

SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE UN PULSO EN FIBRAS NO LINEALES

M. Cuervo¹ y J. Zapata^{1,2,♦}

¹Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

²Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia

(Recibido 30 de Sep. 2005; Aceptado 19 de Abr. 2006; Publicado 16 de Jun. 2006)

RESUMEN

En este trabajo se estudian las propiedades básicas de ganancia y pérdida guiada en los modos de propagación en una fibra óptica cilíndrica cuyos efectos no lineales se simulan con un índice de refracción complejo. Para ello se resuelve numéricamente la ecuación de onda usando el esquema generalizado de Douglas aplicado al método de diferencias finitas de propagación de haz en el dominio temporal. Se comparan los resultados obtenidos con el caso lineal (índice de refracción real) y con resultados analíticos.

Palabras claves: Fibra óptica no lineal, índice de refracción complejo, modos de propagación

ABSTRACT

In this paper, we study basic properties of gain and loss guiding propagation modes in a cylindrical optical fiber with nonlinear effects simulated by a complex-valued refractive index. For this purpose we numerically solve the wave equation using the generalized Douglas scheme applied to the time-domain finite-difference beam propagation method. We compare the nonlinear numerically results with the linear case (real-valued refractive index) and with analytical results.

Key words: Nonlinear optical fiber, complex-valued refractive index, propagation modes

1. Introducción

Este trabajo está motivado por el reciente desarrollo de láseres de fibra óptica en los cuales se usa la propagación de modos guiados para crear nuevos tipos de estructuras láser extremadamente robustas con resonadores de longitud que alcanzan varios cientos de metros. La emisión láser es causada por emisión estimulada de tierras raras excitadas ópticamente, tales como Nd, Yb o Er. Como resultado de una amplia variedad de dopantes los láseres de fibra pueden operar en una multitud de longitudes de onda, desde el visible al infrarrojo, usando para el bombeo un gran número de fuentes disponibles [1].

Los modos de propagación en fibras ópticas no lineales con efectos de ganancia o pérdida se caracterizan por un parámetro de guía de onda complejo que determina el número de modos posibles y sus constantes de propagación, y viene dado por [2]:

$$v^2 = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 2n_0 \left[\Delta n + i \frac{\lambda}{2\pi} \Delta \alpha \right], \quad (1)$$

♦ Email: jezapata@uninorte.edu.co

donde a es el radio de la fibra, λ la longitud de onda de la luz en el vacío, n_0 es el índice de refracción en el revestimiento, Δn es el incremento del índice de refracción del núcleo con respecto al revestimiento y $\Delta\alpha$ el coeficiente de ganancia o pérdida en el núcleo de la fibra. En este trabajo se estudian las características de propagación de los modos LP01 y LP11 de una fibra cilíndrica no lineal con perfil de índice de refracción de paso. Se simulan los efectos de ganancia o pérdida con la parte imaginaria $\Delta\alpha$ del índice de refracción en el núcleo. El campo eléctrico E para el modo LP01, en una fibra cilíndrica tiene la forma [3]:

$$E_{01}(r) = \begin{cases} J_0(\tilde{u} r / a) & r \leq a \\ [J_0(\tilde{u}) / K_0(\tilde{w})] \times K_0(\tilde{w} r / a) & r \geq a \end{cases} \quad (2)$$

donde J_0 y K_0 son funciones de Bessel de 1ª y 2ª clase, los parámetros \tilde{u} y \tilde{w} satisfacen la igualdad $v^2 = \tilde{u}^2 + \tilde{w}^2$, y se determinan aplicando condiciones de frontera núcleo-revestimiento [2].

2. Simulación numérica

Para la propagación de pulsos en la fibra resolvemos numéricamente la ecuación de onda en la aproximación de Envolvente lentamente variable (SVEA) [4], que en coordenadas cilíndricas viene dada por:

$$-2i \frac{\omega \tilde{n}^2}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial^2 E}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + \frac{\omega^2 \tilde{n}^2}{c^2} E, \quad (3)$$

donde \tilde{n} es el índice de refracción complejo, y $\omega / c = k = 2\pi / \lambda$. Para la discretización de (3) usamos el esquema generalizado de Douglas aplicado al método de diferencias finitas de propagación de haz en el dominio temporal, propuesto en la referencia [4] para fibras lineales.

Para la simulación numérica hemos usado $a = 1 \mu m$, $n_0 = 1.45$, y $\lambda = 1.55 \mu m$ los cuales son valores convencionales en fibras ópticas. Sin embargo, los valores de Δn y $\Delta\alpha$ dependen de los parámetros \tilde{u} y \tilde{w} que varían de acuerdo a los modos LP01 y LP11. Estos valores están consignados en la Tabla 1 y los signos más/menos (\pm) corresponden a ganancia y pérdida respectivamente.

Tabla No.1. Parámetros de los modos LP01 y LP11

	LP01 no lineal	LP01 lineal	LP11 no lineal	LP11 lineal
Δn	0.0216121	0.0188647	0.124832	0.124064
$\Delta\alpha$	± 0.0270148	0	± 0.0186267	0
\tilde{u}	$1.01028 \pm 0.128071i$	0.934516	$2.433 \pm 0.0329i$	2.42619
\tilde{w}	$0.211855 \pm 0.138774i$	0.160155	$0.21185 \pm 0.1387 i$	0.160155

La Figura 1 muestra la propagación de un pulso que tiene de entrada un perfil transversal con modo LP01 (a., b. y c.) y modo LP11 (d., e. y f.), y en la dirección z tiene un perfil gaussiano centrado en $0.1 \mu m$ y con un ancho $1/e$ de $0.11 \mu m$ [4], como se muestra en la Figura 2.

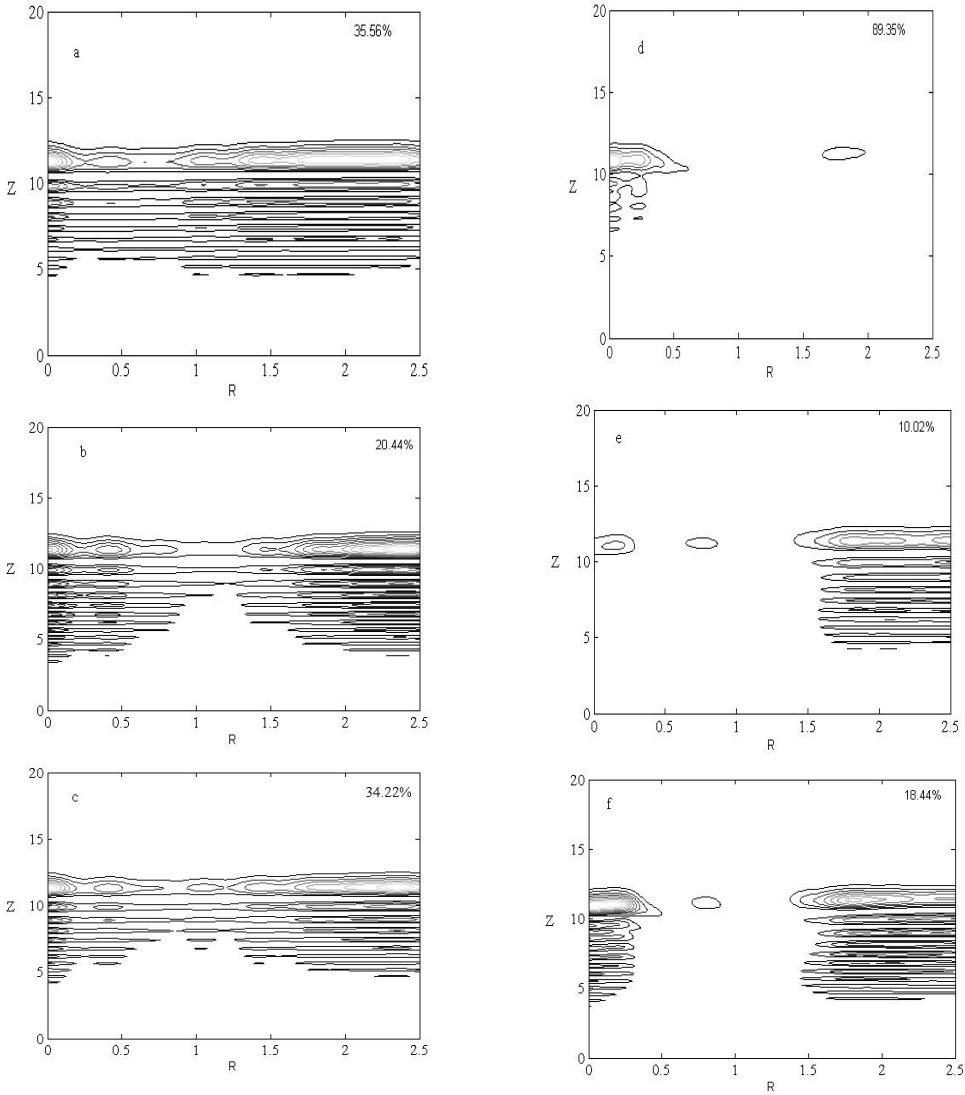


Figura No.1. Propagación de un pulso LP01: a. $\Delta\alpha>0$, b. $\Delta\alpha<0$, c. $\Delta\alpha=0$, y pulso LP11: d. $\Delta\alpha>0$, e. $\Delta\alpha<0$, f. $\Delta\alpha=0$. En cada figura se indica el porcentaje del pulso que se mantiene en el núcleo después de 50 fs.

En los cálculos presentados en la Figura 1, la propagación se hizo para un tiempo de 50 fs. Para los pulsos de entrada dados hubo propagación en cada uno de los casos con pérdidas por absorción. Se comienza con un pulso cuya densidad de energía está normalizada en el “espacio”

correspondiente a la ventana computacional. Esta integral se calcula nuevamente al final de la propagación para tener una medida de las pérdidas en el núcleo. Observamos que para los parámetros seleccionados en la simulación el modo LP11 tiene mayor ganancia o pérdida que el modo LP01 en una fibra no lineal. Las Figuras 1.a. y 1.d. (fibra no lineal, $\Delta\alpha > 0$) muestran ganancia en la propagación del pulso en el núcleo, y las Figuras 1.b. y 1.e. (fibra no lineal, $\Delta\alpha < 0$) muestran pérdidas con respecto al caso lineal 1.c. y 1.f. (fibra lineal, $\Delta\alpha = 0$).

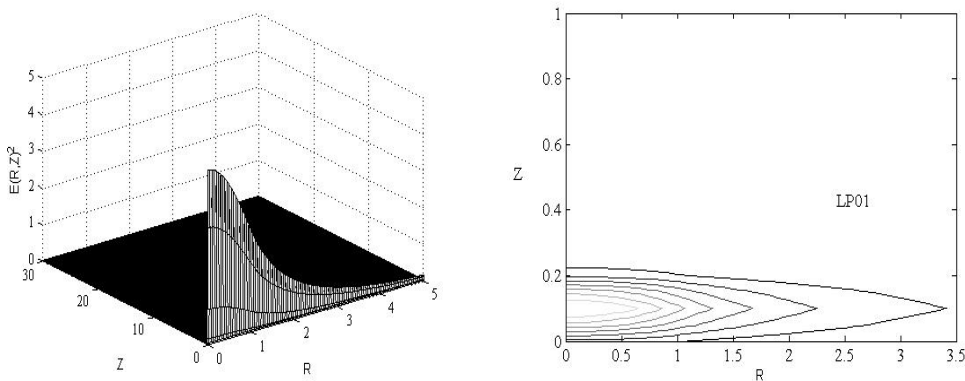


Figura No.2. Perfil y contorno del pulso de entrada LP01.

3. Conclusión

Se puede simular la propagación de pulsos en una fibra no lineal tomando el índice de refracción con valor complejo, donde la parte imaginaria del mismo determina los efectos de ganancia o pérdida guiada. Este índice de refracción de valor complejo se podría determinar a partir de experimentos de propagación, contando así con un modelo teórico sencillo que permita estudiar estos efectos.

Referencias

[1] N. Peyghambarian y A. Schülzgen, OPN 16, 36 (2005).
 [2] A.E. Siegman, J. Opt. Soc. Am. A 20, 1617 (2003).
 [3] J.M. Senior, Optical Fiber Communications, Prentice Hall, New York (1992).
 [4] J. Shibayama, et al., Journal of Lightwave Thecnology 18, 437 (2000).