

# Localización de Fallos en Enlaces Full-Duplex de Fibra Óptica Mediante Detección Sincronizada de Tiempos de Caída

## Fault Location in Full-Duplex Optical Fibre Links Using Synchronized Decay Time Detection

David S. MONTERO <sup>(1)</sup>, Pablo PEDREIRA <sup>(2)</sup>, Carmen VÁZQUEZ <sup>(1)</sup>, Julio MONTALVO <sup>(3)</sup>

1. Grupo de Displays y Aplicaciones Fotónicas (GDAF). Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid.
2. Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911, Leganés, Madrid.
3. Evolución de Red de Acceso, Telefónica I+D, D. Ramón de la Cruz 82, 28006, Madrid.

Persona de contacto: David S. Montero ([dsmontero@ing.uc3m.es](mailto:dsmontero@ing.uc3m.es)).

### RESUMEN:

En este trabajo, se muestran los resultados obtenidos durante la evaluación experimental de un método de localización de cortes en enlaces full-dúplex de fibra óptica, empleando un método alternativo a medidas con Reflectómetros Ópticos en el Dominio del Tiempo (OTDR). El método utilizado consiste en comparar los tiempos de caída en los dos extremos del enlace de manera sincronizada cuando se produce un corte de fibra. Se han evaluado dos tipos de tecnologías de fibra, multimodo y monomodo, analizando las prestaciones del método en cada caso y para varios tipos de rotura de cable, considerando y comparando la precisión de las medidas así como las máximas distancias soportadas.

**Palabras clave:** Localización de Fallos, Corte de Fibra, Fibra Multimodo, Fibra Monomodo, Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo, Redes Ópticas Pasivas

### ABSTRACT:

In this work, the results obtained during the experimental evaluation of a fibre-fault location method in full-duplex fibre links, employing an alternative method to Optical Time Domain Reflectometer measurements, are reported. The utilized method consists of comparing the decay times at both ends of the fiber link in a synchronized way, when a fibre cut occurs. Two types of fibre technologies have been evaluated, Multimode and Single-mode, thus analyzing the performance of the method in each case and for different types of fiber cuts, considering and comparing the accuracy and the maximum distance supported.

**Key words:** Fault Location, Fibre Cut, Multimode Fibre, Singlemode Fibre, Optical Time Domain Reflectometer, Passive Optical Networks (PON)

## 1.- Introducción

Los equipos más comúnmente utilizados para supervisar la capa física de infraestructuras de fibra óptica son los Reflectores Ópticos en el Dominio del Tiempo (siglas en inglés:

OTDR). Estos equipos transmiten una señal óptica de supervisión modulada por pulsos eléctricos periódicos inyectados en las fibras que se desea supervisar. Mediante la recepción de la señal de retroesparcimiento reflejada y su correlación temporal con la distancia,

estos equipos son capaces de caracterizar la condición de la fibra supervisada [1,2].

No obstante, debido al bajo coeficiente de retroesparcimiento en la fibra (típicamente en torno a -80 dB para pulsos de 1ns), este tipo de dispositivos requiere una sensibilidad altísima en sus receptores así como altos valores de promediado (y tiempo asociado) de medidas para obtener la resolución deseada.

El problema de la sensibilidad es todavía mayor en este tipo de equipos en el caso de Redes Ópticas Pasivas (PON, Passive Optical Network), ya que se trata normalmente de redes que utilizan divisores de potencia óptica que provocan una atenuación adicional muy alta en las señales ópticas. Se suma a esta dificultar el reto tecnológico del solapamiento de las reflexiones en diferentes ramas después de los divisores de potencia, ya que las redes PON tienen una topología física punto a multipunto.

En este trabajo, se evalúa experimentalmente una técnica alternativa a los OTDR, basada en la detección sincronizada en dos extremos de un enlace de fibra, de la atenuación producida por un fallo en un punto intermedio [3], empleando dos longitudes de onda dedicadas a supervisión óptica en tiempo real.

**2.- Descripción del método de localización de cortes utilizado**

Dado un enlace de fibra entre dos dispositivos ópticos A y B, véase la Fig. 1, con respectivos relojes sincronizados  $CLK_A$  y  $CLK_B$ , respectivamente, se consideran los siguientes parámetros:

- $\lambda_a$ = portadora óptica usada en sentido A-B.
- $Ng\_a$ = Índice de refracción efectivo en la fibra en la longitud de onda  $\lambda_a$
- $\lambda_b$ = portadora óptica usada en sentido B-A.
- $Ng\_b$ = Índice de refracción efectivo en la fibra en la longitud de onda  $\lambda_b$
- $L$  = Longitud del enlace de fibra entre A y B.

En un cierto punto del enlace, un corte en la fibra a la distancia  $L_0$  provoca una atenuación en el instante  $T_0$ , y dicha atenuación se

propaga hacia los dos extremos del enlace en ambas portadoras ópticas  $\lambda_a$  y  $\lambda_b$ .

Se consideran  $L_a$  y  $L_b$  las distancias del punto de fallo a los dispositivos A and B, respectivamente.

En un determinado instante, los dispositivos A y B detectan una pendiente atenuación en las señales ópticas, y cuando la atenuación supere un determinado límite, registrarán el tiempo en que dicha condición se produce.

Considerando que existen relojes sincronizados en los dispositivos A y B, los instantes registrados en cada uno de ellos en el momento en que la atenuación de la señal recibida ha superado un determinado límite son, respectivamente,

$$T_a = T_0 + L_a / c \cdot Ng\_a \quad (1)$$

$$T_b = T_0 + L_b / c \cdot Ng\_b \quad (2)$$

siendo  $c$  la velocidad de la luz en el vacío.

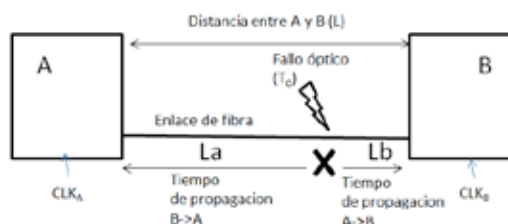


Fig. 1: Esquema del método de localización de fallos en enlaces ópticos dúplex.

Considerando el siguiente sistema de ecuaciones

$$L = L_a + L_b \quad (3)$$

$$|T_a - T_b| = |L_a / c \cdot Ng\_a - L_b / c \cdot Ng\_b| \quad (4)$$

es posible determinar los valores de  $L_a$  y  $L_b$ , que son los dos únicos valores desconocidos en el sistema, localizando de ese modo el punto de localización del fallo.

**3.- Montaje experimental, resultados obtenidos y discusión**

Para la verificación del método de localización de fallos propuesto se han empleado dos fuentes láser DFB (Distributed Feedback laser) inyectando potencia óptica en continua a diferentes longitudes de onda:  $\lambda_a=1310nm$ ,  $\lambda_b=1550nm$  en un primer caso; y

$\lambda_a=1530\text{nm}$ ,  $\lambda_b=1550\text{nm}$  en un segundo caso. Se han empleado dos tipos de fibra óptica: fibra monomodo estándar (SMF, SingleMode Fiber) 9/125 $\mu\text{m}$  y fibra multimodo (MMF; MultiMode Fiber) de índice gradual (GI) 62.5/125 $\mu\text{m}$ . La señal óptica es redirigida a dos fotodetectores de banda ancha (Agilent 83440C, 0-20GHz) mediante sendos circuladores ópticos. Las trazas de ambos fotodetectores (PD) fueron capturadas con un osciloscopio digital operando con una tasa de muestreo de 6.25GS/s. El montaje experimental se muestra en la Fig.2.

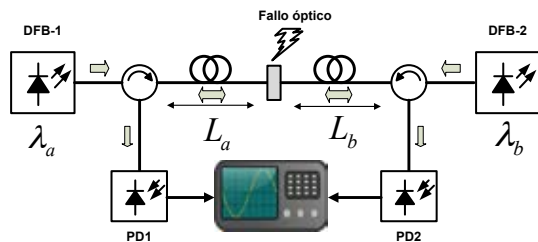


Fig. 2: Montaje experimental.

Las siguientes figuras muestran ejemplos de las señales detectadas en recepción y del retardo producido entre ambas cuando se produce una rotura del enlace de fibra para diferentes condiciones de operación. Para su representación y posterior tratamiento ambas señales han sido previamente normalizadas.

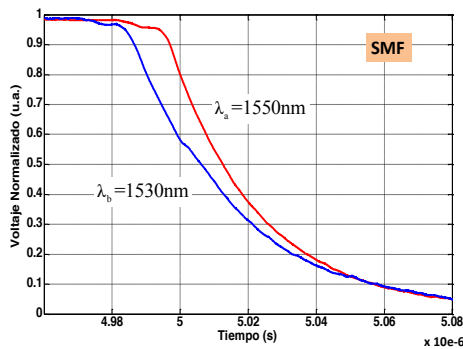


Fig. 3: Transitorio de rotura en enlace de fibra monomodo con  $L_a=4250\text{m}$ ,  $L_b=500$ ,  $\lambda_a=1.53\mu\text{m}$ ,  $\lambda_b=1.55\mu\text{m}$ .

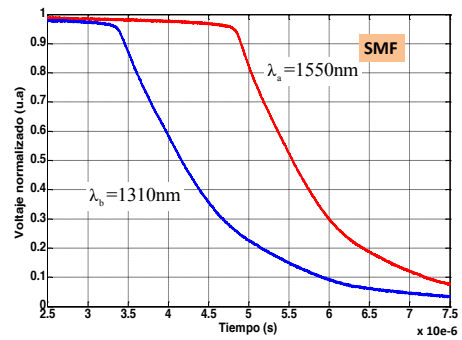
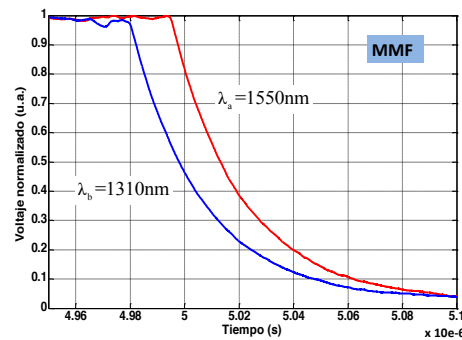


Fig. 4: Transitorio de rotura en enlace de fibra monomodo con  $L_a=1000\text{m}$ ,  $L_b=500\text{m}$ ,  $\lambda_a=1.31\mu\text{m}$ ,  $\lambda_b=1.55\mu\text{m}$ .

(a)



(b)

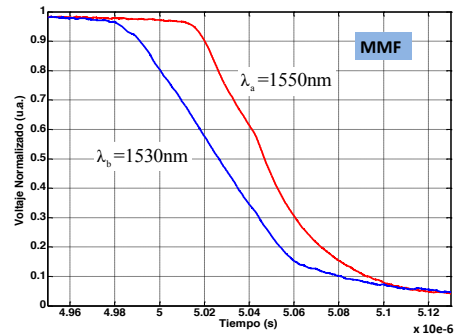


Fig. 5: Transitorio de rotura en enlace de fibra multimodo con: (a)  $L_a=L_b=3050\text{m}$ ,  $\lambda_a=1.31\mu\text{m}$ ,  $\lambda_b=1.55\mu\text{m}$ ; (b)  $L_a=L_b=3050\text{m}$ ,  $\lambda_a=1.53\mu\text{m}$ ,  $\lambda_b=1.55\mu\text{m}$

Para la posterior validación de los resultados experimentales mostrados anteriormente se consideraron los siguientes índices de refracción efectivos,  $N_{g_i}(\lambda)$ , para una fibra óptica monomodo de sílice:  $N_{g_1.3\mu\text{m}}=1.4676$ ,  $N_{g_1.53\mu\text{m}}=1.4681$  y  $N_{g_1.55\mu\text{m}}=1.4682$ , respectivamente.

Por el contrario, el cálculo de los índices de refracción efectivos  $N_{g\_i}(\lambda)$  en una fibra multimodo de índice gradual, se realizó mediante la aproximación dada por la ecuación de Sellmeier de tercer orden [4]. Los coeficientes utilizados para dicha aproximación fueron idénticos a los publicados en [5]. De la evaluación de dicha ecuación se obtuvieron los siguientes índices de refracción efectivos,  $N_{g\_i}(\lambda)$ , para una fibra óptica de sílice multimodo de índice gradual con núcleo de sílice dopado con 6.3%-mol de  $GeO_2$ :  $N_{g\_1.3\mu m}=1.4558$ ,  $N_{g\_1.53\mu m}=1.4542$  y  $N_{g\_1.55\mu m}=1.4533$ , respectivamente, ver Fig. 6.

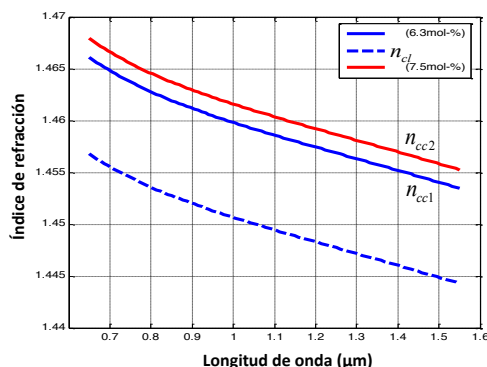


Fig. 6: Índice de refracción del núcleo ( $n_{cc1}$ ) vs longitud de onda para una fibra óptica multimodo con núcleo de sílice dopado con 6.3%-mol de  $GeO_2$ .

Tipo de fibra	Experimento	Ta-Tb  medido	Ta-Tb  teórico	Error en medida distancia fallo
SMF	$L_a=4250m, L_b=500m$ $\lambda_a=1.53\mu m, \lambda_b=1.55\mu m$	8.51 $\mu s$	8.537 $\mu s$	12.0  m
	$L_a=4250m, L_b=500m$ $\lambda_a=1.31\mu m, \lambda_b=1.55\mu m$	8.58 $\mu s$	8.540 $\mu s$	17.4  m
	$L_a=1000m, L_b=500m$ $\lambda_a=1.31\mu m, \lambda_b=1.55\mu m$	1.17 $\mu s$	1.136 $\mu s$	14.9  m
MMF	$L_a=L_b=3050m$ $\lambda_a=1.53\mu m, \lambda_b=1.55\mu m$	19.08 ns	18.592 ns	0.213  m
	$L_a=3050m, L_b=2m$ $\lambda_a=1.53\mu m, \lambda_b=1.55\mu m$	6.95 $\mu s$	7.014 $\mu s$	14.9  m
	$L_a=L_b=3050m$ $\lambda_a=1.31\mu m, \lambda_b=1.55\mu m$	13.03 ns	11.846 ns	0.516  m
	$L_a=3050m, L_b=2m$ $\lambda_a=1.31\mu m, \lambda_b=1.55\mu m$	6.99 $\mu s$	7.008 $\mu s$	16.3  m

Tabla 1: Resumen de los resultados experimentales obtenidos y comparativa con los valores teóricos esperados.

Para el análisis de la distancia donde se produce la rotura a partir de las medidas realizadas se computó la diferencia de tiempos en el punto dónde la potencia óptica recibida cae un 50% respecto de su valor nominal. En la Tabla 1 se muestran los valores medidos de diferencia de tiempos entre ambas señales

recibidas una vez se produce la rotura. También se muestra el valor teórico esperado de dicho retardo mediante la evaluación de la ecuación (4), con los valores de índices de refracción efectivos anteriormente mencionados. Por último, se indica el error en la estimación de la distancia de rotura de la

fibra mediante la comparativa del valor teórico con el valor esperado.

De los valores obtenidos en la Tabla 1 se refleja que los errores en la estimación de la distancia de rotura para las diferentes situaciones son debidos principalmente a la imposibilidad de ajustar la ventana de captura de datos del osciloscopio para un retardo entre ambas señales ópticas del orden de  $\mu\text{s}$  con resoluciones de ns de manera simultánea.

Sin embargo, en una futura implementación real de un sistema de monitorización de localización de fallos con el método propuesto en este trabajo este problema quedaría inherentemente resuelto. Ambos nodos centrales, situados entre ellos a una distancia  $L=L_a+L_b$ , deberán utilizar un reloj CLK de sincronismo común para sus equipos, independientes entre sí, pero podrían ajustar sus ventanas de captura de datos del orden de nanosegundos. De esta manera la influencia del transitorio y/o del retardo entre ambas señales ópticas, que puede llegar a ser del orden de decenas de  $\mu\text{s}$  en función de las distancias del enlace, se eliminaría, capturando los datos con la mayor precisión posible proporcionada por ambos circuitos de detección.

Por otra parte, esta limitación no aparece para las medidas realizadas con longitudes de enlace  $L_a$  y  $L_b$  muy próximas entre sí, obteniéndose resoluciones por debajo de unidades de metros. Las discrepancias que aparecen en la estimación de la distancia respecto de estas medidas pueden deberse fundamentalmente a los valores de índices de refracción efectivos considerados para cada longitud de onda y debido al carácter aleatorio de la velocidad de caída en cada corte [6], que asimismo puede diferir para cada longitud de onda. No se aprecian diferencias significativas entre los resultados experimentales obtenidos para fibra monomodo y fibra multimodo, respectivamente.

#### 4.- Conclusiones

Se ha propuesto y demostrado un método de localización de cortes o roturas en enlaces de fibra óptica. Este método emplea el análisis de la diferencia de tiempos de vuelos que sufre la luz en la fibra óptica hasta llegar al fotodetector una vez se produce la rotura de

la misma en un punto arbitrario del enlace. Se han analizado diferentes longitudes de onda de operación y diferentes distancias de rotura.

Del análisis de los resultados experimentales y con el equipamiento utilizado se han obtenido resoluciones de menos de 1 metro en la localización del punto de ruptura, para el caso más favorable. Este dato de resolución mejora en, al menos, un orden de magnitud los publicados en [3], y es comparable a los publicados en [6] bajo similares condiciones de tiempos de caída en ambas señales ópticas.

En un sistema real, donde cada nodo extremo del enlace dispondrá de equipamiento independiente, es de esperar que con el sistema de monitorización propuesto en este trabajo se obtengan resoluciones similares para cualquier distancia de rotura, independientemente del retardo producido por ambas señales ópticas.

El sistema de monitorización propuesto puede ser implementado para la medida en tiempo real de la rotura de un enlace de fibra y su posterior evaluación de la distancia de ruptura. Como inconveniente presenta el empleo de dos canales ópticos de monitorización dedicados, operando a  $\lambda_a$  y  $\lambda_b$ , respectivamente. La imprecisión en cuanto al valor índice de refracción efectivo a las longitudes anteriores de las fibras desplegadas en el enlace y la aleatoriedad de la velocidad de caída de potencia en función del corte son factores de incertidumbre y de error en la medida de la distancia que ha de tenerse también en cuenta.

La técnica propuesta es potencialmente aplicable a redes ópticas pasivas (PON) como sistema embebido de supervisión permanente alternativo a técnicas basadas en OTDRs, resolviendo el problema del solapamiento entre trazas y la atenuación de los divisores ópticos utilizados para la distribución de señales.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido financiado por los proyectos CICyT TEC2012-37983-C03-02 y FP7-ICT-2011 DISCUS (318137).

*Referencias*

- [1] W. CHEN, B. DEMULDER, J. VANDEWEGE and X.Z. QIU, “*Embedded OTDR monitoring of the fiber plant behind the PON power splitter*”, en Proc. Symp. IEEE/LEOS Benelux Chap., Eindhoven, 13-16, 2006.
- [2] S. PARK, J. BAIK and C. LEE, “*Fault-detection technique in a WDM-PON*”, Optics Express, 15, 4, 1461-1466, 2007.
- [3] P. COCHRANE, A. R. HUNWICKS and P. A. ROSHER, “*Novel Fibre Break Locator for Optical Duplex Transmission Systems*”, Electronics Letters, 3, 9, 440-442, 1987.
- [4] G. GLOSH, M. ENDO and T. IWASAKI, “*Temperature-dependent Sellmeier coefficients and chromatic dispersion for some optical fiber glasses*”, Journal of Lightwave Technology, 12, 8, 1338-1342, 1994.
- [5] D.S. MONTERO, “*Multimode Fibre Broadband Access and Self-Referencing Sensor Networks*”, Tesis Doctoral, Dpto. Tecnología Electrónica, Universidad Carlos III de Madrid, Marzo 2011.
- [6] S. ZEMON, A. BUDMAN, T. WEI, E. EICHEN and K. T. MA, “*Decay of Transmitted Light During Fiber Breaks – Implications for Break Location*”, Journal of Lightwave Technology, 12, 9, 1532-1535, 1994.