"MEDIDA NO DESTRUCTIVA DEL PERFIL DE INDICE EN FIBRAS OPTICAS"

A. Vicente
A. Cardama
L. Jofre

ABSTRACT

Non destructive methods for the measurement of index profiles of optical fibers are presented, with emphasis placed on those based on scattering by incoherent light and the focusing method. Computer programs for calculation of the deflection and power distribution functions and index profile have been written and applied to different profils. An experimental set up for the measure of the power distribution is presented.

I. INTRODUCCION

La capacidad de transmisión de información de una fibra multimodo está limitada por dos mecanismos: la dispersión modal y la cromática. Existe un perfil de índice óptimo para el cual la dispersión modal se hace mínima |1|, y pequeñas desviaciones del perfil real respecto a éste se traducen en una drástica disminución del ancho de banda.

Dada la importancia de la correcta gradación del índice resulta esencial disponer de métodos de medida no destructivos que permitan un control eficaz de las características de la fibra a lo largo del proceso de fabricación. En los últimos años se han desarrollado diversos métodos no destructivos de medida del perfil |2|.

Para que un método de medida sea aplicable dentro de un proceso de fabricación debe reunir características tales como tener un algoritmo de cálculo rápido, disposición física de la medida muy simple y ser suficientemente sensible a las distorsiones típicas introducidas por los procesos de fabricación.

Considerando estas características resultan especialmente interesantes los métodos de difracción de luz incoherente, fundamentados en la aproximación de Óptica Geométrica. La utilización de esta aproximación permite una gran simplificación de las ecuaciones, lo cual conduce a algoritmos de cálculo muy simples y rápidos. Por otro lado la posibilidad de utilizar luz incoherente simplifica mucho la medida, siendo además, pequeño el coste de los instrumentos necesarios. En cuanto a la exactitud y sensibilidad a las distorsiones típicas del perfil, la simulación por ordenador muestra que son excelentes.

II. METODOS NO DESTRUCTIVOS BASADOS EN LA APROXIMACION DE O.G.

Estos métodos pueden dividirse en tres grupos:

- Métodos de Trazado de Rayos (solo sobre preforma)
- Métodos de difracción de luz incoherente
- Métodos Interferométricos

Pese a diferenciarse mucho en la forma de efectuar la medida, estos tres grupos aparecen intimamente relacionados al estudiar mediante la O.G. el comportamiento de un conjunto de rayos que inciden transversalmente sobre una fibra (o preforma).

Los autores pertenecen a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Barcelona.

Consideremos una fibra (o preforma) con simetría radial, un perfil de índice n(r) y situado en un medio de índice n_0 idéntico al de la envoltura (fig.1).

Resolviendo la ecuación de los rayos en este sistema se llega a la siguiente expresión para la trayectoria de un rayo y_i que incide perpendicularmente al eje de la fibra (fig.1).

$$\theta(r) = \theta_1 + \int_b^r f(r) \, . \, dr \qquad \theta \geqslant \theta_0 \qquad (1.a)$$

$$\theta(r) = \theta_1 + \int_b^{r_0} f(r) \, dr - \int_{r_0}^r f(r) \, dr \qquad \theta < \theta_0 \qquad (1.b)$$

$$f(r) = \frac{n_0 \, y_1}{r(n^2(r)r^2 - n_0^2 \, y_1^2)^{1/2}} \qquad (1.c)$$

El punto θ_0, r_0 es aquel en el cual la distancia del rayo al origen se hace mínima. Por analogía a la mecánica clásica de particulas recibe el nombre de "punto de retorno". r_0 viene dado por el mayor de los ceros de:

$$\frac{1}{f(r)} = \left|\frac{dr}{d\theta}\right| = 0 \qquad (2)$$

A partir de (1) se puede calcular fácilmente la función de deflexión $\phi(y_i)$ definida en la fig.1:

$$\phi(y_i) = - 2 \arccos \frac{y_i}{b} + 2 \int_{r_0}^b f(r) . dr \qquad (3)$$

Esta ecuación establece una primera relación entre el perfil de índice n(r) y $\phi(y_i)$, relación que puede ponerse en términos de una ecuación integral de Abel cuya solución es bien conocida |3|.

$\phi(y_i)$ puede medirse directamente sobre una preforma mediante técnicas de trazado de rayos. La necesidad de adaptar el índice del medio puede evitarse introduciendo una sencilla corrección en (3), |3|. Debido a la dificultad de obtener haces de luz suficientemente finos, este método no puede aplicarse sobre fibras.

$\phi(y_i)$ puede obtenerse indirectamente a partir de la distribución de potencia P(q) originada por la fibra al dispersar un haz uniforme de luz incoherente (fig.2). Para ello deben cumplirse las siguientes condiciones:

1) Que no existan superficies limite en las que se originen rayos reflejados. Esta condición exige colocar la fibra en un medio cuyo índice coincida con el de la envoltura.
2) Que antes de alcanzarse el plano Q de observación no se haya producido ningún cruce de rayos.
3) Que las variaciones del índice sean suficientemente pequeñas como para que sea correcta la aproximación b sen $\theta_s \simeq y_i$.

Bajo estas condiciones, considerando una iluminación uniforme y teniendo en cuenta la ecuación de transporte de los rayos:

$$P_0 \, dy_i = P(q).ds \simeq P(q).dq \qquad (4)$$

se tiene que la función de distribución de potencia P(q) dispersada por la fibra está relacionada con la función de deflexión por:

$$y_i(q) = \int_0^q \frac{p(q')}{p_0}\, dq' \qquad (5)$$

$$\operatorname{tg} \phi(y_i) = (y_i - q(y_i)) / L \qquad (6)$$

Para relacionar $\phi(y_i)$ con $n(r)$ puede utilizarse una aproximación paraxial de (3), que se obtiene por integración directa de la ecuación paraxial de los rayos. Se llega así a la ecuación integral

$$\frac{q(y_i) - y_i}{L} = \frac{2\, y_i}{n_0} \int_{y_i}^{b} \frac{dn(r)}{dr} \frac{dr}{(r^2 - y_i^2)^{1/2}} \qquad (7)$$

cuya solución viene dada por:

$$n(r) - n_0 = \frac{n_0}{\pi L} \int_r^b \frac{y_i - q(y_i)}{(y_i^2 - r^2)^{1/2}}\, dy_i \qquad (8)$$

Las ecuaciones (8) y (5) permiten calcular $n(r)$ a partir de la observación de $P(q)$ en un plano Q_L situado en el exterior de la fibra.

Tenemos así una segunda vía, dentro del marco de la O.G., para el cálculo de $n(r)$, esta vez aplicable directamente sobre la fibra. Los métodos que utilizan (5) para el cálculo de la función de deflexión son los que hemos llamado de difracción de luz incoherente. El método que, además, utiliza (8) para el cálculo de $n(r)$ es conocido por el nombre de Método de enfoque |4|.

Una tercera vía para el cálculo de $n(r)$, dentro del marco de O.G., se tiene relacionandolo con el camino óptico de los rayos, el cual se puede medir sobre fibra o preforma mediante interferometría de campo de líneas paralelas.

La diferencia de camino óptico $H(y_i)$ entre un rayo I que atraviesa la fibra y otro II que no lo atraviesa (fig.3) viene dada por |2|.

$$H(y_i) = 2 \int_{r_0}^{b} \frac{n^2(r).r\, dr}{(n^2(r) r^2 - n_0^2 y_i^2)^{1/2}} - 2n_0 (b^2 - y_i^2)^{1/2} - n_0 y_i \operatorname{tg} \phi(y_i) \qquad (9)$$

Esta es una ecuación integral de difícil solución, ya que aparece $\phi(y_i)$ como argumento de una función trigonométrica.

Si las variaciones de $n(r)$ son pequeñas, las trayectorias de los rayos pueden aproximarse por líneas rectas. Bajo esta aproximación (9) se simplifica considerablemente. Se llega así a

$$\frac{\lambda}{2D} S(y_i) = \int_{y_i}^{\infty} (n(r) - n_0) \frac{r.dr}{(r^2 - y_i^2)^{1/2}} \qquad (10)$$

donde $S(y_i)$ es el desplazamiento de línea medido sobre el interferograma

$$\frac{S(y_i)}{D} = \frac{H(y_i)}{\lambda} \qquad (11)$$

y D es la distancia entre dos líneas.

La solución de la ecuación integral (11) viene dada por:

$$n(r) - n_0 = -\frac{\lambda}{\pi D}\int_r^{\infty}\frac{dS(y_i)}{dy_i}\frac{dy_i}{(y_i^2 - r^2)^{1/2}} \qquad (12)$$

Puede observarse que existe una gran semejanza formal entre los pares de ecuaciones (7), (8) y (10), (12). Esta semajanza permite establecer una relación que conecta los métodos interferométricos con los de difracción de luz incoherente:

$$-\frac{dH(y_i)}{dy_i} \simeq n_0\,\phi(y_i) \qquad (13)$$

Esta relación permite utilizar (12) para el cálculo de n(r) a partir de P(q). Para ello deben utilizarse las ecuaciones (5) y (6).

III. SIMULACION POR ORDENADOR

Las características y grado de exactitud del método de enfoque se han estudiado mediante su simulación por ordenador. El programa desarrollado permite además calcular las funciones $\phi(y)$ y P(q) para perfiles arbitrarios.

En primer lugar, a partir de un perfil de índice arbitrario n(r) continuo, suponiendo adaptación de índices, se calcula $\phi(y_i)$ para un conjunto de rayos mediante la ecuación (3). En la figura 5 aparecen las funciones $\phi(y)$ correspondientes a un perfil parabólico (α = 2) (línea discontinua) y al perfil parabólico distorsionado mostrado en la figura 4.

Se calcula también P(q) en un plano Q_L interior o exterior a la fibra, situado antes de que se produzcan cruces de rayos. Suponiendo una iluminación uniforme, la ecuación (4) permite calcular P(q) a partir de $q(y_i)$, la cual a su vez puede calcularse a partir de $\phi(y_i)$ para planos exteriores, o utilizando (1) para planos interiores. En la figura 6 se muestran los P(q) correspondientes a un perfil parabólico (α = 2) con un plano exterior ($L = {}^{10}/_3\,b$) (línea de trazos) y al perfil de la (fig.4) en un plano interior ($L = {}^{2}/_3\,b$). La calidad del cálculo de P(q) puede estimarse aplicando la condición de conservación de la potencia total del haz. Tomando 50 rayos este error es del orden del 1% (en un perfil parabólico (α = 2) con $L \simeq 2b$).

Finalmente a partir de P(q) se procede al cálculo de n(r) mediante las ecuaciones (5) y (8) (Método de enfoque). A partir de ellas se ha desarrollado un algoritmo que ha demostrado ser notablemente rápido |2|. En los planos exteriores situados antes de que se produzcan cruces de rayos el error medio en el perfil es del orden del 0,006% y el error máximo de 0.01% (perfil parabólico α = 2 , $L \simeq 26$.

En un plano interior la ecuación (8) no es válida, sin embargo el perfil calculado, pese a diferir en valor absoluto del real, reproduce con notable fidelidad la forma de n(r). En la fig.4 se compara el perfil calculado en un plano interior ($L = {}^{2}/_3\,b$) con el de partida.

IV. MEDIDA DE LA DISTRIBUCION DE POTENCIA

Se ha desarrollado un sistema para la medida de P(q) sobre fibras ópticas. En la fig.7 se muestra su diagrama de bloques.

La fibra se coloca en un portaobjetos y se ilumina uniformemente por debajo. Sobre la fibra se coloca una gota de aceite de índice muy próximo al de la envoltura. La distribución de potencia se observa mediante micro

scopio y se transforma en una señal de video mediante una camara de T.V. La posición del plano Q de observación se controla desplazando verticalmente el portaobjetos. La referencia L = 0 puede encontrarse fácilmente en las fibras fabricadas por el procedimiento CVD enfocando el dip central, |2|.

El eje de la fibra se coloca perpendicularmente al barrido de la cámara de forma que una línea de la señal de video represente la función P(q).

El circuito de selección de línea permite visualizar en un oscilosco-pio una línea cualquiera de la señal de video. En un monitor de T.V. se puede visualizar la imagen con una marca sobre la línea seleccionada.

REFERENCIAS

|1| Gloge y Marcateli. "Multimode Theory of gradex-core fibers". B.S.T.J., Vol.52, Nov. 1973.

|2| A. Vicente. "El perfil de índice en fibras ópticas, su medida y su influencia en la optimización del ancho de banda". Proyecto Fin de Carrera. ETSIT Barcelona, 1981.

|3| Chu. "Nondestructive measurement of index profile of an optical fibre preform". Elect. Let., Vol.13, nº24, 24 Nov. 1977.

|4| Marcuse y Presby. "Refractive index determination by the focusing method". A.O., Vol.18, nº1, 1 Enero 1979.

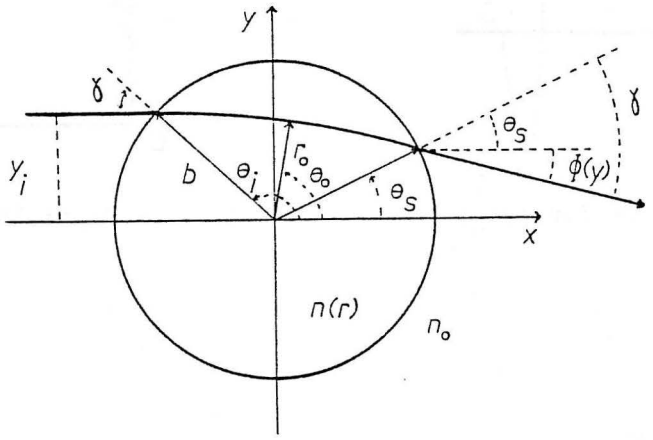

Fig.1

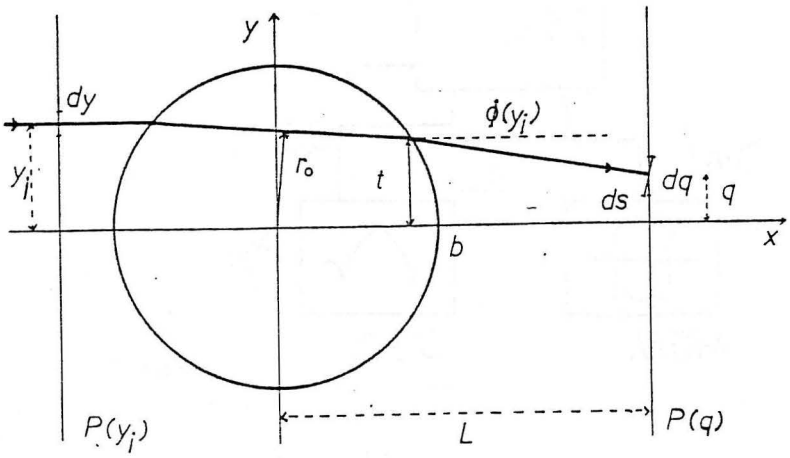

Fig.2

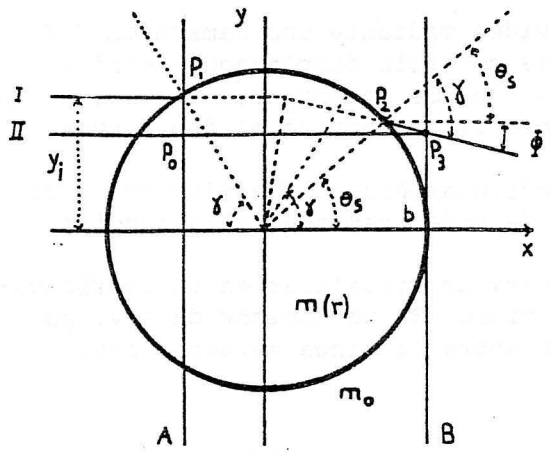

Fig.3

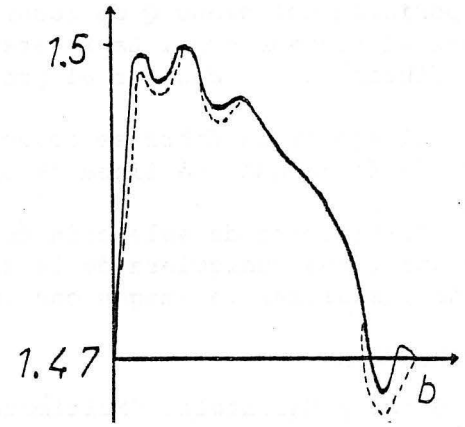

Fig.4.- Perfil de índice utilizado en la simulación (línea continua) y perfil calculado (línea discontinua).

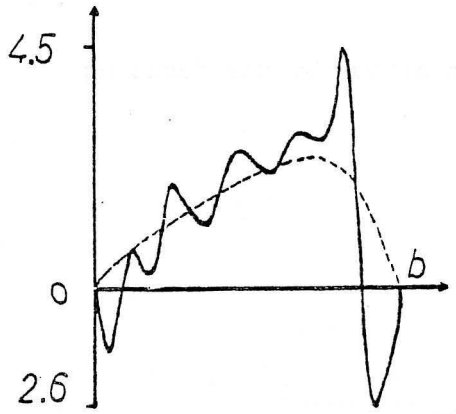

Fig.5.- Funciones de deflexión

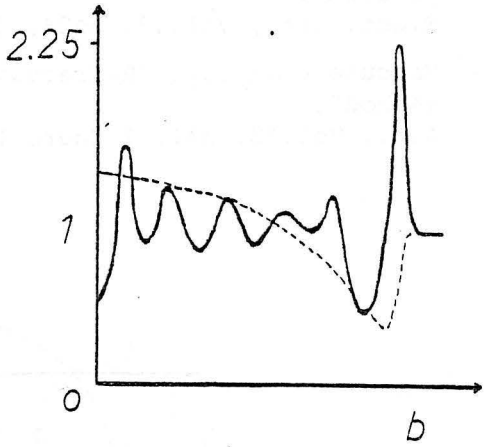

Fig.6.- Distribuciones de potencia.

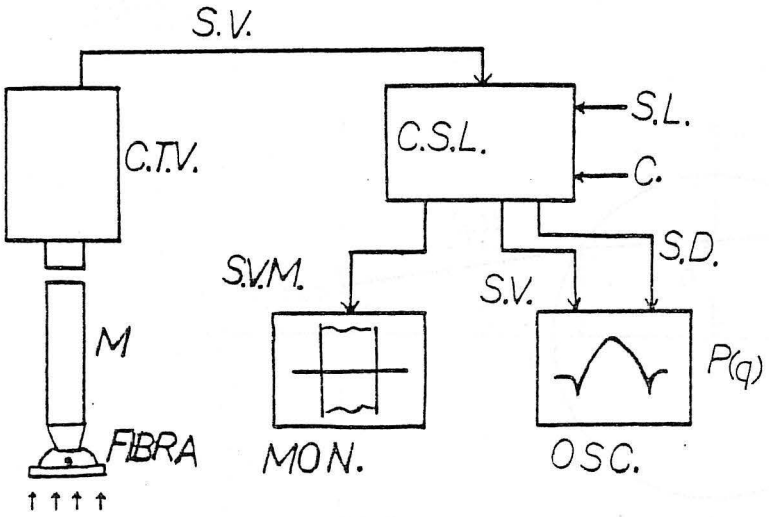

Fig.7