

TÉCNICA NO PARAMÉTRICA PARA LA DETECCIÓN DE EVENTOS DE ATENUACIÓN EN FIBRA ÓPTICA.

Non-parametric technique for detecting attenuation events in a fiber optic cable

RESUMEN

En la instalación y mantenimiento de fibra óptica, un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR), determina los eventos de atenuación para detectar posibles fallas en la línea de transmisión. La investigación en el área de mediciones en fibra óptica, basadas en técnicas de reflectometría, se enfoca en el compromiso entre el rango dinámico y la resolución espacial. Este artículo describe un método para disminuir el ruido asociado a la técnica de medición, utilizando regresión no paramétrica. Además, se implementó un algoritmo de detección de bordes para la ubicación de eventos de atenuación en la fibra.

PALABRAS CLAVES: Detección de bordes, detección de eventos de atenuación en fibra óptica, intersección de intervalos de confianza, reflectometría óptica en el dominio del tiempo, regresión no paramétrica.

ABSTRACT

In fiber optic maintenance and installation, an optical time domain reflectometer (OTDR) is used to locate attenuation events in order to detect possible failures with in the transmission line. Research in fiber optic measurements, based on reflectometry, is focused on the trade off between dynamic range and spatial resolution. This article describes a method to reduce noise associated to the measuring technique, using non-parametric regression. Also, an algorithm to detect edge it's used to locate attenuation events in the fiber.

KEYWORDS: Edge detection, fiber optic event detection, Intervals confidence intersection, non-parametric regression, OTDR.

1. INTRODUCCIÓN

Con el crecimiento de las redes de fibra óptica, en servicios de comunicaciones de banda ancha, es necesario el desarrollo de sistemas para operaciones de mantenimiento, que permitan la detección de eventos de atenuación de forma automatizada. Equipos como los reflectómetros ópticos en el dominio del tiempo, miden la respuesta impulso de un cable de fibra, utilizando pulsos ópticos de gran potencia y corta duración. Al propagarse estos pulsos debido a características intrínsecas de la fibra (dispersión de *Rayleigh* y reflexiones de *Fresnel* [1]), parte de la señal se refleja, y se obtiene una curva o traza de la potencia reflejada y dispersada en función de la distancia. Con esta técnica de medición, denominada "convencional", es posible determinar eventos en un cable de fibra óptica como: atenuación (dB/km), longitud de la fibra, eventos reflectivos (conectores y fracturas) y no reflectivos (curvas y fusiones) [1].

Investigaciones en el campo de reflectometría óptica, se han enfocado en el compromiso entre el rango dinámico y la resolución espacial [1, 2]. Para lograr una reducción de este compromiso, se desarrollaron técnicas basadas en una secuencia de pulsos ópticos, donde la correlación de

JUAN PABLO URREA DUQUE

Ingeniero Electrónico,
Estudiante de Maestría en Ingeniería
con énfasis en electrónica
Universidad de Antioquia
jpurrea@microe.udea.edu.co

JOSE EDINSON AEDO COBO

Ingeniero Eléctrico, Ph.D.
Profesor Titular,
Departamento de Ingeniería
electrónica
Universidad de Antioquia
joseaedo@udea.edu.co

pulsos complementarios usando código *Golay* (CC-OTDR), ha sido implementada a nivel comercial [3]. Otras técnicas se fundamentan en códigos *biortogonales* y *simplex* [4,5]. En general, estos métodos utilizan pulsos ópticos de menor potencia, y con base en el concepto de espectro esparcido, mejoran la relación señal a ruido (*SNR: Signal to noise ratio*) en comparación con la técnica convencional.

En la técnica propuesta en este artículo, inicialmente se realiza un filtrado de la señal reflejada, a partir del promedio de las trazas recibidas (técnica convencional). Con el fin de lograr una disminución adicional de ruido en un tiempo menor que al promediar más trazas, se propone un método de filtrado adaptativo con base en una regresión no paramétrica. Además, se presentan los resultados de la implementación de un algoritmo de detección de bordes para la ubicación de eventos de atenuación en la fibra. Los algoritmos desarrollados serán usados como elementos centrales en un equipo de detección de eventos de atenuación de bajo costo, que viene siendo desarrollado en el *Grupo de Investigación de Microelectrónica y Control* de la Universidad de Antioquia.

Este artículo ha sido estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se realiza una descripción de las técnicas de filtrado adaptativo y de detección de eventos de atenuación. La sección 3, presenta los resultados al aplicar las técnicas en trazas reportadas por sistemas de reflectometría. Finalmente en la sección 4 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

2. METODOLOGÍA

2.1 Técnica de filtrado adaptativo para la curva de atenuación.

Entre las diferentes técnicas de reflectometría óptica en el dominio del tiempo, la técnica convencional es la más utilizada en equipos comerciales. Sus ventajas radican en la menor complejidad en el diseño y construcción del *hardware*, así como en el método utilizado para la disminución del ruido, con base en el promedio de las trazas. Este proceso de filtrado es necesario ya que los niveles de potencia óptica detectados son muy inferiores ($\approx 64\text{dBm}$ para una distancia de 100 km [1, 2]) con respecto al pulso de prueba, por lo que las especificaciones del circuito de recepción (de la señal reflejada y dispersada) son exigentes en cuanto al manejo del ruido. Aún así, esta etapa aporta la mayor parte del ruido en el sistema de medición [2].

Para lograr una mayor reducción del ruido, una vez promediada la señal hasta cierto nivel, se propone un enfoque donde se filtra la curva de atenuación tomando en cuenta un promedio de valores cercanos a un punto de interés (“suavizado”). Esto se realiza a partir de la regresión no paramétrica, la cual mantiene características como saltos o cambios instantáneos de pendiente que se presentan en la traza, y que son útiles para la ubicación de eventos de atenuación.

2.1.1 Regresión no paramétrica

La aproximación a una curva de respuesta promedio m para un conjunto de datos (X_i, Y_i) , involucra la relación funcional [6]:

$$Y_i = m(X_i) + e_i; \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

donde e_i es el error de cada observación, el cual se asume aleatorio, e independiente, (con valor esperado cero y varianza σ^2), y n es la cantidad de observaciones. Para determinar la función ideal $m(x)$, se puede realizar el promedio de valores Y_i cercanos a un punto x de interés. Este procedimiento puede ser definido como [6]:

$$\hat{m}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i(x) Y_i \quad (2)$$

si $W_i(x)=1$, la función estimada $\hat{m}(x)$ sería el promedio de una cantidad n de valores cercanos a un punto x . $W_i(x)$ también se puede describir como una función de densidad con un parámetro de escala que ajuste la magnitud de los pesos cerca de x . Esta función *kernel* (K) es real,

continua, acotada, simétrica, y su integral es 1 en el intervalo [6]. La función $\hat{m}(x)$ se puede determinar utilizando el estimador *Nadaraya-Watson* [6] como se describe en la ecuación 3:

$$\hat{m}_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n K_h(x-x_i) Y_i}{\sum_{i=1}^n K_h(x-x_i)} \quad (3), \quad K_h(u) = h^{-1} K(u/h)$$

donde h es el parámetro que determina el tamaño de los pesos, y se conoce también como el “ancho de banda”. Para esta aplicación se seleccionó un kernel *gaussiano* (ecuación 4) ya que no genera nuevas discontinuidades en la señal de respuesta [6].

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}u^2\right) \quad (4)$$

La cantidad de suavizado o reducción de ruido depende del ancho de banda seleccionado. Se puede calcular un valor óptimo de h minimizando el error cuadrático medio (*MSE: mean square error*) entre la función ideal $m(x)$, y la estimada (ecuación 5), para cada valor de x :

$$\begin{aligned} MSE\{\hat{m}_h(x)\} &= E\left\{\left[\hat{m}_h(x) - m(x)\right]^2\right\} \\ &= \text{Sesgo}\left[\hat{m}_h(x)\right]^2 + \text{Varianza}\left[\hat{m}_h(x)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

Con el fin de minimizar el *MSE*, se debe considerar el compromiso entre la varianza y el sesgo. Un ancho de banda grande implica un sesgo mayor y una varianza menor, produciendo una curva que varía muy poco. Para un ancho de banda pequeño, en cambio, el sesgo es menor y la varianza aumenta, generando una curva con mayor ruido. La selección de un ancho de banda óptimo constante, no es conveniente debido a la naturaleza cambiante de la respuesta de la fibra, al utilizar la técnica de reflectometría. Por tanto, se utilizó un ancho de banda variable para mantener detalles presentes en una traza de fibra, como saltos o cambios instantáneos de pendiente, que caracterizan los eventos de atenuación.

El método aplicado para determinar el ancho de banda variable o adaptativo, se fundamenta en la intersección de los intervalos de confianza (*ICI: Intervals confidence intersection*), explicado en la sección 2.1.2. Este método no requiere la estimación del sesgo a partir del cálculo de derivadas de orden superior, ya que es un problema de mayor dificultad que el de la estimación de la función original [7].

2.1.2 Procedimiento de selección del tamaño del kernel adaptativo

Considere la ecuación 6, donde se tiene el efecto del sesgo y la desviación estándar en el error cuadrático medio. Utilizando serie de *Taylor*, se aproximan el sesgo y la desviación estándar para obtener la siguiente relación, evaluando la función estimada en $h_{\text{optimo}}(x)$ [8]:

$$\frac{Std\{\hat{m}_{h_{\text{optimo}}}(x)\}}{Sesgo\{\hat{m}_{h_{\text{optimo}}}(x)\}} = 2 \quad (6)$$

Para un tamaño de *kernel* dado (*h*), la estimación del error se puede expresar como:

$$|\hat{m}_h(x) - m(x)| \leq |Sesgo\{\hat{m}_h(x)\}| + |\zeta_h(x)| \quad (7)$$

donde $\zeta_h(x)$ es una variable aleatoria con media cero y desviación estándar $Std\{\hat{m}_h(x)\}$. Entonces:

$$|\hat{m}_h(x) - m(x)| \leq |Sesgo\{\hat{m}_h(x)\}| + X_p \cdot Std\{\hat{m}_h(x)\} \quad (8)$$

El factor X_p depende de la probabilidad *p* de que el error esté en el intervalo. Usando la ecuación 6 junto con la 8, se llega a la siguiente expresión para $h \leq h_{\text{opt}}$:

$$|\hat{m}_h(x) - m(x)| \leq \Gamma \cdot Std\{\hat{m}_h(x)\} \quad (9)$$

donde $\Gamma = 1/2 + X_p$. El factor de escala Γ puede tomar diferentes valores dependiendo de la exactitud de la estimación. Valores grandes de Γ corresponden a valores grandes de *p*. La regla *ICI* establece que existe un valor *h* cercano a h_{optimo} , y se puede determinar con el siguiente procedimiento:

Sea $H = \{h_1, h_2, \dots, h_J\}$ un conjunto finito de *J* anchos de banda para un *kernel*, iniciando con un *h* pequeño. A partir de la ecuación 9 se determina una secuencia de intervalos de confianza, de forma iterativa, de acuerdo con las ecuaciones 10, donde cada intervalo D_j corresponde a un tamaño de *kernel* en *H*.

$$D_j = [L_j, U_j], j = 1, \dots, J$$

$$L_j = \hat{m}_{h_j}(x) - \Gamma \cdot Std\{\hat{m}_{h_j}(x)\} \quad (10)$$

$$U_j = \hat{m}_{h_j}(x) + \Gamma \cdot Std\{\hat{m}_{h_j}(x)\}$$

La regla *ICI* se puede sintetizar de la siguiente manera [7, 8]: Considere la intersección de los intervalos de confianza $D_j, 1 \leq j \leq i$, y sea i_+ el mayor *i* para el cual los intervalos D_j tengan un punto en común. Este i_+ define el tamaño del *kernel* adaptativo $h_+(x) = h_{i_+}$ y consecuentemente la función estimada $m_{h_+(x)}(x)$.

Algoritmo para la selección adaptativa del ancho de banda [7]

$L_s = -\infty, U_i = \infty$
while $L_s \leq U_i \ \& \ i \leq j$

$L = \hat{m}_{h_j}(x) - \Gamma \cdot Std\{\hat{m}_h(x)\}$
 $U = \hat{m}_{h_j}(x) + \Gamma \cdot Std\{\hat{m}_h(x)\}$
 $L_s = \max[L_s, L], U_i = \min[U_i, U]$
 $i = i + 1$

end while
 $h_+(x) = h_{i-1}$

En la figura 1, se muestra la variación de los intervalos de confianza para cada valor $\hat{m}_h(x)$ estimado, y la detección del ancho de banda óptimo h_+ una vez se cruzan los intervalos. El umbral Γ en D_j determina el desempeño del algoritmo con respecto a la reducción de ruido. Para valores grandes de Γ se obtiene un $h_{i_+} \geq h_{\text{optimo}}$ y sobre

suaviza la señal, mientras que para valores de donde $h_{i_+} < h_{\text{optimo}}$, se presenta un suavizado menor.

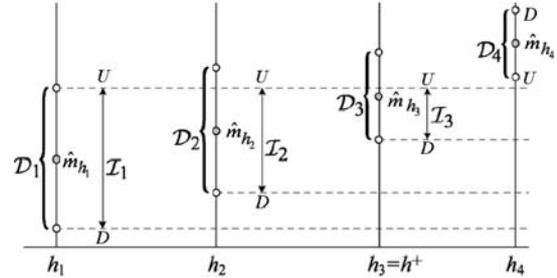


Figura 1. Determinación del ancho de banda óptimo utilizando la intersección de los intervalos de confianza (*ICI*).

2.2 Detección de eventos de atenuación en la fibra

Una curva de atenuación típica de un cable de fibra óptica, presenta tres tipos de características [1,2]: líneas rectas causadas por el efecto de retrodispersión de *Rayleigh*, picos causados por reflexiones discretas (Reflexiones de *Fresnel*), y por último escalones que pueden ser positivos o negativos, como se muestra en la figura 2. Conectores y cortes, producen un cambio en el índice de refracción en el cable de fibra, y se denominan eventos reflectivos. Éste fenómeno se observa en la curva de atenuación, a manera de picos superpuestos a la señal retrodispersada. Los eventos no reflectivos, como curvaturas o uniones por fusión, solo presentan pérdidas por inserción, donde parte de la potencia óptica se refleja a través del revestimiento de la fibra [1].

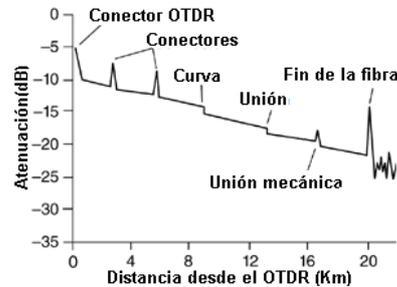


Figura 2. Curva de atenuación para un cable de fibra óptica.

2.2.1 Detección de bordes de tipo escalón

Para la detección de bordes se puede utilizar la derivada de la señal, la cual debería presentar grandes picos en la posición de una discontinuidad. Esta operación se puede realizar de manera discreta con la convolución entre la señal y filtros como $[1 \ -1]$ o $[1/2 \ 0 \ -1/2]$, los cuales son una aproximación en serie de *Taylor* de la derivada. Pero esta estrategia conlleva a detectar un gran número de bordes espurios, y por tanto la señal se debe filtrar antes de derivarla. Debido a esto, el operador de derivada debe tener ciertas características. Un operador plano reduce la probabilidad de falsos bordes, pero es una desventaja en lo que respecta a la ubicación de bordes consecutivos. Por tanto el filtro debe ser más pequeño que la distancia entre bordes para evitar interferencia. Por otra parte, una

máxima exactitud en la localización implica un operador angosto, pero será extremadamente sensible al ruido. La solución es un filtro de derivada gaussiano (ecuación 11), el cual es un excelente compromiso entre localización y reducción de ruido [9].

$$h'(x) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

La convolución de una señal escalón con el operador de derivada gaussiano, produce un valor máximo o mínimo en el borde del escalón. Esto se ilustra en la figura 3. El parámetro σ se ajusta con el fin de reducir el compromiso entre localización y ruido. El paso siguiente es la umbralización de los gradientes mayores que un valor límite, para detectar los bordes más representativos.

Detección de bordes utilizando el operador de derivada gaussiano

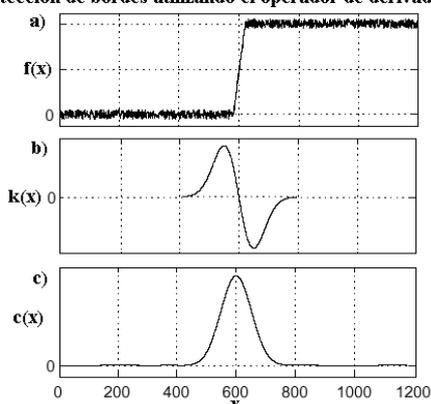


Figura 3. a) $f(x)$: Función escalón con ruido b) $k(x)$: Operador de derivada gaussiano y c) $c(x)$: convolución entre $f(x)$ y $k(x)$.

3. RESULTADOS

La implementación de las técnicas descritas se realizó por simulación en el ambiente *Matlab 6.5*, en un computador *DELL Optiplex GX270* con procesador *Pentium IV* de 3GHz. Las trazas se tomaron de archivos de ejemplo de programas para reflectómetros comerciales, a las que se les agregó ruido aleatorio con distribución normal en escala lineal. En la figura 4a se aprecia una traza (*Trazal*) con $\sigma_{\text{ruido}}=7\text{nW}$ en escala logarítmica, y presenta un evento reflectivo. Ahora, al promediar $N=2 \times 10^5$ trazas se detecta otro evento (Fig. 4b). Con la técnica convencional se reduce la magnitud de ruido en $\sigma_{\text{ruido}}/(N)^{1/2}$, y para este caso un ΔSNR de 13.25dB (ecuación 12) [1, 2, 3]. En la ecuación 13, se calcula el tiempo (T_N) que toma llegar a este valor de ΔSNR , considerando el tiempo de vuelo (T_v) de un pulso óptico en una fibra de longitud L [1]:

$$\Delta\text{SNR} = 5 \log_{10} \sqrt{N} \quad (12)$$

$$T_N = \frac{T_v N}{0.9}, \quad T_v = \frac{2L}{v_g}, \quad v_g = \frac{c}{n_g} \quad (13)$$

donde c es la velocidad de la luz y n_g es el índice de refracción de la fibra. Aquí se considera un 90% en la adquisición de trazas por unidad de tiempo, y el 10% restante en procesamiento [1]. Esto equivale a $T_N \approx 35$ segundos para la *Trazal*.

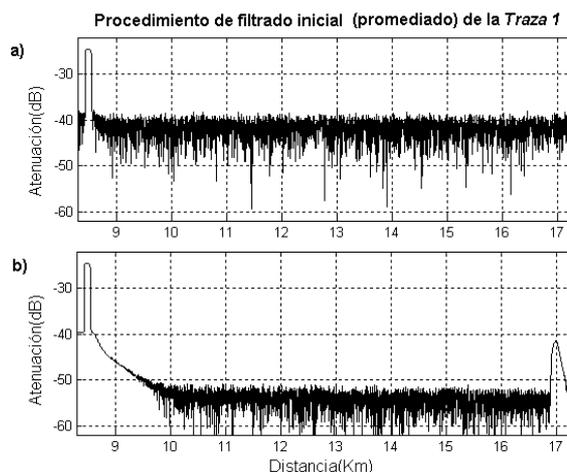


Figura 4. a) Adquisición de una traza ($\sigma_{\text{ruido}}=7\text{nW}$) b) Resultado de la técnica convencional al promediar 200.000 trazas.

La ecuación 12 tiende a un límite para valores superiores de N , y para alcanzar un ΔSNR mayor, se requieren más trazas y por tanto mucho más tiempo en la adquisición [2]. Con este filtrado inicial se procede con la técnica propuesta. La figura 5 muestra el resultado de la regresión no paramétrica (con regla *ICI*) para la *Trazal*, y se compara con el resultado de seguir promediando con la técnica convencional.

Comparación entre la técnica convencional y la propuesta

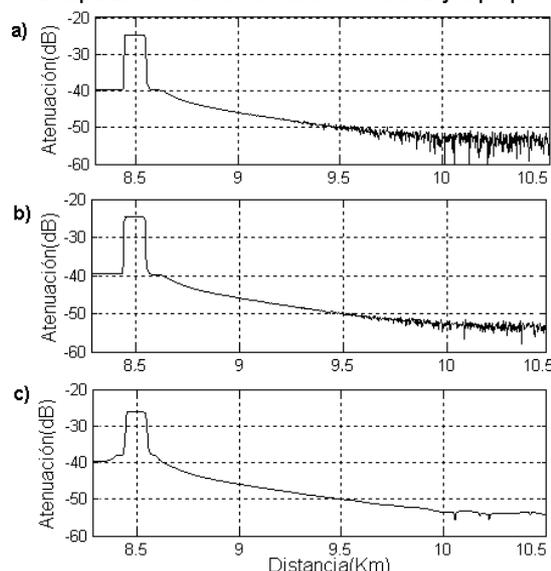


Figura 5. a) Sección de la *Trazal* después del filtrado inicial b) *Trazal* al promediar $N=1.0694 \times 10^6$ trazas c) *Trazal* con regresión no paramétrica (ICI).

En el filtrado adaptativo de la *Trazal*, se utilizaron los siguientes parámetros: $H = \{h(s) = \Delta x 1.45^s, s = [1,7], \Delta s=0.01\}$, y $\Gamma = \{[0.05,4], \Delta\Gamma= 0.05\}$. El cálculo de la desviación estándar $Std\{\hat{m}_h(x)\}$ de la ecuación 8, se genera a partir de la ecuación 14 [7]:

$$\hat{\sigma} = \{Mediana(|Y_i - Y_{i-1}|), i = 2, \dots, n\} / (\sqrt{2} \cdot 0.6745) \quad (14)$$

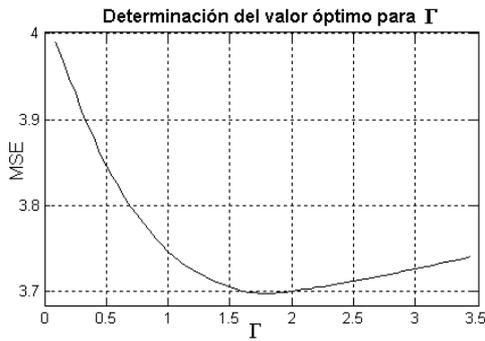


Figura 6. Variación del MSE para diferentes valores de Γ .

La mejor función estimada, es la que presenta el menor MSE, al aplicar la regla ICI. Para esta traza, se encontró un $MSE=3.69$ en $\Gamma=1.2$ (Fig. 6). En este caso se obtiene un ΔSNR_{ICI} de 1.8202dB (ecuación 15), el cual representa la disminución de la desviación estándar (σ_i después de promediar, σ_f después de filtrar) en una región donde no existe fibra.

$$\Delta SNR_{ICI} = 5 \log_{10} \sqrt{\sigma_i / \sigma_f} \quad (15)$$

Por simulación se obtuvo un tiempo de $T_s=113$ segundos. Ahora, para alcanzar un ΔSNR de (1.8202+13.2526)dB con la técnica convencional, se requieren un total de $N=1.0694 \times 10^6$ trazas, y por tanto un tiempo adicional de 174.26 segundos ($T_N - 35$).

Comparación de técnicas de filtrado para un mayor σ_{ruido}

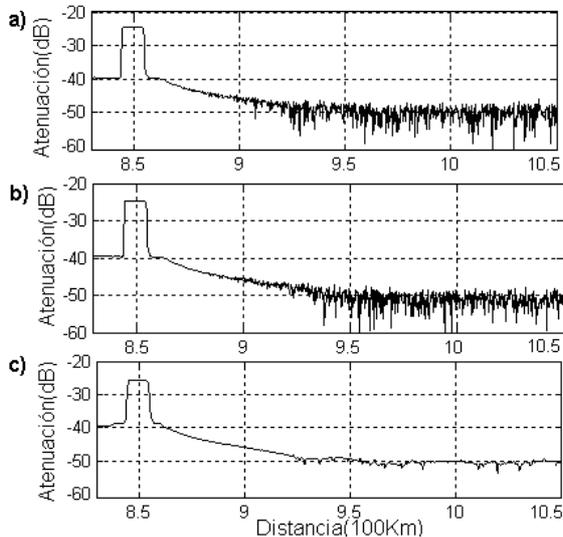


Figura 7. a) Sección de la *Trazal* después del filtrado inicial b) *Trazal* al promediar $N=6.82 \times 10^5$ trazas ($T_N=169s$) c) *Trazal* filtrada con regresión no paramétrica (ICI), $MSE=13.67$ en $\Gamma=0.7$, $\Delta SNR = 1.605dB$, $T_s = 5.406s$.

El tiempo de proceso del filtrado adaptativo, se reduce al utilizar menos valores de Γ y H . Si $\Gamma = \{[0.1, 4], \Delta\Gamma=0.1\}$ y $H = \{h(s)=(\Delta L), 1.45^\circ, s=[1,7], \Delta s=0.1\}$ se obtienen valores muy próximos a los presentados para una selección de Γ y H mas fina ($MSE= 3.67$ en $\Gamma = 1.2$, $\Delta SNR=1.642dB$, $T_s= 6.438$ segundos). Además, la mayor

parte de la complejidad computacional, se redujo en el cálculo de la regresión no paramétrica usando la transformada rápida de Fourier (de $O(MN)$ a $O(N \log_2 N)$), y almacenando en memoria las funciones estimadas para cada valor de H . Para una mayor magnitud de ruido ($\sigma_{ruido}=70nW$), el filtrado presenta un desempeño similar al de la figura 5 tanto en la ganancia de ΔSNR , como en el tiempo de simulación (ver figura 7).

Derivada de una traza utilizando el operador de derivada gaussiana

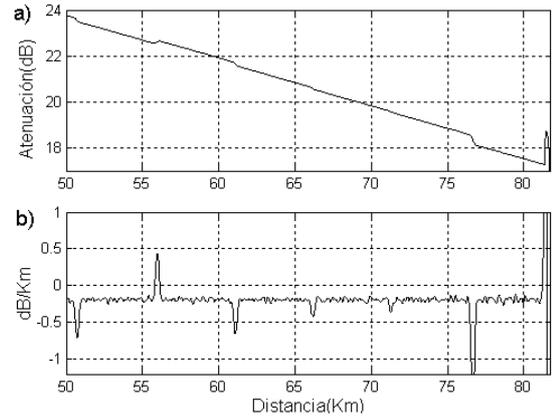


Figura 8. a) *Trazal*, b) Convolución entre a) y el operador de derivada gaussiana ($\sigma = 0.06$).

Una vez filtrada la curva de atenuación, se procede con la detección de los eventos de atenuación. En la figura 8, se aprecia una sección de la *Trazal* con diferentes tipos de eventos, y el resultado de la convolución con el operador de derivada gaussiana. Previo a la umbralización, se normaliza el resultado de la convolución utilizando una desviación estándar local, como se muestra en la figura 9b. Con la disminución del parámetro de escala σ , la detección es más sensible al ruido, ya que la convolución se realiza con menos coeficientes del operador de derivada, generando presencia de bordes falsos en la respuesta, si se mantiene el umbral.

Detección de eventos a partir de la derivada normalizada y el umbral

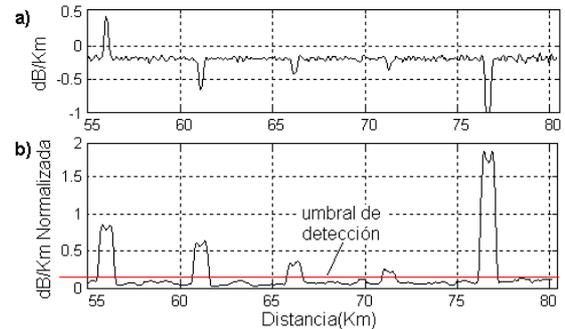


Figura 9. a) Derivada de la *Trazal* b) Detección de eventos a partir de la umbralización de a) ($\sigma = 0.06$, umbral=0.1).

Para determinar el desempeño del detector de borde se implementó un método gráfico, basado en la tasa de aciertos y fallos en la detección, denominado “curva de operación característica del receptor” (*ROC: Receiver Operating Characteristic*) [10]. La curva *ROC* permite

evaluar el desempeño de la detección en distintos puntos de operación, definidos por los umbrales, a partir de la tasa de verdaderos positivos y de falsos positivos en la clasificación (ver figura 10). Al comparar clasificadores es conveniente expresar el desempeño de forma escalar. Un método común es calcular el área bajo la curva *ROC* [10]. La curva *ROC* presenta un mejor desempeño en la detección para $\sigma = 0.05$ para una variación del umbral desde 0.01 hasta 100, como se muestra en la tabla 1.

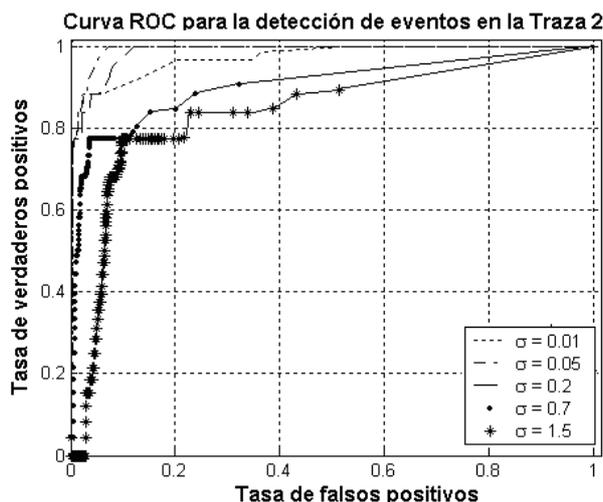


Figura 10. Curvas *ROC* para la detección de borde realizada con diferentes valores de σ , variando el umbral de detección

| σ | Área bajo la curva <i>ROC</i> |
|----------|-------------------------------|
| 0.01 | 0.9719 |
| 0.05 | 0.9906 |
| 0.2 | 0.9864 |
| 0.7 | 0.9024 |
| 1.5 | 0.8381 |

Tabla 1. Áreas bajo las curvas *ROC* para diferentes σ .

4. CONCLUSIONES

En este artículo, se propone una técnica novedosa para la detección de eventos de atenuación en un cable de fibra óptica. Para su implementación, se utiliza un filtrado adaptativo de la curva característica de atenuación con el fin de lograr una reducción adicional del ruido en la traza recibida, y una mayor confiabilidad en la etapa de detección de eventos. El procedimiento de reducción de ruido propuesto se basa en una regresión no paramétrica adaptativa. Con esta técnica se logran ganancias en el Δ SNR del orden de 1.8dB, en un tiempo de proceso menor, comparándolo con la técnica convencional.

Una vez realizado el filtrado, se propone el desarrollo de un algoritmo para la ubicación de eventos de atenuación, aplicando un método de detección de bordes en una dimensión, basado en el operador de derivada *gaussiano*. Esta estrategia de detección de eventos, requiere un menor tiempo de procesamiento al implementarse con el algoritmo de la *FFT*. Además, el desempeño es superior

cuando se ajustan los parámetros de escala y umbral, al compararlo con una detección ideal.

La implementación de los algoritmos descritos, en un sistema de reflectometría basado en *DSP*, no representa mayor complejidad debido a la naturaleza de las operaciones involucradas.

Como trabajo futuro se plantea la construcción de un prototipo de prueba para implementar los algoritmos desarrollados. Con base en los resultados obtenidos en la ubicación de eventos, se puede caracterizar el enlace de fibra para determinar el tipo de evento detectado.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Derickson, *Fiber Optic Test and Measurement*, HP Professional Books, 1998, Cap. 11.
- [2] D. Anderson, L. Johnson, F. Bell, *Troubleshooting Optical-Fiber Networks: Understanding and Using Your Optical Time-Domain Reflectometer*, Elsevier Academic Press, Second Edition, 2004, Cap. 2 y 3.
- [3] M. Nazarathy, S. A. Newton, R. P. Giffard, D. S. Moberly, F. Sischika, W. R. Trutna, Jr., and S. Foster, "Real-time long range complementary correlation optical time domain reflectometer," *J. Lightwave Technol.* 7, pp. 24-38, 1989.
- [4] D. Lee, H. Yoon, P. Kim, J. Park, N. Y. Kim, and N. Park, "SNR Enhancement of OTDR Using Biorthogonal Codes and Generalized Inverses," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 17 no. 1 pp.163-165, Jan. 2005.
- [5] D. Lee, H. Yoon, P. Kim, J. Park, and N. Park, "Optimization of SNR Improvement in the Noncoherent OTDR Based on Simplex Codes," *J. Lightwave Technol.* 24, pp.322-328, Jan. 2006
- [6] W. Härdle, *Applied Nonparametric Regression*, Cambridge University Press, Cap. 2 y 3, 1994
- [7] V. Katkovnik, "A New Method for Varying Adaptive Bandwidth Selection," *IEEE Transactions On Signal Processing*, Vol. 47, No. 9, pp. 2567-2571 Sept. 1999
- [8] V. Katkovnik, I. Shmulevich, "Nonparametric Density Estimation with Adaptive Varying Window Size," *Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing VI, European Symposium on Remote Sensing*, Barcelona, Spain, September 2000.
- [9] J. Canny, "A computational approach to edge detection". *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* Vol. 8, No. 6, pp. 679-714, Nov. 1986.
- [10] Fawcett, T. "An introduction to ROC analysis," *Pattern Recognition Letters*, Vol. 27, Issue 8, Elsevier, pp. 861-874, Jun. 2006.