

CONTRIBUCIÓN A LA MEJORA DE LA TEORÍA DE ACOPLO ENTRE FIBRAS ÓPTICAS: SU UTILIZACIÓN EN CONECTORES DE FIBRA MULTIMODO.

M. Morante, A. Cobo, R. López, M. Lomer, J.M. López-Higuera
Grupo de Ingeniería Fotónica - Universidad de Cantabria
E.T.S.I.I. y Telecomunicación
Avda. Los Castros, s/n 39005 Santander
Tfno.: 942-201498 Fax: 942-201873
E-mail: higuera@teisa.unican.es

ABSTRACT

A theoretical formulation for the coupling of light between two multimode optical fibers is presented. It improves the traditional theory substantially, which supposes a constant luminous distribution in the core of the fiber and leads to wrong results. The experimental results obtained, basically the form of the spot of light and the optical power coupled for several fiber configurations and different misalignments, have been validated in the laboratory, and have shown great conformity with the theoretical ones. This theory has a large application, on the one hand, in the calculation of losses in multimode connectors with misalignments or when the fibers are different, and on the other, and above all, in the study of optical sensors based on the relative displacement of two optical fibers.

1. INTRODUCCIÓN

Se presenta en este artículo una formulación teórica para el acoplo de luz entre dos fibras ópticas multimodo. Esta teoría permite calcular la cantidad de potencia acoplada entre las fibras tanto en función de los desalineamientos (axial, lateral, ...) como de las características de las mismas: apertura numérica y tamaño del núcleo y de la cubierta principalmente.

De esta nueva formulación, destaca en primer lugar su simplicidad, ya que se basa en un enfoque geométrico de la propagación de la luz, perfectamente válido para el caso de fibras multimodo como las que nos ocupan. En segundo lugar, se trata de una teoría que proporciona resultados perfectamente comparables con los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio, y que mejora los obtenidos con la teoría convencional, que está excesivamente simplificada y proporciona resultados erróneos, sobre todo con grandes desalineamientos.

Su principal diferencia con la teoría tradicional es que supone una distribución no homogénea en el núcleo de la fibra, lo que conlleva un *spot* o patrón de iluminación a la salida de la fibra no uniforme. En base a esta formulación, se ha obtenido la forma de este *spot* en función del tipo de fibra, y los resultados se han comparado favorablemente con los obtenidos en el laboratorio a partir de la digitalización del *spot* de salida de múltiples fibras con diversas características.

En un siguiente paso, se ha podido calcular la potencia óptica acoplada en una segunda fibra receptora colocada en cualquier punto de un plano frente a la primera. La integración sobre el núcleo de esta segunda fibra de la intensidad luminosa procedente de la primera, permite calcular la potencia total acoplada para cualquier combinación de fibras emisora y receptora y para cualquier tipo de desalineamiento. Las curvas de acoplo así obtenidas han sido validadas en el laboratorio mediante un sistema automático de posicionamiento, que calcula la potencia acoplada en función de la posición relativa de las dos fibras.

La aplicación obvia de esta formulación se centra en la predicción de pérdidas en conectores ópticos de fibra multimodo, ofreciendo un marco general que permite considerar tanto los efectos de los desalineamientos, como las diferentes características de las fibras emisoras y receptoras. Las predicciones son más acertadas que la teoría convencional, sobre todo para grandes desalineamientos. Sin embargo, el principal atractivo está en su aplicación a los sensores ópticos basados en fibra, en los cuales, la magnitud a medir modifica la posición relativa entre una fibra emisora y otra receptora, modulando eficazmente la potencia óptica acoplada en función de los cambios de la magnitud en cuestión. En esta aplicación, es fundamental también conocer la potencia acoplada en cada punto, así como la linealidad de la función y su sensibilidad.

2. ANTECEDENTES

Tradicionalmente, y así consta en la mayoría de la literatura básica sobre fibra óptica [1] [2], las pérdidas introducidas en los conectores de fibra óptica multimodo se modelan en base a una distribución luminosa uniforme en el núcleo de la misma. El *spot* de iluminación proyectado sobre un plano receptor a la salida de una fibra es, en este caso, un disco uniforme independientemente de la distancia entre el extremo de fibra y el plano receptor. Por lo tanto, para calcular la potencia óptica acoplada entre dos fibras ópticas que forman un conector, basta con hallar el área solapada entre el spot de iluminación de la fibra emisora y el área que forma el núcleo de la fibra receptora, tal como se muestra en la Figura 1.

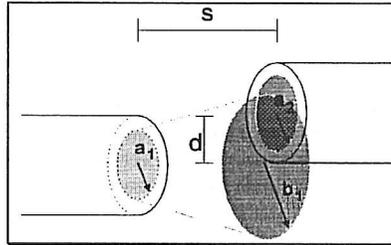


Figura 1. Configuración geométrica en un conector de fibras multimodo.

La separación s define el desalineamiento axial, mientras que d representa el desplazamiento lateral o de *offset*. En una aplicación como sensor de vibraciones, se espera que se modifique el valor de s ó d de forma dinámica, en función de cómo evolucione la magnitud a medir. En este caso, el estudio del mecanismo de modulación de este tipo de sensores se puede enfocar como un conector con desalineamientos variables en el tiempo.

3. TEORÍA DE ILUMINACIÓN UNIFORME

A partir del esquema geométrico anterior se puede obtener una ecuación generalizada que permite hallar la eficiencia de acoplo de potencia entre las dos fibras, η_{aco} , en función de sus posiciones relativas (s, d) y de las características de las fibras (radios de los núcleos, a_1 y a_2 , y aperturas numéricas, AN_1 y AN_2 , respectivamente). Se comprueba que existen tres soluciones posibles:

$$\eta_{aco} = 0 \quad \text{si} \quad d \geq b_1 + a_2 \quad (1)$$

$$\eta_{aco} = \frac{\text{area receptora}}{\text{area emisora}} = \frac{\pi a_2^2}{\pi b_1^2} = \left(\frac{a_2}{b_1}\right)^2 \quad \text{si} \quad d \leq b_1 - a_2 \quad (2)$$

$$\eta_{aco} = \frac{\text{area común}}{\text{area emisora}} = \frac{\frac{1}{2} a_2^2 (2\gamma - \text{sen}(2\gamma)) + \frac{1}{2} b_1^2 (2\beta - \text{sen}(2\beta))}{\pi b_1^2} \quad \text{si} \quad b_1 - a_2 < d < b_1 + a_2 \quad (3)$$

$$\text{con} \quad \beta = \arccos\left(\frac{d^2 + b_1^2 - a_2^2}{2db_1}\right), \quad \gamma = \arccos\left(\frac{d^2 + a_2^2 - b_1^2}{2da_2}\right) \quad (4,5)$$

b_1 es el radio del núcleo emisor proyectado sobre el plano receptor, y está determinado por la apertura numérica de la fibra emisora.

A esta eficiencia de acoplo hay que añadir las pérdidas por reflexiones de Fresnel, así como las debidas a una diferencia de aperturas numéricas cuando $AN_2 < AN_1$. Un ejemplo de las curvas obtenidas con esta formulación se muestra en la Figura 3, curva n° 5, para fibras del tipo 50/125.

4. NUEVA FORMULACIÓN

Como ya se ha comentado, esta teoría produce resultados erróneos, sobre todo para grandes desalineamientos, que no suelen producirse en conectores ópticos pero sí en su utilización en sensores basados en fibra. Numerosos grupos de investigación han verificado en el laboratorio la validez de esta teoría, encontrándose resultados dispares. Esto hace pensar en la dificultad de realizar medidas fiables[1].

El principal fallo de la formulación anterior estriba en el modelo de iluminación uniforme, que está excesivamente simplificado. He *et al* [3] han propuesto un nuevo modelo de iluminación con un enfoque geométrico que ha sido aplicado por los autores para obtener una función de acoplo mucho más realista y completa.

Este modelo de iluminación se basa en dos puntos fundamentales. En primer lugar, que por el núcleo de la fibra multimodo se propagan rayos con cualquier ángulo entre 0 y el ángulo máximo definido por su apertura numérica. Y, además, que todos los rayos propagados llevan la misma potencia, lo cual es cierto para fuentes de tipo lambertiano como los diodos LED. En la práctica, todas las fuentes se pueden aproximar por este modelo, incluso láseres y lámparas de luz blanca.

Utilizando este modelo, se puede obtener la función de intensidad, que define el patrón de iluminación en un plano distante una separación s de la salida de la fibra. Este *spot* difiere considerablemente del obtenido con el modelo más simple de iluminación uniforme, y concuerda de forma notable con el medido en el laboratorio (véase la Figura 2).

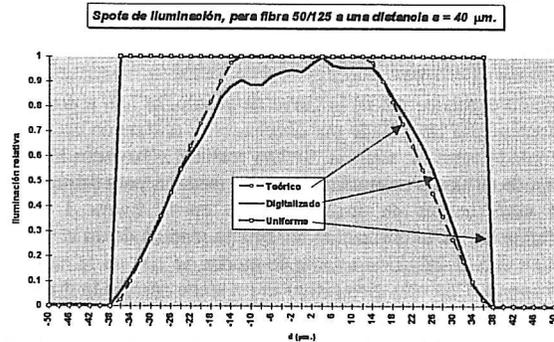


Figura 2. Patrones de iluminación.

El siguiente paso consiste en determinar la potencia óptica acoplada en un fibra receptora sobre la que incide este *spot* de iluminación, es decir, integrar la distribución de intensidad sobre el área del núcleo de la misma. Como resultado se obtiene la potencia óptica total acoplada, que puede hallarse para cualquier tipo de fibras y desalineamientos. Como ejemplo, se muestra en la figura 3 la potencia relativa acoplada entre dos fibras 50/125, para una separación $s = 40 \mu\text{m}$, y variando la posición lateral d .

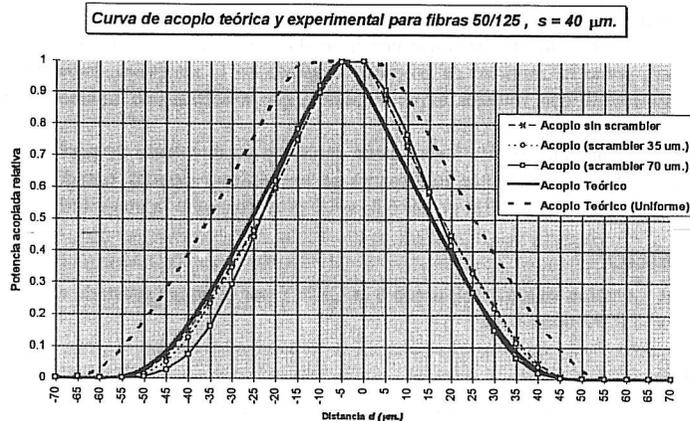


Figura 3. Curva de acoplo de potencia óptica entre dos fibras.

Como era de esperar, la potencia óptica es máxima cuando no existe desalineamiento ($d = 0$), y decrece a medida que desplazamos una de las fibras. Directamente, a partir de estas gráficas, es posible

obtener de forma precisa las pérdidas en un conector de fibra multimodo. Para su aplicación en el sensado de vibraciones, estas curvas también proporcionan información muy valiosa a la hora de diseñar el dispositivo. En este caso, la potencia óptica debe ser proporcional al desplazamiento relativo entre las fibras, por lo que es necesario utilizar un zona lineal de la curva, entre $d = 5$ y $d = 25 \mu\text{m}$. para el ejemplo de la Figura 3. Además, interesa que la potencia óptica acoplada y la sensibilidad de la misma sean máximas, para mejorar las prestaciones del sensor.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Todos los desarrollos teóricos realizados han sido verificados en el laboratorio, con resultados satisfactorios. En primer lugar se ha comprobado la función de distribución de intensidad luminosa a la salida de una fibra (*spot*). Para ello, se ha empleado un montaje en el que la luz procedente de la fibra se proyecta directamente sobre un sensor de tipo CCD, y la imagen recogida es digitalizada y tratada mediante un ordenador. Un ejemplo de los resultados, ya comentado, se muestra en la figura 2. El *spot* obtenido se compara favorablemente con el predicho por la formulación teórica, haciéndose patente además las grandes diferencias con la teoría tradicional de iluminación uniforme. La falta de uniformidad en la medida se debe, por un lado, a la poca resolución del sensor en tan poca superficie, y por otro, al ruido presente en la imagen.

Para la determinación experimental de la curva de acoplo, se han enfrentado dos fibras utilizando un sistema de microposicionamiento controlado por ordenador, y utilizando un medidor de potencia óptica para monitorizar la luz acoplada entre las mismas. Se han realizados barridos bi-dimensionales en el plano receptor, con una resolución de 60 nm. y promediando varias medidas para minimizar errores.

Una muestra de estas curvas de acoplo aparece en la figura 3. Se muestran tres curvas experimentales, que se diferencian en la utilización durante la medida de un *scrambler*. Esto se debe a que los cálculos teóricos suponen una distribución estable de modos, lo que no se cumple si la fibra emisora es de poca longitud (curva primera). Con este dispositivo se pretende acercar la distribución modal en la fibra a una distribución estable, mediante microcurvaturas de distinto radio (curvas segunda y tercera). Se puede concluir de la gráfica que la distribución modal influye en la curva de acoplo, aunque no excesivamente, y que el efecto de las microcurvaturas es el previsto: eliminar modos de orden superior que no existen en un distribución estable. En cualquier caso, los resultados experimentales concuerdan muy bien con los teóricos. El pequeño desplazamiento lateral de la curva que se observa se debe a la dificultad de tomar un punto de referencia adecuado durante las mediciones.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado una formulación para el estudio del acoplo de luz entre dos fibras ópticas multimodo enfrentadas, y que permite determinar con exactitud el mecanismo de acoplo en función de las características de las fibras y de sus posiciones relativas.

Se han realizados cálculos teóricos que permiten obtener tanto el patrón de iluminación a la salida de una fibra emisora, como la cantidad de potencia acoplada en la receptora. Estos resultados han sido contrastados favorablemente con trabajos experimentales, que muestran así mismo la inexactitud de la teoría tradicional.

La aplicación inmediata de esta formulación se centra en el cálculo de pérdidas en conectores de fibra multimodo, pero su aplicación más interesante es en sensores ópticos basados en fibra, donde el desplazamiento relativo entre dos de ellas produce la señal proporcional a la magnitud sensada.

7. RECONOCIMIENTO

Los autores muestran su agradecimiento a la CICYT por el apoyo prestado en esta investigación a través del proyecto nº TIC92-0052-C02.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.M.Senior, *Optical Fiber Communications: Principles and Practice*, 2nd Edition, pp. 216-223, Prentice Hall, 1992.
- [2] H.Murata, *Handbook of optical fibers and cables*, pp. 323-337, Marcel Dekker, Inc., 1987.
- [3] G.He, F.W.Cuomo, *A light intensity function suitable for multimode fiber-optic sensors*, Journal of Lightwave Technology, 9(4), pp. 545-551, April 1991.