

DESARROLLO DE UN PAQUETE SOFTWARE PARA ANALIZAR REDES OPTICAS MEDIANTE EL CALCULO MATRICIAL DE JONES Y DE MUELLER

J.L. Arce, J.A. Pino*, R. López*, A. Cobo*, J.M. López-Higuera*, M.A. Muriel***

** Grupo de Ingeniería Fotónica. Departamento TEISA, E.T.S.I. Industriales y de Telecomunicación
Avda de Los Castros s/n. 39005 Santander*

Tfno.942-201545 Fax 942-201873 E-mail jlarce@eisa.unican.es

***Departamento de Tecnología Fotónica E.T.S.I. Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid
Ciudad Universitaria. 28040 Madrid
Tfno.3367305 Fax 3367319*

ABSTRACT

The application of the Jones and pure Mueller calculus to optical circuits is presented. We have developed a simple method of analysis to derive steady-state transfer characteristics between input and output optical wave vectors, or powers formed from a variety of linear optical components. The analysis method is based on a functional block diagram description of the optical circuits. We have developed a computer program for such a simulation purpose that include matrix functions for some basic optical elements such as retardation wave plates, rotators, polarisers, and single-mode fibers under various disturbances.

1. INTRODUCCION

Las fibras ópticas pueden emplearse, además de como medios de transmisión de bajas pérdidas, para formar dispositivos ópticos, que, a su vez, pueden conectarse mediante fibras ópticas monomodo, con el fin de conseguir sistemas ópticos más complejos, a emplear en procesado óptico de señal o en sensores ópticos. La investigación y el desarrollo de tales sistemas ópticos conlleva la necesidad efectuar análisis cuantitativos detallados y por lo tanto de disponer de modelos idóneos de los mismos.

En el trabajo que aquí se presenta, se ha desarrollado un paquete software en MATLAB, denominado MAT-JONES, para la simulación y el análisis de las redes ópticas. Las fuentes teóricas del mencionado software son las matrices de Jones (1941), y las matrices de Mueller (1948), que permiten representar algebraicamente tanto la intensidad de la radiación óptica, como su estado de polarización.

El paquete se encuentra dividido en dos partes: En una, se permite el análisis de cascadas de dispositivos ópticos de volumen formadas por polarizadores, láminas de retardo, rotadores, espejos ideales y de fase conjugada, obteniéndose la onda de salida de cualquier combinación de dichos dispositivos, definiendo con ayuda de menú el tipo de polarización de la onda incidente y el tipo de rotación de los mismos. En la otra, se permite al usuario la simulación de fibras ópticas cuyas características pueden ser definidas. Consta de varios menús que proporcionan la posibilidad de elegir, de forma sencilla para el usuario, entre distintas posibilidades: la longitud de onda de trabajo, el grado de birrefringencia lineal y circular recíproca, así como el efecto Faraday de la fibra, y su orientación.

2. MATRICES DE JONES Y DE MUELLER

La introducción de la notación matricial, permite describir elegantemente los circuitos ópticos, ya que las propiedades que presentan los cálculos con matrices, posibilita la extensión a los sistemas ópticos de conceptos análogos a los de vectores propios, valores propios, diagonalización, cambios en sistemas de referencia, de claro significado en algebra lineal. A continuación, se describen sucintamente los métodos matriciales, y la terminología, empleados en la elaboración sistemática del MAT-JONES.

2.1. Matrices de Jones

La matriz de Jones es una poderosa herramienta para describir sistemas ópticos formados por componentes ópticos lineales [1-2]. Si se describe el campo eléctrico de una onda óptica plana como un vector, denominado vector de Jones, el efecto de cualquier elemento óptico sobre la radiación óptica puede representarse por un operador lineal actuando sobre el vector de la onda óptica. En general, este operador lineal puede expresarse como una matriz 2x2, con elementos complejos.

El vector de Jones asociado a un campo genérico \mathbf{E} , y la matriz de Jones \mathbf{J} asociada a un componente óptico, se pueden expresar de la forma

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & e^{j\phi_x} \\ A_y & e^{j\phi_y} \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 & J_4 \\ J_3 & J_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde E_x , E_y y J_i ($i = 1, 2, 3, 4$) son en general números complejos, y A_x, A_y, ϕ_x, ϕ_y son números reales. Entonces, la relación entre los campos eléctricos de entrada y salida de un componente óptico puede expresarse como:

$$\mathbf{E}_0 = \mathbf{J}\mathbf{E}_i \quad (2)$$

donde \mathbf{E}_i y \mathbf{E}_0 son los vectores de Jones de entrada y salida, respectivamente.

Si existe una serie de n elementos ópticos en cascada Fig. 1, la matriz de transferencia del sistema puede calcularse como:

$$\mathbf{J}_{\text{SIS}} = \mathbf{J}_n \mathbf{J}_{n-1} \cdots \mathbf{J}_1 \quad (3)$$

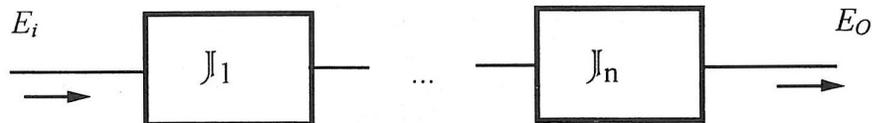


Fig. 1. n Elementos ópticos en cascada.

En general, la matriz de Jones de un componente óptico lineal puede describirse mediante 4 elementos complejos u 8 reales. Pero si el componente óptico lineal no tiene pérdidas, su matriz de Jones es unitaria, y puede ponerse como sigue:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 & -J_2^* \\ J_2 & J_1^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde $*$ significa el complejo conjugado, y \mathbf{J} es una matriz hermítica.

2.2. Operadores algebraicos para el cálculo de Jones

La representación mediante los vectores de Jones del campo eléctrico óptico puede llevarse a cabo principalmente en dos bases diferentes, una rectangular formada por los vectores (x, y) , y otra circular de vectores (R, L) , donde x, y, R, L son vectores unitarios que representan respectivamente, a campos linealmente polarizado en las direcciones x, y , y circularmente polarizados a derechas e izquierdas. Con el fin de posibilitar el modelado adecuado de los circuitos ópticos, el MAT-JONES debe de permitir representar los vectores y las matrices de Jones en ambas bases de polarización, indistintamente, y además debe de incluir la posibilidad de calcular dichos vectores y matrices, en el caso de que se invierta el sentido en que el haz óptico recorre los diferentes dispositivos (circuitos ópticos reflectivos). La realización de las transformaciones anteriores, implica la necesidad de recurrir a determinados operadores algebraicos, que han sido definidos principalmente por Yariv en [3], y que son los que se han empleado en la elaboración de este simulador.

2.3. Parámetros de Stokes

A partir de las componentes de \mathbf{E} se definen los 4 parámetros de Stokes, números reales, que sirven para determinar experimentalmente el estado de polarización, y la irradiancia del haz óptico. Para luz monocromática se definen como:

$$\begin{aligned} S_0 &= E_x E_x^* + E_y E_y^* ; S_1 = E_x E_x^* - E_y E_y^* \\ S_2 &= E_x E_y^* + E_y E_x^* ; S_3 = i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \end{aligned} \quad (5)$$

donde S_0 es la irradiancia del haz óptico, $i = \sqrt{-1}$, y se suelen presentar normalizados respecto a S_0 . Los cuatro parámetros de Stokes llevan asociado un vector de Stokes 4×1 .

2.4. Matrices de Mueller puras y su obtención a partir de las matrices de Jones

Las matrices de Jones son básicamente una herramienta teórica para el estudio de la luz polarizada.

Los vectores de Stokes pueden determinarse experimentalmente, y por tanto son de gran interés. Dichos vectores van asociados a unas matrices 4x4, denominadas matrices de Mueller, con elementos reales, que como las de Jones sirven para representar dispositivos ópticos. Será pues interesante establecer algún tipo de conexión entre estas dos representaciones matriciales. Se denomina matriz de Mueller pura M , a aquella matriz de Mueller que se obtiene a partir de la matriz de Jones correspondiente J . En un dispositivo o circuito óptico se verifica que

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{M} \cdot \mathbf{I}_1 \quad (6)$$

donde \mathbf{I}_1 e \mathbf{I}_2 son los vectores de Stokes de los haces incidente y emergente al citado medio. Los parámetros de Stokes y los elementos de la matriz M son siempre valores reales. Existen varios métodos para obtener los elementos de M , a partir de los de J , en el presente trabajo se ha seguido el propuesto por Hovenier en [4], de gran belleza formal, y relativamente sencillo de tratar en MATLAB, quedando resumido en las siguientes ecuaciones

$$\mathbf{M} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} J_1 J_1^* & J_1 J_4^* & J_4 J_1^* & J_4 J_4^* \\ J_1 J_3^* & J_1 J_2^* & J_4 J_3^* & J_4 J_2^* \\ J_3 J_1^* & J_3 J_4^* & J_2 J_1^* & J_2 J_4^* \\ J_3 J_3^* & J_3 J_2^* & J_2 J_3^* & J_2 J_2^* \end{bmatrix} \cdot \mathbf{T}^{-1} \quad (7)$$

en la ecuación, la matriz T es una matriz auxiliar de adaptación, T^{-1} es su inversa, y están definidas por

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & i & -i & 0 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad \mathbf{T}^{-1} = 1/2 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -i \\ 0 & 0 & 1 & i \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

3. CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA. SIMULADOR MAT-JONES

El programa simulador óptico creado, está diseñado siguiendo las características del programa MATLAB. La teoría matricial de Jones y de Mueller pura, para la representación de dispositivos ópticos, así como la expresión de la luz polarizada en forma de vectores de Jones son dos herramientas totalmente compatibles con MATLAB, ya que este realiza cualquier tipo de operación sobre matrices.

El programa es un simulador orientado al estudio de la polarización de las ondas de luz. Se encuentra dividido en dos partes claramente diferenciadas: La primera permite la simulación de dispositivos ópticos de volumen, tales como polarizadores, retardadores, rotadores, espejos; la segunda ofrece la posibilidad de simular fibras ópticas cuyas características, tipo de birrefringencia, longitud, y orientación, hayan sido definidas por el usuario. En ambos casos permite invertir la dirección de propagación del haz óptico, cambiar la base del espacio vectorial 2x2 en que se definen los vectores y las matrices de Jones, elegir entre varias longitudes de onda de trabajo y diferentes estados de polarización de entrada. Además, proporciona como resultado final, el vector de Jones tanto en la base lineal, como en la circular, el vector de Stokes, la irradiancia, y la representación gráfica de la elipse de polarización de la radiación óptica a la salida del sistema óptico analizado.

3.1. Tipos de ficheros

Para facilitar la explicación de las funciones que desempeña cada fichero, se ha establecido una clasificación propia de los diferentes tipos de ficheros que forman parte del conjunto del programa, y que son de las siguientes clases:

1.- Clase menú: Son los ficheros que exclusivamente exponen un menú en la pantalla de contacto con el usuario del simulador, facilitando así la elección de diferentes posibilidades de simulación. 2.- Clase gráficos: Realizan la salida gráfica de los datos obtenidos en la simulación. 3.- Ficheros .mat ó de almacenamiento: Como su nombre indica son utilizados para guardar en un momento determinado variables globales útiles en diferentes partes del programa. Facilitan sobre todo la programación, todo lo ejecutado hasta determinado instante puede resumirse en el valor de unas variables concretas, que al ser

guardadas, pueden ser recuperadas tal y como estaban en un comienzo sin tener que reiniciar el programa completo. 4.- Clase de cálculo: Son los que se ocupan exclusivamente de realizar operaciones. 5.- Fichero de encaminamiento. Es intermedio entre el de menú y de cálculo.

3.2. Menú principal del programa

El menú principal Fig.2, permite al usuario la elección inicial de las seis opciones siguientes:

1ª.- Polarización de onda incidente. Realiza la función de facilitar la elección del tipo de polarización que se desea presente la onda incidente. 2.- Ayuda. Típica ayuda en línea para facilitar la comprensión del manejo del programa. 3.- Definir parámetros de simulación. Esta parte del programa se incluye para que el usuario pueda escoger las características de la fibra a simular, birrefringencia, actividad óptica, longitud, efecto Faraday, rotación de la fibra, y longitud de onda. 4.- Simulación de dispositivos ópticos. Permite la creación de una cascada de elementos ópticos. 5.- Simulación de fibras ópticas. Permite obtener la onda emergente de un tramo de fibra, cuyas características han sido de establecidas en el proceso de definición de los parámetros de simulación de la misma. Asocia a cada tipo de fibra su correspondiente matriz de Jones, facilita la conexión de distintas fibras, y calcula el vector de Jones de la onda emergente del sistema de fibras ópticas. 6.- Salir. Representa en pantalla los resultados finales Fig.3, y se finaliza el programa.

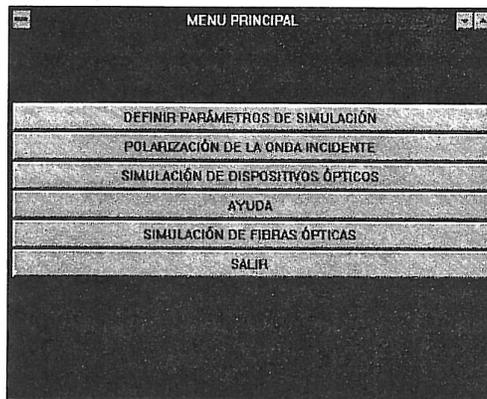


Fig. 2.

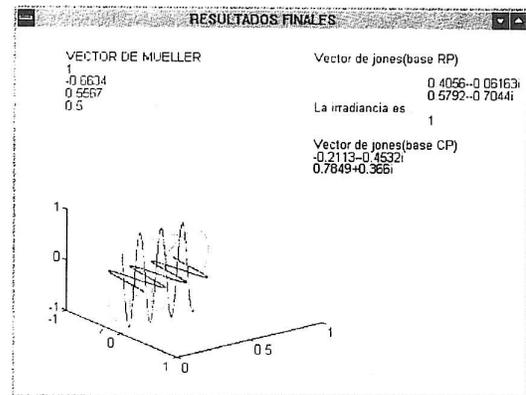


Fig. 3.

4. CONCLUSIONES

El paquete software MAT-JONES es una herramienta muy útil que facilita la simulación y el análisis, de la propagación de luz polarizada a través de dispositivos o circuitos ópticos, formados por los elementos clásicos de la óptica de volumen, y por fibras ópticas.

5. RECONOCIMIENTO

Este trabajo ha sido soportado en parte gracias a la aportación del proyecto CICYT TIC'95-0631-C04-01.

6. REFERENCIAS

- [1] R.C. Jones, *A New Calculus for the Treatment of Optical Systems*, J. Opt. Soc. Amer., Vol.31, pp.408-503, July 1941.
- [2] R.C. Jones, *A New Calculus for the Treatment of Optical Systems*, J. Opt. Soc. Amer., August 1942.
- [3] A. Yariv, *Operator Algebra for Propagation Problems Involving Phase Conjugation and Nonreciprocal Elements*, Applied Optics, Vol.26, Nº 21, pp. 4538- , Noviembre 1987.
- [4] J.W. Hovenier, *Structure of a Pure Mueller Matrix*, Applied Optics, Vol.33, Nº 36, pp. 8318-8324, December 1994.