

SIMULACIÓN NUMÉRICA Y ANALÍTICA DE GENERACIÓN DE PULSOS CORTOS EN UN SISTEMA LASER

Resendiz Solis, Carlos Alfonso(1), Shulika, Oleksiy(2),

1 [Ingeniería en comunicaciones y electrónica, Universidad de Guanajuato] | [ca.resendizsolis@ugto.mx]

2 [Departamento de Ingeniería electrónica, División de ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [oshulika@ugto.mx]

Resumen

Se analiza la ecuación de mode-locking de Haus para la generación de pulsos cortos en sistemas laser y se simula computacionalmente visualizando los efectos producidos con la variación de parámetros lineales como no lineales. Y finalmente se estudian los resultados obtenidos de la simulación para una probable aplicación práctica.

Abstract

The Haus mode locked equation for the generation of short pulses in laser systems is analyzed and simulated under variation of the lineal and non-lineal parameters. Finally the results obtained of the simulation are studied for a possible practical application.

Palabras clave

Mode locked; Split-step Fourier; Modos; EDP; HME; No lineal

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los sistemas laser se encuentran presentes en diversos ámbitos de nuestra vida cotidiana, desde el campo de la electrónica hasta el campo de la medicina.

Existen distintas clasificaciones para estos sistemas, que pueden ser en base a su material activo, el funcionamiento o al tipo de haz de salida que se tiene en el sistema, el cual puede ser continuo o pulsado.

Cuando se trata con un laser pulsado es común que la duración de su tren de pulsos de salida conste de pequeños pulsos respecto a su duración temporal, en la que hablamos desde nanosegundos hasta llegando a alcanzar incluso los femtosegundos en un laser Ti:sapphire[1].

Existen diferentes técnicas para obtener este tipo de laser pulsado, entre las que se encuentran Q-switching y Mode locked laser como las más comunes. Se da una explicación del funcionamiento del segundo ya que es el que se trata en este artículo.

En un mode locked laser la característica principal que se encuentra es que es un laser que oscila en un número considerable de modos longitudinales y donde estos modos tienen una relación fija entre sus fases. Bajo condiciones ordinarias estos modos no tienen relación en sus fases y para la oscilación de onda continua la intensidad del haz tendrá un comportamiento temporal aleatorio. Imagen(1).

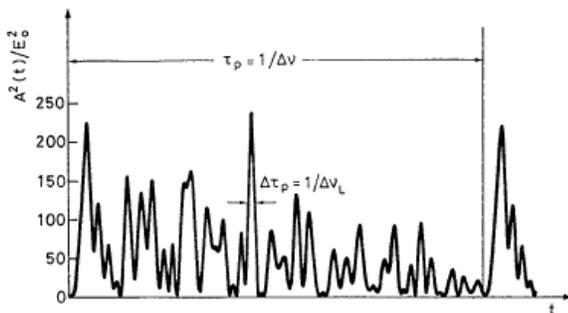


IMAGEN 1: Comportamiento temporal del cuadrado de la amplitud del campo eléctrico total, en este caso para 31 modos

oscilantes con la misma amplitud E_0 y sin relación de fase entre ellos. Crédito [1]

Si se logra de alguna manera obtener una relación definida entre las fases de estos modos oscilatorios y sus amplitudes son las mismas o comparables, entonces se tendrá un mode locked laser. Imagen(2).

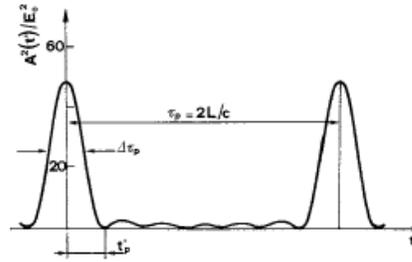


Imagen 2: Comportamiento temporal del cuadrado de la amplitud del campo eléctrico de 7 modos oscilando con una relación definida entre sus fases. Crédito [1].

A la técnica para obtener este tipo de laser con el que podemos alcanzar pulsos muy cortos de duración se le llama mode-locking y este tipo de sistemas se representan por una ecuación diferencial parcial de orden superior que contiene términos no lineales. Generalmente se utiliza la ecuación maestra de mode-locking o también denominada Haus Mode-locking Equation HME [2].

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{l}{2}u - \frac{i\beta^n}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{g(u)}{2} \left(u + \frac{1}{\Omega_g^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) + (i\gamma + \delta)|u^2|u$$

(1)

Esta ecuación es una generalización de la ecuación no lineal de Schrödinger NLSE. Su solución analítica de la misma manera es muy difícil de encontrar y en algunos casos no existe, por lo que es común emplear métodos numéricos que entregan aproximaciones aceptables.

En la actualidad existen varios autores que han desarrollado distintas formas de simular la generación de pulsos cortos como Vladimirov et al[3]. Sin embargo, todos estos códigos han demostrado que se pueden modificar e incluso mejorar y cada uno muestra ciertas ventajas y desventajas que lo hacen aplicables en determinados casos.

Entonces, en este trabajo se muestran algunas simulaciones realizadas computacionalmente y que buscan explicar de manera más clara como es que se generan los pulsos cortos en un sistema laser.

MATERIALES Y MÉTODOS

La base de este proyecto es como ya se mencionó la HME ec.(1). Para simular esta ecuación que era la parte más importante del proyecto se decidió utilizar el método de Split-step de Fourier(SSF).

Este es un método numérico y se denomina del tipo semi espectral, porque para encontrar la solución en el dominio del tiempo debemos hacer uso de la transformada de Fourier y su inversa.

Lo primero que se hizo fue un tratamiento analítico de la HME, en donde se pueden observar que se involucran una parte lineal y una parte no lineal. Entonces se comenzó a aplicar el método de SSF, el cual consiste en separar tanto la parte lineal como la no lineal y resolverlas por separado mientras se tome un pequeño paso en z en consideración.

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

En donde en la ec.(2) el primer termino dentro de los paréntesis representa el termino lineal y el segundo representa el termino no lineal.

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{2}u - \frac{i\beta^n}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{g(u)}{2} \left(u + \frac{1}{\Omega_g^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = (i\gamma + \delta)|u|^2 u \quad (4)$$

Entonces para resolver la ec.(3) es cuando aplicamos la transformada de Fourier con un desplazamiento muy pequeño de z, y como

$$u = u(t, z) \quad (5)$$

En el dominio de frecuencia obtenemos que para la parte lineal

$$\mathcal{F} \left\{ \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = \mathcal{F} \left\{ -\frac{1}{2}u - \frac{i\beta^n}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{g(u)}{2} \left(u + \frac{1}{\Omega_g^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \right\} \quad (6)$$

Mientras que la parte no lineal ya cuenta con una solución analítica

$$u_n(t, z + \Delta z) = e^{[i\gamma + \delta]|u|^2 \Delta z} u(t, z) \quad (7)$$

Entonces la solución total en el dominio de la frecuencia para una pequeña distancia es

$$\hat{u}(t, z + \Delta z) = e^{\left(\left(\frac{i\beta^n}{z} + \frac{g(u)}{z\Omega_g^2} \right) (\omega - \omega_0)^2 \Delta z \right)} \hat{u}_n(t, z + \Delta z) \quad (8)$$

Y para encontrar la solución en el dominio del tiempo para la distancia pequeña que se tomo en la dirección de z se debe tomar la transformada inversa de la ec.(8) y para encontrar la respuesta total para una distancia más grande, se debe realizar el procedimiento anterior n veces.

Analíticamente se ha encontrado que existe una solución en forma de soliton para esta EDP[2] de la forma

$$u = u_0 \operatorname{sech}^{1+i\beta} \left(\frac{t}{\tau} \right) \exp(i\phi dz) \quad (9)$$

Entonces se procedió a simular este tipo de respuesta de la ec.(9) modificado de la forma más simple

$$u = u_0 \operatorname{sech} \left(\frac{t}{\tau} \right) \quad (10)$$

Que sería tomando una velocidad de grupo nula e ignorando el termino exponencial para fines prácticos de la simulación numérica de dos maneras, la primera es solo esta función y cómo evoluciona en el tiempo y con un número determinado de iteraciones y la segunda es tomándola como condición inicial en la ecuación HME en la que intervienen los parámetros de dispersión y self-phase modulation. Las simulaciones que se realizaron fueron modificando los valores de la amplitud inicial, de la ganancia de saturación y el número de iteraciones. Mientras que los parámetros mostrados en la tabla 1 se mantuvieron constantes en base a los sugeridos por la bibliografía consultada [2].

Parámetro	Valor
β	-2
Ω_g	$43 * 2\pi$
ζ	0.2
γ	4

δ	0.03
g_0	0.1
τ	0.07

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se obtuvieron fueron que efectivamente al aplicar la HME a un pulso en forma de la ec. (10) se obtiene un incremento en la magnitud de su intensidad, producto de la interacción que se tiene con los parámetros del sistema.

En la imagen (3) se puede apreciar como la magnitud de $|u|$ es sumamente inferior a la magnitud de $|u|$ en la imagen (4).

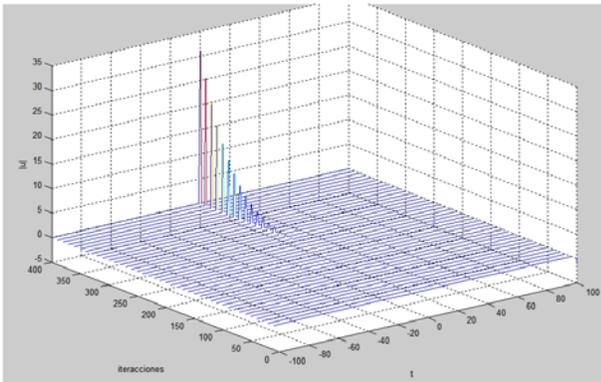


Imagen 3. Resultados obtenidos de la simulación de la ec.(9) con una amplitud de 100 en intervalo de -10 a 10 s, mediante 40 iteraciones.

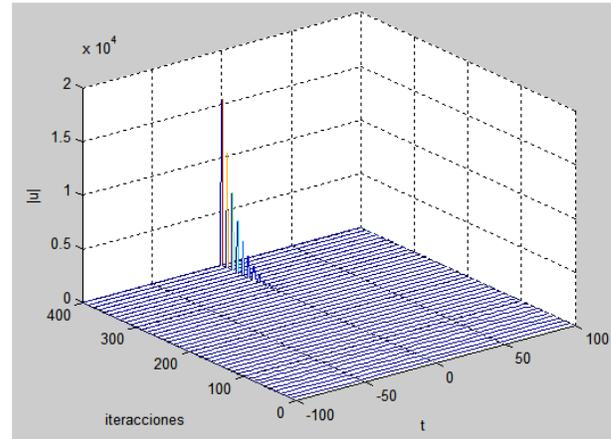


Imagen 4. Resultados obtenidos mediante la ec.(9) aplicada a la HME con la misma amplitud y en el mismo intervalo temporal y número de iteraciones de la imagen(3).

También como resultado se observó que al modificar la ganancia de saturación se modificaba la amplitud, sin embargo en los casos en los que se simuló todos seguían mostrando que la amplitud de la HME era mayor que la simple función sin interacción del sistema.

Al modificar el intervalo de tiempo y el número de iteraciones lo que se obtiene es una señal más definida sin modificar la amplitud del resultado imagen(5) e imagen(6).

Al comparar estos resultados obtenidos con algunos otros en la bibliografía, se obtiene que muestran el mismo comportamiento. [4][5]

Los parámetros no lineales no son tomados como elementos críticos del sistema al tratar de simplificar un poco las simulaciones, sin embargo para algún estudio que requiera una mayor precisión se recomienda tener en consideración esto y consultar las referencias en donde se da un tratamiento más elaborado[4].

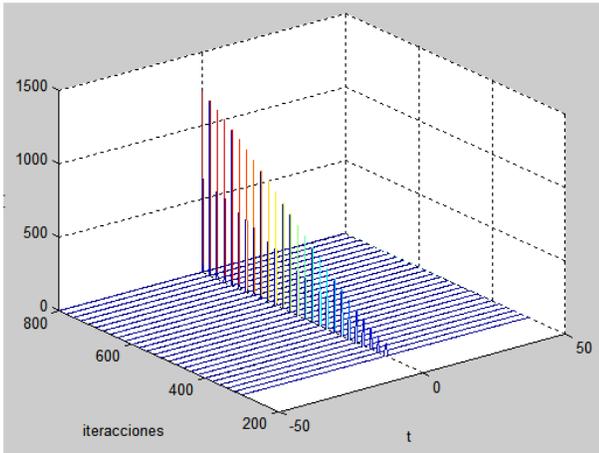


Imagen 5. Resultados obtenidos de modificar el intervalo de tiempo y el número de iteraciones en la ec.(9).

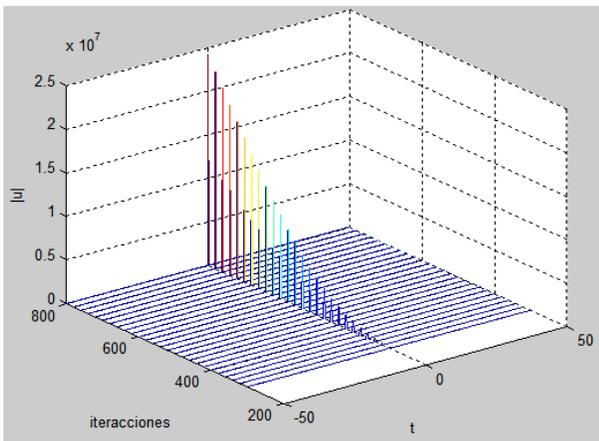


Imagen 6. Resultados obtenidos de la inclusión de la ec.(9) en la HME con la modificación del intervalo de tiempo y número de iteraciones.

CONCLUSIONES

La HME es una representación del modelo de laser mode locked muy acertada que al ser resuelta mediante métodos numéricos como es el caso del SSF resulta ser una gran herramienta para el estudio de estos sistemas.

Los métodos numéricos muestran un gran acercamiento a la resolución analítica que en la

mayoría de los casos busca evitarse por lo tedioso que puede llegar a ser.

Las simulaciones realizadas y sus resultados pueden ser útiles en la futura realización de un sistema laser físicamente hablando, realizando algunas modificaciones.

AGRADECIMIENTOS

Un profundo agradecimiento a la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado de la Universidad de Guanajuato por haber seleccionado a este proyecto para participar en los veranos de investigación.

REFERENCIAS

- [1] Svelto, O. (2010). Transient Laser Behavior. En D. C. Hanna (Ed.), Principles of laser (pp. 313-373). New York: Springer.
- [2] Wang, S., Docherty, A., Marks, B.S. & Menyuk, C.R. (2013). Comparison of numerical methods for modeling laser mode locking with saturable gain. J. Op. Soc. Am. B., 30(11), 3064-3074.
- [3] Vladimirov, A.G., Turaev, G. & Kozyreff, G. (2004). Delay differential equations for mode-locked semiconductor lasers. Optic letters, 29(11), 1221-1223.
- [4] Haus, H. (1975). Theory of mode locking with a fast saturable absorber, Journal of applied physics, 46(7), 3049-3058.
- [5] Costa, J.R., Paiva, C.R. & Barbosa, A.M. (2001). Modified Split-step Fourier method for the numerical simulation of soliton amplification in Erbium-doped fibers with forward-propagating noise, IEEE Journal of quantum electronics, 37(1), 145-152.