

# Análisis de efectos de propagación a través de una fibra monomodo para señales moduladas en intensidad

**Natalia Arboleda-Alzate y Ferney Amaya Fernández**

*natalia.arboledaal@alfa.upb.edu.co,*

*ferney.amaya@upb.edu.co*

*Facultad de Ingeniería en Tecnologías*

*de la Información y Comunicación*

*Universidad Pontificia Bolivariana*

*Medellín, Colombia*

## **Resumen**

Al notar la importancia del estudio de los fenómenos que actualmente limitan el desempeño de las redes de comunicaciones ópticas, el presente trabajo está dedicado al análisis de la dispersión cromática y el efecto Kerr en la propagación de una señal óptica modulada en intensidad. La dispersión cromática y el efecto Kerr son los efectos que afectan el desempeño, a las distancias y tasas de bits de las redes ópticas actuales. Para este análisis, la Ecuación No lineal de Schrödinger se resuelve numéricamente empleando un método numérico en el dominio del tiempo. En este caso, el efecto de la dispersión y el efecto Kerr son considerados en forma independiente. Se observa un incremento del efecto de la dispersión al incrementar la tasa de bits, limitando la máxima longitud de la fibra óptica. Para el efecto Kerr, se

observa una dependencia de la longitud de la fibra y una independencia de la tasa de bits. En las simulaciones se emplean parámetros de la fibra y valores de tasas de bits empleados en enlaces comerciales.

**Palabras Clave:** *Enlaces ópticos, Propagación de señales ópticos, Dispersión, Efectos no lineales, Efecto Kerr.*

### **Abstract**

Noting the importance of studying the phenomena that currently limit the performance of optical communication networks, this paper is devoted to the analysis of chromatic dispersion and Kerr effect in the propagation of an optical signal modulated in intensity. Both the chromatic dispersion and the Kerr effect affect the performance, maximum distances and bit rates of the current optical networks. For this analysis, Nonlinear Schrödinger equation is solved numerically using a numerical method in the time domain. In this case, the effect of the dispersion and the Kerr effect are considered independently. An increase was seen of the dispersion effect by increasing the bit rate, limiting the maximum length of optical fiber. For the Kerr effect, there is a dependence on fiber length and independent of the bit rate. For the simulations, commercial fiber parameters and bit rate values were used.

**Keywords:** *optical links, optical signal propagation, dispersion, nonlinear effects, Kerr effect.*

## **I. Introducción**

---

Debido al constante crecimiento en tráfico en las redes de comunicaciones actuales, y la creciente demanda de los usuarios a contenido a altas tasas de transmisión, el uso de fibra óptica se ha incrementado en las redes de telecomunicaciones actuales, convirtiéndose en el medio de transmisión que ofrece la mayor tasa de bits y alcance, considerando la tecnología actual. La gran capacidad ofrecida por la fibra óptica hace que sea el único medio de transmisión empleado en las redes de gran capacidad y alcance en el *backbone* de la red. Sin embargo, se ha vuelto cada vez más importante encontrar métodos que permitan incrementar aún más la capacidad de las redes ópticas, debido al incremento en el número de usuarios que accede a Internet y al consecuente aumento en sus requerimientos. Esto, considerando que la máxima tasa de bits y alcance que puede obtenerse están limitados por los diferentes efectos de propagación de las señales a través de la fibra óptica.

Los efectos de propagación producen interferencia intersimbólica cuando se transmiten señales digitales, afectando el BER (*Bit Error Rate*) y en general el desempeño del sistema, limitando la tasa de bits y la distancia de transmisión. Por esta razón la compensación de los efectos de propagación a través de la fibra óptica,

se ha convertido en el siguiente paso para lograr un incremento significativo en la capacidad de los sistemas de telecomunicaciones ópticos.

Los principales efectos de propagación a través de una fibra óptica son la atenuación, la dispersión, las no linealidades y el efecto de la birrefringencia de la fibra óptica. La atenuación puede compensarse mediante amplificación óptica. A las tasas de transmisión y distancias empleadas por los sistemas de comunicaciones actuales, la dispersión y el efecto Kerr (efecto no lineal), son los efectos que influyen en gran medida en el desempeño en un sistema de comunicaciones óptico.

Por esta razón, diversos trabajos se han enfocado al estudio de los efectos de propagación a través de modelos matemáticos y herramientas de simulación. En “Compensación de la dispersión cromática usando ecualización LMS” [1] los autores realizaron el estudio de un canal óptico con señales moduladas en intensidad, considerando el efecto de la dispersión cromática. El modelo matemático utilizado incluyó únicamente la dispersión cromática mediante el uso del Método Analítico y este efecto se compensó mediante ecualización adaptativa. La simulación se llevó a cabo para tasas de transmisión de hasta 40 Gbps y distancias máximas de 100 km. En [2] el autor utiliza el Método Analítico para obtener filtros digitales que modelan un canal óptico dispersivo con el objetivo de compensar su efecto. El artículo resume los principios de los receptores ópticos coherentes y presenta resultados experimentales de compensación de dispersión para transmisiones de 10.7 GBaudios. En [3] los autores proponen un filtro IIR (Respuesta al Impulso Infinita) que se obtiene a partir de la Función de Transferencia para compensar los efectos de la dispersión cromática en sistemas ópticos con detección homodina. Se presenta una reducción en el número de coeficientes con respecto a filtros FIR (Respuesta al Impulso Finita), alcanzando 160 km para tasas de transmisión de 10 Gbps. En [4] se realiza un análisis teórico de los efectos de dispersión y no lineales en un sistema de comunicaciones óptico y se comparan los resultados con simulaciones obtenidas a partir del algoritmo *Split-Step Fourier* (SSF).

En el presente artículo se realiza el análisis de la dispersión cromática y del efecto Kerr en la propagación de una señal óptica modulada en intensidad, para diferentes tasas de bits, en una fibra óptica monomodo. Para este análisis se realiza una simulación, resolviendo numéricamente la ecuación no lineal de Schrödinger, empleando un método numérico en el dominio del tiempo [5]. El análisis considera los efectos en forma independiente y tiene como objetivo observar el impacto de cada efecto sobre la tasa de bits y la longitud de la fibra óptica.

En la sección 2 se presentan dos modelos de efectos de propagación a través de la fibra óptica. En este caso se presentan el método analítico y el método numérico en el dominio del tiempo. Ambos métodos permiten simular la ecuación no lineal de Schrödinger que modela la propagación de ondas a través de la fibra. En la sección



3 se presentan los resultados de simulación y el análisis de resultados para diferentes tasas de bits y longitudes de fibra. Finalmente, se brindan las conclusiones.

Este artículo presenta un modelo que puede ser empleado para analizar los efectos de propagación y posteriormente lograr compensarlos.

## II. Modelos de propagación en fibras ópticas

Se abordan aquí dos alternativas para el modelado de la propagación de ondas a través de la fibra óptica: el método analítico y el método numérico en el dominio del tiempo.

Tanto la dispersión como los efectos no lineales pueden ser considerados al usar la ecuación no lineal de Schrödinger (*Non-Linear Schrödinger Equation*, NLSE) (1), la cual gobierna la propagación de una señal óptica a través de una fibra monomodo [6]:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = -j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A(z,t)}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A(z,t)}{\partial t^3} + j\gamma e^{-\alpha z} |A(z,t)|^2 A(z,t), \quad (1)$$

donde  $A(z,t)$  denota la envolvente de la señal, que para el caso de comunicaciones digitales se modela como un pulso gaussiano,  $\alpha$  es la constante de atenuación,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  son los parámetros de dispersión de segundo y tercer orden respectivamente y  $\gamma$  es el parámetro no lineal. Los parámetros de atenuación, dispersión y de no linealidad varían dependiendo del tipo de fibra óptica empleada.

La solución de la NLSE debe realizarse empleando métodos numéricos, siendo el método SSF uno de los más empleados [6], el cual separa la ecuación en dos operadores, uno lineal y uno no lineal, los cuales toman efecto alternativamente sobre una longitud infinitesimal de la fibra  $\Delta z$ . De esta forma, la NLSE puede expresarse en función de los operadores de la siguiente forma:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = (N + D)A(z,t), \quad (2)$$

donde los operadores se definen como:

- $D = -j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3}, \quad (3)$

- $N = j\gamma e^{-\alpha z} A^2. \quad (4)$

Ambos operadores incorporan cada efecto respectivamente,  $D$  representa la dispersión, y  $N$  el efecto Kerr, que ocurren durante la propagación. El método SSF consiste en considerar que los efectos actúan en forma independiente sobre  $\Delta z$ , de manera que sólo uno de los operadores se aplique a la vez. De esta manera, en la primera mitad de  $\Delta z$  únicamente se incluye la dispersión ( $N=0$ ) y sobre la segunda mitad sólo actúan los efectos no lineales ( $D=0$ ). Este proceso se repite sobre toda la longitud de la fibra.

## A. Método analítico

La solución de cada uno de los operadores  $D$  y  $N$  representa respectivamente la dispersión cromática y el efecto Kerr, efectos de propagación a los que se ve sometida una señal óptica. El método analítico consiste en encontrar la solución de (1) con el objetivo de encontrar la función de transferencia de cada uno de los efectos independientes. Para esto se realiza una separación de variables, después de lo cual es posible determinar que ambas funciones de transferencia están dadas por:

$$H(z, \omega) = \exp\left(j \frac{\beta_2}{2} \omega^2 z - \frac{\beta_3}{6} \omega^3 z\right), \quad (5)$$

$$A(z, \eta) = A_0(\eta) \exp(j\gamma |A_0(\eta)|^2 z), \quad (6)$$

donde (5) representa la función de transferencia de la dispersión y (6) del efecto Kerr. Para calcular la señal a la salida de la fibra óptica se emplea la convolución en el dominio de la frecuencia; es decir, se multiplica la señal a la entrada de la fibra en el dominio de la frecuencia por la función de transferencia correspondiente, obteniendo la señal a la salida en el dominio de la frecuencia. Este método es eficiente computacionalmente pero tiene la desventaja de que sólo un método puede ser modelado al tiempo.

## B. Método numérico en el dominio del tiempo

El método numérico en el dominio del tiempo, es una alternativa que permite resolver la NLSE en el dominio del tiempo, considerando tanto el efecto de la dispersión como el efecto Kerr. Para emplear este método se emplean las siguientes ecuaciones [7]:

- $\tilde{A}(z + \Delta z, \omega) = H_D(\omega) F(A(z, t)), \quad (7)$
- $A(z + \Delta z, t) = \exp(j\Delta z \gamma e^{-\alpha z} |F^{-1}[\tilde{A}(z + \Delta z, \omega)]|^2) F^{-1}[\tilde{A}(z + \Delta z, \omega)], \quad (8)$

donde  $\tilde{A}(z+\Delta z, \omega)$  indica la transformada de Fourier de la envolvente  $A(z, t)$ . Empleando estas ecuaciones los dos efectos pueden ser simulados al aplicarlos alternativamente en el punto medio de cada paso  $\Delta z$ . Aplicar (7) representa introducir el efecto de la dispersión cromática y (8) el efecto Kerr.

La ecuación (7) es un efecto lineal que puede ser implementado por un filtro digital. En [7] se introduce la construcción de una función polinómica para la implementación del efecto de la dispersión empleando un filtro FIR (*Finite Impulse Response*) dado por:

$$\begin{aligned}
 & \bullet \quad A_{1/2}\left(z + \frac{\Delta z}{2}, t\right) = \sum_{k=0}^M h_k A(z, t - k Ts) \quad (9) \\
 & \bullet \quad \bar{A}_{1/2}\left(z + \frac{\Delta z}{2}, t\right) = \\
 & \quad A_{1/2}\left(z + \frac{\Delta z}{2}, t\right) \exp\left(j \frac{\Delta z}{2} \gamma e^{-\alpha z} |A_{1/2}\left(z + \frac{\Delta z}{2}, t\right)|^2\right) \\
 & \quad (10)
 \end{aligned}$$

Estas ecuaciones representan el algoritmo numérico en el dominio del tiempo e introducen cada efecto de forma alternativa en cada paso  $\Delta z$ .

### III. Análisis de dispersión y efecto Kerr

En esta sección se presentan los resultados de simulación para el análisis de los efectos de propagación, para una señal modulada en intensidad con diferentes tasas de bits, en una fibra óptica monomodo tipo estándar (ITU 6.652). La señal a la entrada de la fibra es un pulso gaussiano con duración media  $T_0$ , representando una codificación NRZ (*Non-return to Zero*). No se considera atenuación ( $\alpha=0$ ) y se realizaron pruebas para tasas de transmisión de 1.25, 2.5, 5, 10 y 50 Gbps.

Los parámetros utilizados en la simulación se especifican en la Tabla 1 y corresponden a la fibra seleccionada.

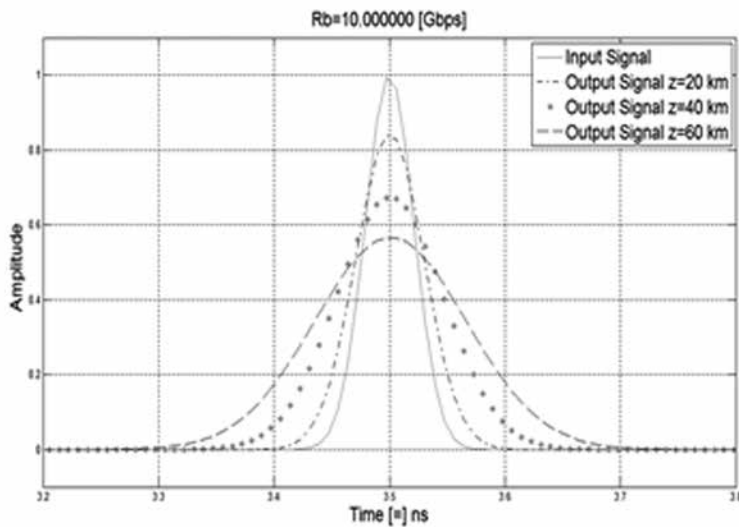
Tabla 1. Parámetros de simulación

Parámetro	Valor
$\beta_2$	-21.66 ps <sup>2</sup> /km
$\beta_3$	0.117 ps <sup>3</sup> /km
$\alpha$	0 dB/km
	2.4 W <sup>-1</sup> /km

## A. Análisis de la dispersión

Se empleó el algoritmo numérico en el dominio del tiempo para medir el efecto de la dispersión cromática, considerando los parámetros de dispersión de segundo y tercer orden. Se realizó la simulación para distancias de 20, 40 y 60 km, para un pulso gaussiano correspondiente a una tasa de bits de 10 Gbps. Los resultados se presentan en la Figura 1.

Figura 1. Dispersión sobre un pulso óptico a  $R_b=10\text{Gbps}$  para  $z=20, 40$  y  $60$  km

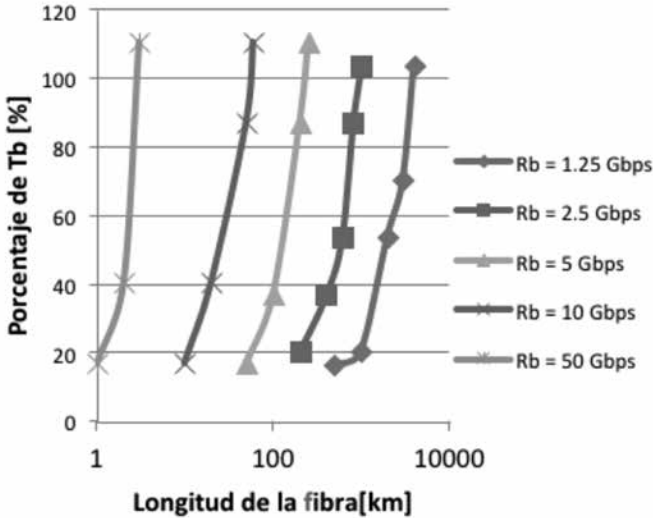


Los resultados obtenidos muestran que para el mismo tipo de fibra el ensanchamiento del pulso incrementa a medida que se aumenta la longitud de la fibra, lo cual ocurre debido al efecto de la dispersión.

Se realizó otra prueba para el análisis de la dispersión para diferentes tasas de bits. Se simuló las tasas de 1.25, 2.5 y 10 Gbps que corresponden a valores empleados en comunicaciones ópticas. También se simuló las tasas de 5 y 50 Gbps.

En la Figura 2 se presenta el porcentaje de incremento de la duración del pulso  $T$  en función de la distancia de transmisión para cada una de las tasas de bits simuladas. El ensanchamiento del pulso se midió al 60.6% de la amplitud máxima del pulso para cada una de las diferentes tasas y distancias de transmisión.

Figura 2. Porcentaje de dispersión en función de la longitud de fibra óptica para diferentes tasas de bits.



Según lo esperado, la duración del pulso incrementa rápidamente para tasas de transmisión altas debido al fenómeno de dispersión, de manera que la distancia de transmisión se vería limitada para pulsos de corta duración. Para un incremento del 100% de  $T$ , existiría interferencia intersimbólica, y por lo tanto una disminución en el desempeño del sistema a través del parámetro BER.

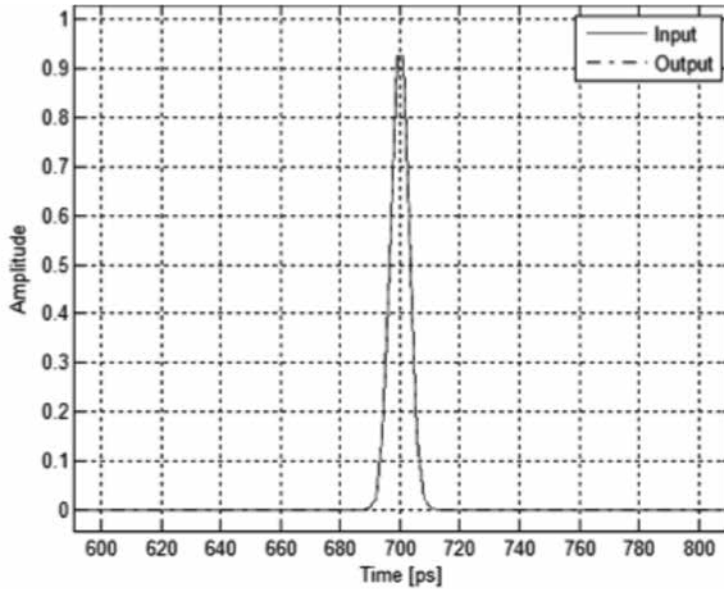
## B. Análisis del efecto Kerr

Para analizar los cambios introducidos por el efecto Kerr, se implementó el algoritmo numérico en el dominio del tiempo. Las pruebas tienen como objetivo observar lo que el efecto Kerr introduce en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia a la señal.

Para cada una de las tasas de transmisión y longitudes de fibra se realizaron pruebas con el objetivo de determinar los cambios en la señal óptica. Los resultados obtenidos demostraron que el efecto no lineal no introdujo cambios visibles a la señal en el dominio del tiempo. En la Figura 3 se presentan los resultados de simulación para un pulso de 50 Gbps en 100 km de fibra óptica.



Figura 3. Efecto Kerr en el dominio del tiempo.  $R_b= 50$  Gbps,  $L=100$ km.



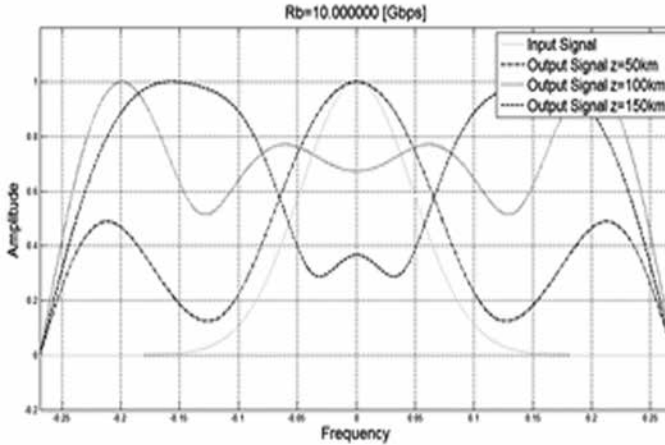
El resultado obtenido es el esperado puesto que los efectos no lineales introducen un cambio en la fase de la señal, el cual no afecta la envolvente gaussiana del pulso modulado en intensidad.

Sin embargo, el efecto Kerr realiza importantes cambios en la manera en la cual la energía se distribuye en el dominio de la frecuencia.

Se realizaron pruebas para diferentes tasas de transmisión y se observó que para una misma longitud de fibra, las señales son igualmente afectadas por el efecto Kerr. Esto puede explicarse debido a que este efecto depende de la longitud y área efectivas, que se relacionan con la potencia de la señal, siendo este efecto no dependiente de la tasa de bits cuando se tiene una sola longitud de onda.

Puesto que para la misma distancia de transmisión, los cambios en la frecuencia son los mismos para todas las tasas de transmisión, en la Figura 4 se presenta la señal de salida de la fibra óptica considerando solo el efecto Kerr, para un pulso gaussiano a 10Gbps, para diferentes longitudes de fibra óptica.

Figura 4. Efecto Kerr en el dominio de la frecuencia.  
 $R_b=10$  Gbps,  $L=50, 100$  y  $150$  km



## Conclusiones

Como requisito para incrementar el desempeño de una red de comunicaciones ópticas, actualmente limitadas por fenómenos como la dispersión y las no linealidades, surge una necesidad de obtener y desarrollar nuevos modelos de propagación que puedan predecir el comportamiento de una señal óptica en su transmisión por una fibra óptica. En este caso se presentó el método analítico y el método numérico en el dominio del tiempo, que permiten analizar los efectos de propagación.

Pudo observarse que para señales moduladas en intensidad, el factor importante por analizar son los cambios que sufre la envolvente por medio de la propagación. Para el efecto de la dispersión, el principal cambio introducido es el ensanchamiento del pulso, el cual incrementa a medida que las tasas y distancias de transmisión lo hacen; como resultado aparece interferencia intersimbólica y con esta un aumento de BER, el cual limita estos dos parámetros de diseño en una red de comunicaciones ópticas. Los efectos no lineales, por otro lado, introducen un cambio en la forma en la cual la energía del pulso se distribuye en el dominio de la frecuencia, este efecto incrementa a medida que se aumenta la potencia de la señal, lo cual introduce otra limitante en el diseño de una red.

Estas consideraciones pueden ser útiles para el diseño de enlaces y redes ópticas con mayores tasas de bits y mayores potencias.

## Referencias

---

- [1] GRANADA TORRES, Jhon James; ZULUAGA GONZÁLES, Carlos Eduardo; GUERRE-RO GONZÁLES, Neil y DIAZ BETANCURT, Oscar Marino. Compensación de la dispersión cromática usando ecualización LMS. En : STSIVA: XV Simposio de tratamiento de señales, imágenes y visión artificial (septiembre, 2008); p. 1-6.
- [2] SAVORY, Seb J. Digital filters for coherent optical receivers. En : Optics Express. Vol. 16, No.2 (enero, 2008); p
- [3] GOLDFARB, Gilad y LI, GUIFANG. Chromatic Dispersion Compensation Using Digital IIR Filtering With Coherent Detection. En : IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 19, No.13 (julio, 2007); p. 1-3.
- [4] KUMAR, Beeram Navaneeth. Analysis of Nonlinear Dispersions in Optical Systems. Tesis para optar por el título de Master of Science in Electrical and Electronic Engineering. California States University, Sacramento, 2010. 78p. Disponible en: <http://csus-dspace.calstate.edu/handle/10211.9/321> [Consulta: 29 de enero 2013]
- [5] HE, Kan y LI, Xun. An Efficient Approach for Time-Domain Simulation of Pulse Propagation in Optical Fiber. En: Journal of Lightwave Technology. Vol.28, No.20 (octubre, 2010); p. 1-7.
- [6] AGRAWAL, Govind P. Fiber-Optic Communication Systems. 3 ed. s.l.: Jhon Wiley & Sons, Inc., 2002. p.36-66,280. ISSN 0-471-21571-6.
- [7] LI, Xun; CHEN, Xingzhong y QASMI, Mahmood. A Broad-Band Digital Filtering Approach for Time-Domain Simulation of Pulse Propagation in Optical Fiber. En: Journal of Lightwave Technology. Vol.23, No.2 (febrero, 2005); p. 1-12.