

## Línea de retardo sintonizable eléctricamente para trenes de pulsos ópticos basada en el efecto de autoimagen temporal

### Electrically tunable delay line for trains of optical pulses based on the temporal self-imaging effect

Santiago Tainta<sup>(1)</sup>, María J. Erro<sup>(1)</sup>, María J. Garde<sup>(1)</sup>, Miguel A. Muriel<sup>(2)</sup>

1. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadía, Los Tejos, E-31006 Pamplona, Spain.

2. Departamento de Tecnología Fotónica, ETSIT, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria, 28040, Madrid, Spain.

<sup>(\*)</sup> Email: [mjose.erro@unavarra.es](mailto:mjose.erro@unavarra.es)

Recibido / Received: 15/09/2011. Revisado / Revised: 17/11/2011. Aceptado / Accepted: 25/11/2011.

#### RESUMEN:

En este artículo se presenta una nueva técnica para la realización de una línea de retardo para trenes de pulsos ópticos ultracortos basada en dispositivos habituales en enlaces de fibra óptica. El sistema está basado en la introducción, mediante un modulador electro-óptico, de una fase lineal a un tren de pulsos de entrada para su posterior dispersión consiguiéndose el efecto de autoimagen temporal en fibra. La sintonía eléctrica del retardo introducido se consigue mediante la variación de la pendiente de la señal eléctrica aplicada en el modulador, obteniéndose una sintonía continua a lo largo de todo el periodo de la señal. Dada la imposibilidad práctica de realizar un generador lineal cuya salida no esté limitada en el tiempo, se propone el uso de una señal rampa, reduciéndose por tanto el rango de sintonía a un conjunto de valores discretos para evitar la deformación del tren de pulsos a la salida del sistema. Resultados obtenidos por simulación prueban la validez del esquema propuesto.

**Palabras clave:** Trenes de Pulsos Ópticos, Línea de Retardo Óptica, Efecto Autoimagen Temporal, Redes de Difracción en Fibra.

#### ABSTRACT:

In this paper, a novel technique to implement a tunable optical delay line for trains of ultrashort optical pulses is presented. The system is based on the introduction, by means of an electro-optic modulator, of a linear phase to the input train of pulses and the application of second order dispersion to obtain the temporal self-imaging effect. The electrical tunability of the introduced delay is achieved by varying the slope of the electrical signal applied to the modulator, obtaining a continuous tunable range along the whole input period. Due to the impossibility of generating an infinite linear signal, the use of a ramp signal is proposed, reducing thus the tunability range only to a discrete set of values to avoid the deformation of the pulses at the output of the system. Simulation results are presented that show the validity of the proposed setup.

**Key words:** Trains of Optical Pulses, Optical Delay Line, Self-Imaging Temporal Effect, Fiber Bragg Gratings.

#### REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. D. Cotter, R. J. Manning, K. J. Blow, A. D. Ellis, A. E. Kelly, D. Nasset, I. D. Phillips, A. J. Poustie, D. C. Rogers, "Nonlinear optics for high-speed digital information processing", *Science* **286**, 1523–1528 (1999).
- [2]. Z. Jiang, D. E. Leaird, A. M. Weiner, "Line-by-line pulse shaping control for optical arbitrary waveform generation", *Opt. Express* **13**, 10431–10439 (2005).

- [3]. R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, "Routing and wavelength assignment in all-optical networks", *IEEE ACM T. Network* **3**, 489-500 (1995).
- [4]. T. Tanemura, I. M. Soganci, T. Oyama, T. Ohyama, S. Mino, K. A. Williams, N. Calabretta, H. J. S. Dorren, Y. Nakano, "Large-capacity compact optical buffer based on InP integrated phased-array switch and coiled fiber delay lines", *J. Lightwave Technol.* **29**, 396-492 (2011).
- [5]. X. Liu, M. J. Cobb, X. Li, "Rapid scanning all-reflective optical delay line for real-time optical coherence tomography", *Opt. Lett.* **29**, 80-82 (2004).
- [6]. E. Choi, J. Na, S. Y. Ryu, G. Mudhana, B. H. Lee, "All-fiber variable optical delay line for applications in optical coherence tomography: feasibility study for a novel delay line", *Opt. Express* **13**, 1334-1345 (2005).
- [7]. G. N. Pearson, K. D. Ridley, D. V. Willetts, "Chirp-pulse-compression three dimensional lidar imager with fiber optics", *Appl. Opt.* **44**, 257-265 (2005).
- [8]. J. Cardenas, M. A. Foster, N. Sherwood-Droz, C. B. Poitras, H. L. R. Lira, B. Zhang, A. L. Gaeta, J. B. Khurgin, P. Morton, M. Lipson, "Wide-bandwidth continuously tunable optical delay line using silicon microring resonators", *Opt. Express* **18**, 26525-26553 (2010).
- [9]. A. Melloni, A. Canciamilla, C. Ferrari, F. Morichetti, L. O'Faolain, T. F. Krauss, R. De La Rue, A. Samarelli, M. Sorel, "Tunable delay lines in silicon photonics: Coupled resonators and photonic crystals, a comparison", *IEEE Photonics J.* **2**, 181-194 (2010).
- [10]. K. Y. Song, M. G. Herráez, L. Thévenaz, "Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering", *Opt. Express* **13**, 82-89 (2005).
- [11]. N. Alic, E. Myslivets, S. Moro, B. P.-P. Kuo, R. M. Jopson, C. J. McKinstrie, S. Radic, "Microsecond parametric optical delays", *J. Lightwave Technol.* **28**, 448-454 (2010).
- [12]. C. Caucheteur, A. Mussot, S. Bette, A. Kudlinski, M. Douay, E. Louvergneaux, P. Mégret, M. Taki, M. González-Herráez, "All-fiber tunable optical delay line", *Opt. Express* **18**, 3093-3100 (2010).
- [13]. M. A. Muriel, J. Azaña, A. Carballar, "Real-time Fourier transformer based on fiber gratings", *Opt. Lett.* **24**, 1-3 (1999).
- [14]. J. Azaña, M. A. Muriel, "Temporal Talbot effect in fiber gratings and its applications", *Appl. Opt.* **38**, 6700-6704 (1999).

## 1. Introducción

Las líneas de retardo ópticas son elementos de crucial importancia en diferentes aplicaciones tales como el procesado óptico de señal [1,2], la realización de buffers y elementos de sincronía en sistemas de comunicaciones ópticas [3,4], en instrumentos OCT (*Optical Coherence Interferometry*) [5,6] o en aplicaciones de sensado [7].

En consecuencia, en los últimos años, se han desarrollado diferentes técnicas para la realización de líneas de retardo todo ópticas, en las que, a ser posible, se consigan altos retardos en anchos de banda importantes y con la posibilidad de sintonizar el valor de retardo introducido de manera continua. Para esta sintonía del valor de retardo introducido por el dispositivo, se emplean técnicas que pueden agruparse en dos grandes categorías. Por un lado, están aquellas que se basan en el efecto conocido como "luz lenta", esto es, en conseguir reducir la velocidad de propagación de la luz en

varios órdenes de magnitud [8-10]. Para ello se emplean guías de onda basadas en cristales fotónicos o elementos resonantes. En este caso, la sintonía se consigue variando el índice de refracción efectivo, mediante temperatura o presión habitualmente, o explotando efectos no lineales de la estructura. Por otro lado, el segundo grupo de líneas de retardo emplea elementos dispersivos, como la fibra o redes de difracción Bragg con chirp, cuyo retardo depende de la longitud de onda, que se deben acompañar de técnicas para la conversión de longitud de onda y para evitar la distorsión en la forma de las señales retardadas [11,12].

En este trabajo, se presenta una técnica diferente para conseguir una línea de retardo integrada en fibra y que no emplea elementos resonantes. Esto permite, por tanto, que la línea pueda ser de alto ancho de banda y se evita además la necesidad de emplear elementos no lineales para la conversión en longitud de onda. El retardo introducido se consigue mediante la

modulación con una señal eléctrica, lo que permite la sintonía del mismo modificando únicamente dicha señal.

## 2. Fundamento teórico

El sistema propuesto operará sobre trenes de pulsos ópticos ultracortos y permitirá la introducción de un retardo controlado sobre los mismos. Dicho retardo será sintonizable mediante la aplicación de una modulación en fase lineal con el tiempo, de forma que, al variar la pendiente de la misma, se obtendrán diferentes retardos en el tren de pulsos de salida.

Para modelar el sistema se tomará como entrada un tren de pulsos ópticos ultracortos. Dado que la duración de estos pulsos,  $\Delta t$ , será mucho menor que su periodo de repetición,  $T_0$ , ( $\Delta t \ll T_0$ ), la envolvente compleja de este tren de pulsos,  $x_1(t)$ , podrá modelarse por un tren de deltas de Dirac equiespaciadas en el tiempo:

$$x_1(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_0), \quad (1)$$

donde  $T_0$  es el periodo de repetición de los pulsos. Este tren de pulsos será modulado en fase, empleándose para ello una señal lineal con el tiempo, lo que resultará en el tren de pulsos  $x_2(t)$ :

$$x_2(t) = \exp(-jCt) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_0), \quad (2)$$

siendo  $C$  una constante que define la pendiente de la señal aplicada al modulador de fase óptico. Esta señal resultante de la modulación se introducirá a un medio dispersivo, cuya respuesta impulsional,  $h(t)$ , podrá expresarse como [13]:

$$h(t) = H_0 \sqrt{\frac{1}{2\ddot{\phi}j}} \exp\left(j \frac{t^2}{2\ddot{\phi}}\right), \quad (3)$$

siendo  $H_0$  una constante relacionada con las pérdidas de inserción de este elemento dispersivo y  $\ddot{\phi}$  la dispersión introducida. Esta dispersión será elegida para que se produzca el efecto de autoimagen temporal tomándose como parámetros  $m=1$  y  $s=1$ , definidos como se hace en [14]. Dicha dispersión se corresponde con:

$$\ddot{\phi} = \frac{T_0^2}{2\pi}, \quad (4)$$

Al aplicar esta dispersión a un tren de pulsos no modulados en fase, la salida se correspondería con otro tren de pulsos cuya periodicidad sería también  $T_0$  pero retardado  $T_0/2$ . Sin embargo, en nuestro caso en el que sí se incluye la modulación lineal en fase, la salida del sistema,  $x_3(t)$ , vendrá dada por la convolución entre (2) y (3):

$$x_3(t) = h(t) * x_2(t) = \int_{\tau=-\infty}^{+\infty} h(t - \tau)x_2(\tau)d\tau. \quad (5)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (5) y operando, se demuestra que la salida del sistema del sistema podrá ser expresada como:

$$x_3(t) \propto \exp\left(j \frac{t^2}{2\ddot{\phi}}\right) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - \Delta t - kT_0), \quad (6)$$

con:

$$\Delta t = \frac{T_0}{2} \left(1 + \frac{C}{\pi} T_0\right). \quad (7)$$

Por tanto, se observa que a la salida del sistema se obtendrá un tren de pulsos cuyo periodo de repetición será el mismo que el del tren de pulsos a la entrada. Sin embargo, en este caso al retardo introducido por el efecto de autoimagen causado con el término dispersivo,  $T_0/2$ , se añade un nuevo término que no es fijo sino que depende linealmente de la pendiente de la fase introducida por el modulador,  $C$ .

## 3. Sistema propuesto

En la Fig. 1 puede verse el esquema del sistema propuesto. Un láser enganchado en fase (MLL, *Mode Locked Laser*) generará un tren de pulsos ópticos con un periodo de repetición  $T_0$ . Dichos pulsos serán modulados usando un modulador de fase electro-óptico cuyo voltaje de media onda vendrá dado por  $V_\pi$ . A la entrada de este modulador se aplicará una señal eléctrica que realizará una modulación lineal de fase. Para finalizar, el tren de pulsos modulados pasará por una red Bragg Linealmente Chirpeada (LC-FBG: *Linearly Chirped-Fiber Bragg Grating*) donde se introducirá la dispersión dada por (4) para que se produzca el efecto de autoimagen en fibra.

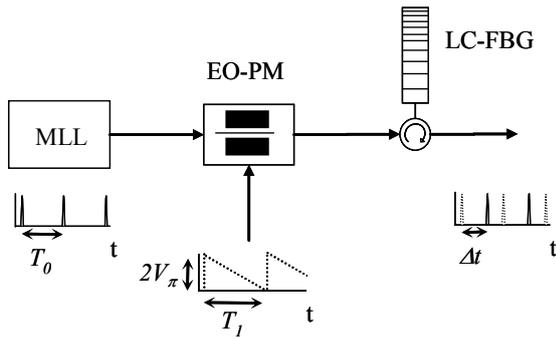


Fig. 1. Esquema propuesto para el sistema de sintonía del desfase. (MLL: Mode Locked Laser, EO-PM: Electro Optical-Phase Modulator, LC-FBG: Linearly Chirped-Fiber Bragg Grating).

Como ya se ha demostrado en el apartado anterior, a la salida de este sistema se obtendrá un retardo en el tren de pulsos de salida que será proporcional a la pendiente de la fase aplicada. Sin embargo, la generación de una señal eléctrica lineal en el tiempo no es posible excepto dentro de un intervalo temporal finito. Por ello, será necesario sustituir dicha señal por una señal de rampa cuya amplitud vendrá determinada por  $2V_{\pi}$ . Esta señal, dada la periodicidad inherente a la modulación en fase, será equivalente a una modulación lineal en la que la pendiente vendrá definida por:

$$C = \pm \frac{2\pi}{T_1}, \quad (8)$$

donde  $T_1$  es el periodo de repetición de la señal rampa y el signo de la pendiente dependerá del sentido en el cual se genera la rampa. Por tanto, el retardo introducido vendrá dado por:

$$\Delta t = \frac{T_0}{2} \left( 1 \pm \frac{T_0}{T_1} \right), \quad (9)$$

donde se puede observar que el retardo introducido presentará un factor fijo de  $T_0/2$  proveniente del efecto de autoimagen en fibra y una parte variable cuyo valor será directamente proporcional a la relación entre el periodo de entrada y el periodo de la señal moduladora. Además, en función del signo de la pendiente introducida podrán obtenerse valores de retardo tanto positivos como negativos, permitiendo la sintonía en ambos casos a lo largo de todo el periodo de bit.

#### 4. Resultados

Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema propuesto, se han realizado un conjunto de simulaciones usando el software comercial Optisim™. Como fuente pulsada se ha empleado un láser enganchado en fase con una frecuencia de repetición de 10 GHz y una forma de pulsos gaussiana con una anchura temporal de 5 ps y potencia de pico de 10 mW. La longitud de onda central del láser se eligió en 1550 nm. La señal de salida del láser pulsado se modula usando un modulador electro-óptico de fase con ancho de banda de 12.5 GHz, pérdidas de inserción de 3dB y voltaje de media onda de 5V. Por tanto, la señal de rampa tendrá una amplitud de 10 V y su frecuencia se variará entre 0.5 y 10 GHz para ver el efecto del retardo sobre la señal. La rampa se tomará tanto positiva como negativa, mostrándose resultados para ambos casos.

La señal modulada es dispersada usando una red Bragg con chirp lineal. La longitud de la red es 12,3 cm y para suavizarla se ha usado un taper con forma tangente hiperbólica y  $\alpha = 4$ . La respuesta en frecuencia de dicha red, calculada mediante simulación usando la teoría de acoplo de modos, puede verse en la Fig. 2, donde se observa que tiene una dispersión de aproximadamente 1590 ps<sup>2</sup> (de acuerdo con (4) para  $T_0=1/10$  GHz) y un ancho de banda de entorno a 0.8 nm.

En la Fig. 3 pueden verse los trenes de pulsos a la entrada y a la salida del sistema cuando no se aplica ninguna señal al modulador de fase. En este caso se obtiene un efecto de autoimagen temporal en fibra, correspondiendo la salida a

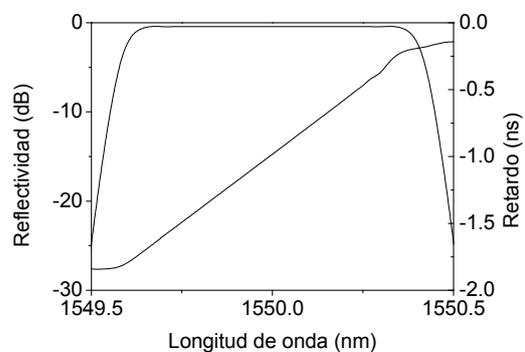


Fig. 2. Respuesta en retardo y amplitud de la red Bragg usada para la simulación.

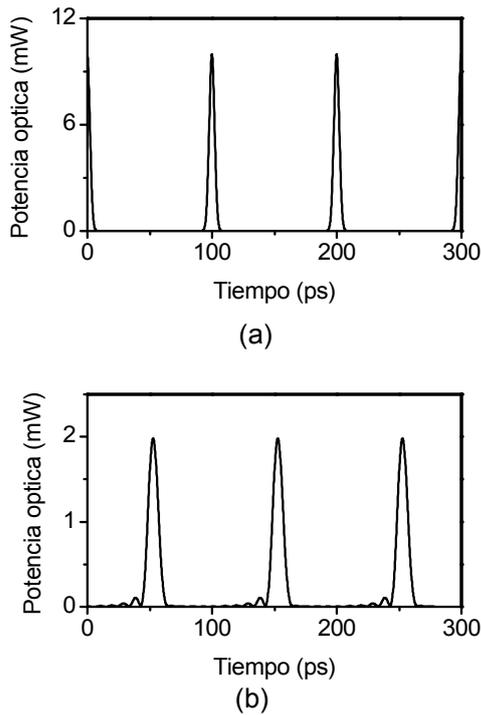


Fig. 3. Tren de pulsos (a) a la entrada del sistema y (b) a la salida del sistema al no aplicarse modulación de fase.

un tren de pulsos ópticos con la misma frecuencia de repetición que el tren de entrada y un retardo adicional de  $T_0/2$ . Idealmente, la forma de los pulsos a la salida del sistema no se verá afectada excepto por un factor de atenuación introducido por las pérdidas de inserción del modulador de fase y el elemento dispersivo. Sin embargo, puede observarse que en este caso, la forma de los pulsos se ha visto modificada, produciéndose una deformación de los mismos. Estas deformaciones tienen sus causas principales en el filtrado introducido por la red Bragg empleada y en las no idealidades existentes en la dispersión de segundo orden aplicada (retardo de grupo lineal), principalmente el rizado de dicho retardo de grupo.

En la Fig. 4 se puede ver la salida del sistema una vez añadido el efecto de la modulación de fase para diferentes valores de frecuencia de la señal rampa, usando pendientes tanto positivas como negativas. Como se puede observar, en ambos casos los pulsos a la salida han sido retardados a lo largo de todo el periodo de la señal de entrada, siendo el retardo proporcional al periodo de la señal moduladora. Sin embargo,

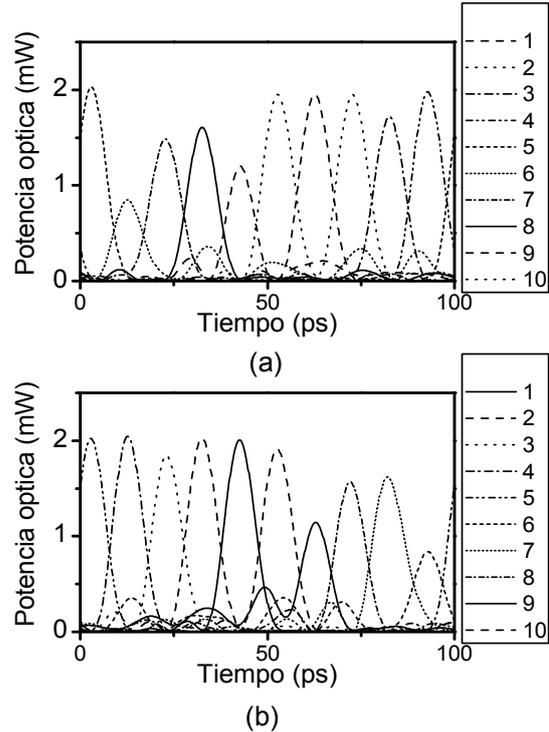


Fig. 4. Pulsos retardados a la salida del sistema para diferentes frecuencias de la señal moduladora (indicados en las leyendas de las figuras en GHz) con (a) pendiente positiva o (b) pendiente negativa en la rampa.

se observa que para algunos valores de retardo, la forma de los pulsos se ha visto distorsionada por la aparición de colas, resultando en grandes variaciones de la potencia de pico en cada uno de los casos. Esta distorsión es especialmente acusada en valores elevados de frecuencia y su causa es la transición existente en la señal rampa al final de cada periodo de la señal eléctrica. Dicha transición, aunque idealmente es instantánea, en nuestro sistema tendrá una duración no nula que vendrá limitada por el ancho de banda del modulador de fase empleado. Esto provoca, durante la comentada transición, la modulación de un conjunto de valores intermedios de fase que no se corresponden con una modulación lineal, lo que resulta en la distorsión de los pulsos a la salida del sistema.

Para evitar dicha distorsión, será necesario evitar las zonas de transición, situando para ello los pulsos ópticos en la zona lineal de la señal eléctrica aplicada. Esto se puede conseguir limitando el periodo de la señal rampa a

múltiplos enteros del periodo del tren de pulsos original:

$$T_1 = kT_0, \quad (10)$$

donde  $k$  es un número entero. De esta forma, los pulsos se encontrarán siempre en la zona lineal, obteniéndose un retardo temporal total a la salida del sistema que será inversamente proporcional a  $k$ :

$$\Delta t = \frac{T_0}{2} \left( 1 \pm \frac{2}{k} \right). \quad (11)$$

Así, variando  $k$ , se podrá conseguir la sintonía del sistema evitando la deformación de los pulsos a la salida del mismo. Sin embargo, al imponer esta limitación a la frecuencia de la señal moduladora, los valores de retardo que se podrán conseguir estarán limitados a una serie de valores discretos dados por  $k$  (que ha de ser un número entero). Esta limitación podría evitarse mediante el uso de un generador de forma de onda arbitraria, con el cual se podría introducir un valor de desfase discreto a cada pulso de forma equivalente a una señal rampa ideal.

La salida del sistema en varios casos, todos ellos para valores permitidos de  $T_1$  ( $k$  entero), puede verse en la Fig. 5. Al haber limitado el periodo de repetición de la señal a un múltiplo del periodo del tren de entrada, no existirá la distorsión de los pulsos de salida dependiente de la frecuencia que se podía ver en la Fig. 4. Sin embargo, la forma de los pulsos seguirá viéndose modificada por la red Bragg empleada, resultando en una deformación similar a la observada cuando no se aplica modulación (Fig. 3).

Asimismo, se puede observar cómo el retardo introducido es inversamente proporcional al parámetro  $k$  elegido y, por tanto, directamente proporcional a la frecuencia de la señal rampa, tal y como se había previsto en (11). Al igual que en el caso anterior, el signo del retardo obtenido dependerá de la pendiente aplicada por la señal rampa, pudiendo obtenerse retardos tanto positivos como negativos. Sin embargo, al estar ahora la sintonía limitada a una serie de valores discretos de retardo, para cada uno de los signos de la señal rampa únicamente se podrá retardar el pulso hasta la mitad del periodo de bit. Será

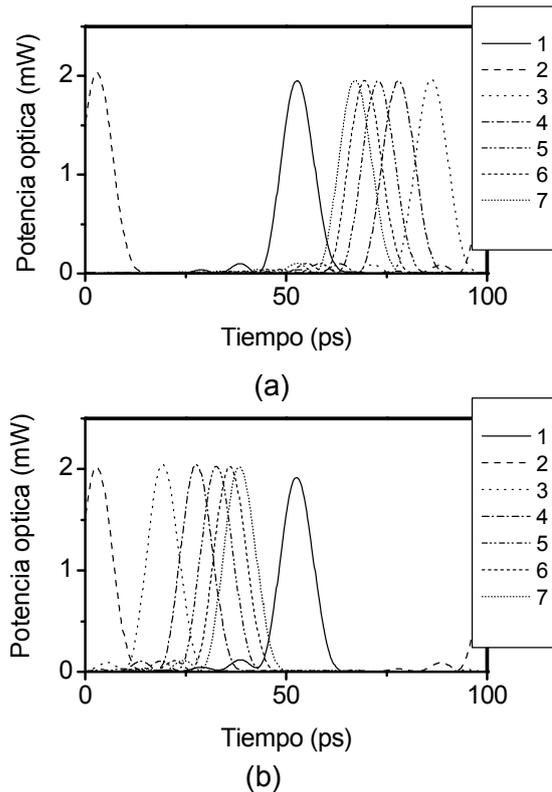


Fig. 5. Pulsos retardados a la salida del sistema para varios valores de  $k$  empleando (a) pendiente positiva o (b) pendiente negativa en la rampa.

por tanto necesario emplear ambas pendientes para poder sintonizar el pulso dentro de un periodo completo de bit. Esto puede verse en la Fig. 6(a), donde se presenta el retardo introducido en la simulación en función de la frecuencia de la señal moduladora una vez eliminado el término  $T_0/2$  debido al efecto de autoimagen en fibra. Se puede ver que, para obtener un rango de sintonía de todo el bit, esto es de 100 ps, es necesario usar ambas rampas, positiva y negativa, con frecuencias inferiores a los 5 GHz, para que cada una de ellas cubra 50 ps.

Para finalizar, puede observarse que, de forma adicional a la deformación producida por el efecto de autoimagen en fibra, los pulsos a la salida presentan además una pequeña variación en la potencia de pico dependiente con el retardo aplicado. Dicha variación puede verse en la Figura 6b y su valor es siempre inferior a un 5% sobre el valor de pico total. La principal causa de esta variación es la limitación en el ancho de banda impuesto por la red Bragg, pudiendo por tanto reducirse si se aumenta el ancho de banda del medio dispersivo empleado.

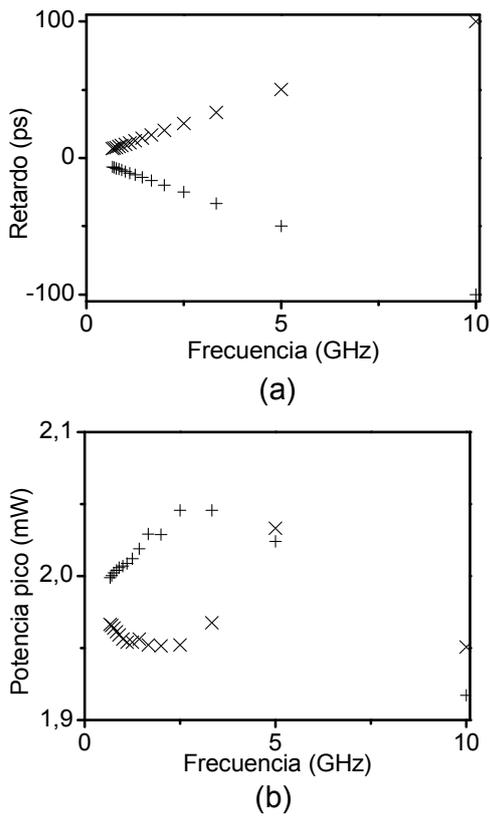


Fig. 6. (a) Retardo medido en simulación a la salida del sistema para diferentes frecuencias de la señal moduladora y (b) variación de la potencia de pico.

## 5. Conclusión

Se ha propuesto un nuevo sistema que actúa como línea de retardo para un tren de pulsos ópticos. El sistema está basado en una

modulación lineal de la fase con un dispositivo electro-óptico para posteriormente dispersar la señal modulada usando el efecto de autoimagen temporal en fibra para replicar el tren de pulsos incluyendo un retardo del mismo. La variación de este retardo es sencilla, pues necesita tan sólo la variación de la pendiente de la señal eléctrica aplicada al modulador. Ahora bien, dada la imposibilidad práctica de realizar una modulación lineal de la fase infinita, se ha propuesto el uso de una señal de rampa periódica. Esto ha supuesto que, para evitar la distorsión de los pulsos de salida, se limite el rango de frecuencias que se pueden emplear, reduciéndose el rango de sintonía de la línea de retardo a una serie de valores discretos en todo el periodo de bit, pero simplificando la implementación física del sistema. Por último, se han mostrado resultados de simulación que muestran la validez del sistema propuesto, consiguiéndose diferentes valores de retardo dependientes de la frecuencia de la señal rampa usada y de su pendiente y permitiendo, por tanto, la sintonía eléctrica del retardo introducido.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos CICYT TEC2010-21303-C04-01 y 02.