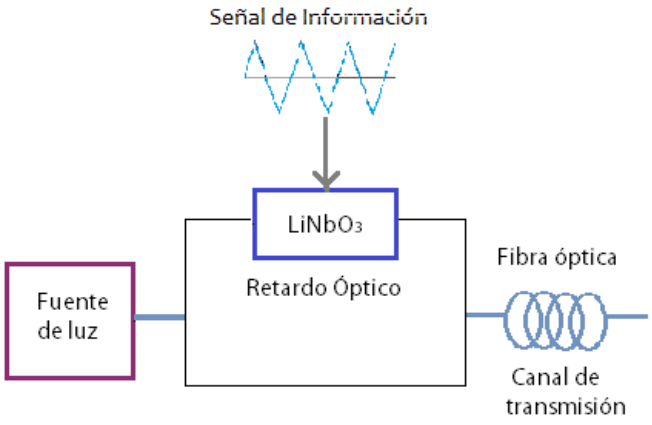

Figura 4.3 Arreglo para modulación de coherencia óptica

Esta relación de proporcionalidad, también depende del efecto electro-óptico que presente el sensor. En este caso es un efecto Pockels, que como ya se mencionó es un efecto lineal en el sensor de Niobato de Litio a utilizar.

De esa manera, facilitamos la recuperación de la información ya que la señal a demodular será una variación lineal de la intensidad óptica recibida.

Podemos definir una onda luminosa con la ecuación 4.2 a continuación, donde la amplitud ($A(t)$) y la fase ($\varphi(t)$) tienen una variación temporal aleatoria,

$$E(t) = A(t)\cos\ (2\pi f(t) + \varphi(t))\ , \qquad \text{(ec. 4.2)}$$

La intensidad promedio, entonces, es descrita con la siguiente ecuación:

$$I(t) = \langle\ |E(t)|^2\ \rangle\ . \qquad \text{(ec. 4.3)}$$

Ya que la función anterior tiene naturaleza estadística o aleatoria. Cuando se tienen dos ondas luminosas superpuestas, nuestra función $E(t)$ será la suma de ambas ondas, por lo que nuestra intensidad promedio corresponderá a la ecuación 4.4 a continuación:

$$I(t) = \langle\ |E(t)|^2\ \rangle = \langle E_1(t)^2\rangle + \langle E_2(t)^2\ \rangle + 2\langle E_1E_2\rangle\ . \qquad \text{(ec. 4.4)}$$

Entonces, la definición de la interferencia en función de la intensidad, se puede describir:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\ \cos\left(\frac{2\omega d}{c}\right). \qquad \text{(ec. 4.5)}$$

Como ya se ha mencionado, sabremos que las dos ondas serán coherentes cuando mantengan una relación de fase y frecuencia constantes.

4.2.1 Interferómetro de Michelson

En este proyecto, los retardos son generados por un interferómetro de división de amplitud, conocido como interferómetro de Michelson (Figura 4.4)

Utilizamos el interferómetro de Michelson ya que nos permitirá estudiar temporalmente la emisión luminosa. Los elementos que conforman al interferómetro son: divisor de haz, dos espejos (uno móvil y otro fijo), detector y la fuente óptica.

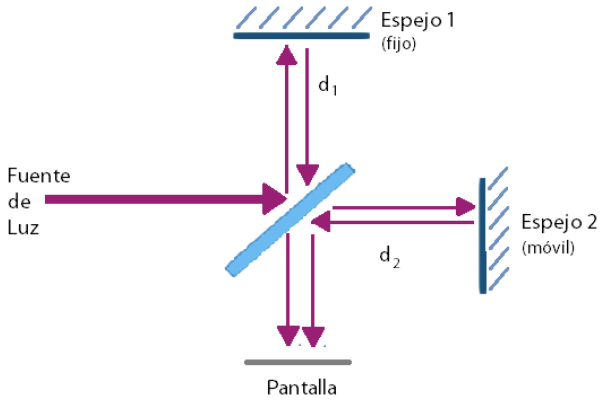

Figura 4.4 Interferómetro de Michelson

Para generar un retardo óptico, sólo basta con desplazar uno de los espejos, aumentando o disminuyendo la diferencia en el camino óptico. De esta manera, la intensidad de la señal emitida por la fuente de luz es separada, una parte de la onda (50%) viajará hacia arriba y el otro 50% a la derecha, al momento de reflejarse cada una con sus respectivos espejos estas ondas pasarán nuevamente por el divisor de haz y reflejadas hacia el detector donde ambas ondas son superpuestas.

A la salida del interferómetro, obtendremos una señal que será la suma de ambas intensidades provenientes de cada reflexión de los espejos y es descrita por la ecuación 4.5, cuando la intensidad en ambos brazos es la misma, podemos simplificar la ecuación y obtener:

$$I = 2I_1 \left(1 + \cos\left(\frac{2\omega d}{c}\right)\right). \qquad \text{(ec. 4.6)}$$

Podemos relacionar esta diferencia de camino (d) con el retardo óptico de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{2d}{c} \ . \qquad \text{(ec. 4.7)}$$

Lo que nos lleva a interpretar la ecuación 4.6 como la siguiente ecuación:

$$I = 2I_1 \, (1 + \cos(\omega\tau)). \qquad \text{(ec. 4.8)}$$

Para efectos de transmisión, el retardo introducido (τ_0) debe ser mayor que el tiempo de coherencia de la fuente (τ_c). (ver Figura 4.5)

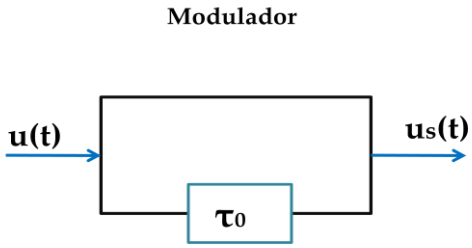

Figura 4.5 Arreglo de modulación

Debido al proceso de retardo que se explicó, sabemos que la salida del bloque modulador podemos definirla como:

$$Us(t) = \frac{1}{2}\, u(t) + \frac{1}{2}\, u(t - \tau_0)\ . \qquad \text{(ec. 4.9)}$$

El mensaje es codificado alrededor de esta valor τ_0, que cuando sea modulado por una señal de información que varía en el tiempo (v(t)) obtendremos un valor de retardo modulado que corresponderá a :

$$\tau_m = \tau_0 + \Delta\tau(t). \qquad \text{(ec. 4.10)}$$

Siendo:

$$\Delta\tau(t) = K\, v(t)\ . \qquad \text{(ec. 4.11)}$$

Simplificando entonces, la ecuación 4.9 que ahora se puede presentar como:

$$Us(t) = \frac{1}{2}\, u(t) + \frac{1}{2}\, u(t - \tau_m)\ . \qquad \text{(ec. 4.12)}$$