

Verificación y monitorización de redes ópticas

Josep Maria Fàbrega
Simó Graells

PID_00175710

Índice

1. Reflectometría en el dominio temporal.....	5
1.1. Principio de funcionamiento del OTDR	5
1.1.1. Diagrama de bloques del OTDR	6
1.1.2. Casos de utilización del OTDR	6
1.2. Medidas reflectométricas	7
1.2.1. Parámetros de medida	7
1.2.2. Estudio de la traza del OTDR	8
1.2.3. Medidas en los acontecimientos	10
1.2.4. Anomalías en la medida	11
1.3. Características técnicas del OTDR y su influencia en la medida	14
1.3.1. Especificaciones del OTDR	14
1.3.2. Tipos de OTDR	18
1.3.3. Mejora de las medidas reflectométricas	18
2. Monitorización de prestaciones de señales ópticas.....	21
2.1. Relación señal-ruido óptica	21
2.1.1. Análisis de espectro	22
2.1.2. Técnicas de polarización	23
2.1.3. Técnicas interferométricas	25
2.1.4. Otras técnicas	27
2.2. Dispersión cromática	28
2.2.1. Medida con tono radiofrecuencia	28
2.2.2. Medida del retraso en dos bandas vestigiales	31
2.2.3. Histograma	31
2.2.4. Monitorización electrónica	33
2.3. Dispersión en el modo de polarización	34
2.3.1. Monitorización con tono RF	34
2.3.2. Medida del DOP	37
2.3.3. Monitorización electrónica	38
Bibliografía.....	41

1. Reflectometría en el dominio temporal

1.1. Principio de funcionamiento del OTDR

El reflectómetro óptico en el dominio temporal (OTDR) es un instrumento de medida fundamental para el análisis de los enlaces de fibra óptica.

El OTDR permite analizar las propiedades del enlace, detectar, localizar y medir los acontecimientos producidos en cualquier punto de la fibra y localizar posibles anomalías. La gráfica de la medida reflectométrica representa la atenuación de la fibra a lo largo de su longitud, y permite extraer algunas de las características de los componentes que forman el enlace.

Son casos habituales de utilización del OTDR el test posterior a la instalación, el test de mantenimiento preventivo o la localización de fallos en el enlace de fibra óptica.

Es importante saber analizar e interpretar correctamente los resultados de las medidas llevadas a cabo con el OTDR. En algunos casos, los OTDR pueden interpretar de manera errónea los acontecimientos a causa de una configuración inadecuada de sus parámetros. Por este motivo, en la validación de enlaces de fibra es necesaria la intervención de un experto capaz de interpretar y analizar las gráficas resultantes del OTDR. Su función es estudiar cada uno de los acontecimientos, identificarlos, determinar si está justificada su presencia y comprobar que sus valores se encuentran dentro de los márgenes aceptables.

El funcionamiento del OTDR se basa en detectar y representar la señal que retorna al aparato después de haber inyectado un pulso de luz en la fibra. En función del tiempo transcurrido desde la transmisión del pulso y la detección de la luz reflejada, el OTDR puede calcular la distancia a la que se encuentra la imperfección o el fenómeno. Esto es posible debido a dos propiedades ópticas de la fibra.

- **Dispersión de Rayleigh:** se debe a la presencia de irregularidades en la fibra que aparecen durante el proceso de fabricación. La luz que incide en las irregularidades se dispersa en todas direcciones y, a consecuencia de esto, la señal óptica que atraviesa la fibra es atenuada. Además, una parte de la potencia dispersada se acopla al modo fundamental de la fibra, en sentido inverso a la propagación de la señal, y retorna hacia el OTDR. Este fenómeno de reflexión de luz hacia el OTDR recibe el nombre de *backscattering*. Los fabricantes de fibra óptica minimizan el efecto de la dispersión de Rayleigh reduciendo la medida de las imperfecciones. Esto es posible haciendo un enfriamiento más lento de la fibra en el proceso de fabricación.

Nota

El reflectómetro óptico en el dominio temporal es conocido en inglés como *optical time domain reflectometer (OTDR)*.

Nota

La dispersión de Rayleigh es un fenómeno intrínseco de la fibra que se produce de manera uniforme a lo largo de toda su longitud, mientras que las reflexiones de Fresnell son acontecimientos que tienen lugar en el enlace de fibra de manera puntual.

- **Reflexión de Fresnel:** cuando la luz que viaja por la fibra óptica se encuentra con una discontinuidad en el índice de refracción, una pequeña parte de la misma es reflejada de nuevo hacia el OTDR. Este fenómeno se conoce como reflexión de Fresnel. En un enlace, la cantidad de luz reflejada por este motivo es aproximadamente de un 4%.

1.1.1. Diagrama de bloques del OTDR

La figura siguiente muestra, de manera esquemática, los elementos que forman parte del OTDR:

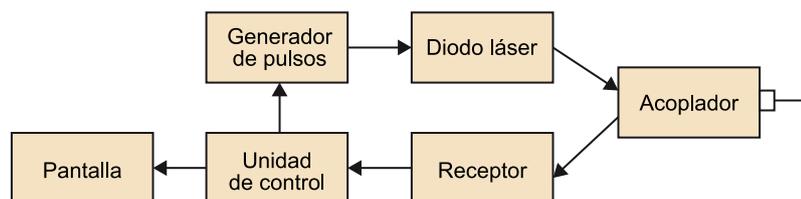


Figura 1. Diagrama de bloques de un OTDR

El diodo láser es el encargado de transformar la señal eléctrica en la señal óptica que será transmitida hacia la fibra. El láser está alimentado por un generador de pulsos. Los pulsos que genera se caracterizan por su anchura (duración) y la frecuencia de repetición.

El acoplador óptico separa la señal enviada hacia la fibra óptica de la que vuelve. Por medio del acoplador, la señal procedente del diodo láser será insertada en la fibra, mientras que la señal procedente de la fibra será dirigida hacia el fotodiodo. Algunos OTDR, en lugar de utilizar un acoplador óptico, emplean un circulador óptico con el objetivo de aumentar su margen dinámico.

El receptor utilizado por el OTDR acostumbra a ser un fotodiodo de avalancha (APD) y su función es convertir la luz procedente de la fibra óptica en energía eléctrica.

Una vez que el OTDR ha recibido a través del fotodiodo la señal procedente de la fibra, esta es muestreada y digitalizada. Las muestras, que inicialmente se encuentran en el dominio temporal, se pasan a distancias utilizando el índice de refracción de la fibra. La unidad de control procesa las muestras adquiridas y, finalmente, el resultado obtenido se representa en la pantalla del OTDR.

1.1.2. Casos de utilización del OTDR

Los OTDR son instrumentos versátiles, que permiten un abanico muy amplio de medidas:

- Medida de la longitud del enlace.
- Medida de las pérdidas de la totalidad del sistema (de extremo a extremo).

Referencia bibliográfica

HP 8147 Optical Time Domain Reflectometer. User's Guide (1997). Hewlett-Packard.

- Medida de las pérdidas introducidas por las uniones, conectores, etc.
- Medida de las reflexiones en conectores, uniones mecánicas, etc.
- Localización de rupturas de la fibra óptica y defectos.
- Verificación del correcto alineamiento entre los dos segmentos de una unión.
- Detección de la degradación repentina o gradual de la fibra óptica.
- Medida de las pérdidas de retorno tanto de un sistema de fibra óptica, como de componentes discretos.
- Medida de la atenuación de la fibra (dB/km).
- Monitorización activa de los sistemas de fibra óptica.

1.2. Medidas reflectométricas

Al llevar a cabo una medida reflectométrica, hay que tener especial cuidado en la elección de los parámetros de configuración de la medida y en el análisis de la traza obtenida.

1.2.1. Parámetros de medida

1) **Nivel de inyección.** El nivel de inyección es el nivel de potencia óptica que el OTDR inyecta en la fibra. Hay una relación directa entre este parámetro, el margen dinámico y la precisión de la medida. Cuanto mayor sea el nivel de potencia transmitido, mayor será el nivel de regreso de la señal y, por lo tanto, tendremos un margen dinámico mayor. Sin embargo, hay que tener en cuenta que niveles altos de potencia pueden causar la aparición de no linealidades en la fibra óptica.

2) **Ancho del pulso.** La cantidad de luz que se inyecta en la fibra es proporcional al ancho del pulso. Pulsos de duración elevada tienen una energía alta y, por lo tanto, encontramos más retorno de señal al hacer la medida. Cuanta más duración del pulso, mayor es la distancia que se puede medir. Sin embargo, como desventaja aumenta la zona muerta y disminuye la resolución.

3) **Distancia.** Es la distancia sobre la cual el OTDR hará la medida. Distancias excesivamente grandes disminuirán la resolución de la traza, mientras que distancias demasiado cortas no permitirán visualizar el enlace completo.

4) **Media.** Para disminuir la relación señal-ruido, cada punto de adquisición se muestrea repetidamente y se hace la media de los resultados.

5) **Longitud de onda.** Es la longitud de onda en la que se llevará a cabo la medida. El comportamiento de la fibra y de los componentes ópticos varía con la longitud de onda.

6) **Parámetros de la fibra.** Para calcular de una manera precisa los resultados de distancia, pérdidas, etc. hay que introducir parámetros propios de cada fibra óptica como por ejemplo el índice de refracción y el coeficiente de retrodifusión.

7) **Umbral de los acontecimientos.** En la detección automática de acontecimientos, el OTDR necesita un valor umbral para decidir si se trata de un acontecimiento o no.

1.2.2. Estudio de la traza del OTDR

La traza del OTDR es la representación gráfica, en unidades logarítmicas, de la potencia de la señal devuelta por el *backscattering* y las reflexiones de Fresnel que recibe el OTDR en función de la distancia.

Los elementos que encontramos de manera más habitual en una traza del OTDR son los siguientes.

1) Tramo de fibra

La potencia recibida por el OTDR irá disminuyendo a medida que el pulso se propaga por la fibra. Esto se debe al hecho de que la potencia *backscattering* es proporcional a la potencia incidente, y esta se va atenuando a medida que avanza por la fibra. Por lo tanto, la traza de la medida reflectométrica de un tramo de fibra se representa con una recta decreciente.



Figura 2. Representación de un tramo de fibra en la traza del OTDR.

Nota

Hay que notar que algunas de las medidas mostradas en este apartado emplean un ancho de pulso elevado, lo que provoca la saturación del receptor y, por lo tanto, el aumento de la zona muerta. La finalidad de esto es suavizar la traza a la vez que se exageran los acontecimientos reflexivos. En una medida cuidadosa sobre las mismas redes, sería conveniente reducir el ancho del pulso.

2) Acontecimientos reflexivos

Las reflexiones son producidas por cambios en el índice de refracción del medio de propagación. En los conectores y las uniones mecánicas, normalmente aparecen acontecimientos reflexivos debido a la presencia de un pequeño espacio entre las fibras unidas.

Se presenta una reflexión sobre la traza del OTDR como una forma de pico de potencia recibida, seguida de un descenso después del cual se recupera aproximadamente el nivel de *backscattering* previo. El ancho de este pico está relacionado directamente con la duración temporal del pulso inyectado en la fibra.

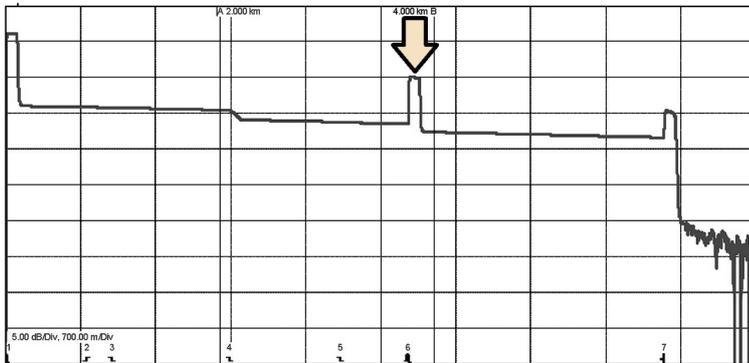


Figura 3. Representación de un acontecimiento reflexivo en la traza del OTDR

3) Acontecimientos no reflexivos

Un acontecimiento no reflexivo es una caída brusca del nivel de señal de *backscattering* y se presenta en la traza del OTDR como una discontinuidad en forma de escalón descendente. Este tipo de acontecimientos no presentan reflexión, pero sí pérdidas puntuales. Los elementos que pueden provocar estos acontecimientos son conexiones de fusión y las curvaturas en la fibra.

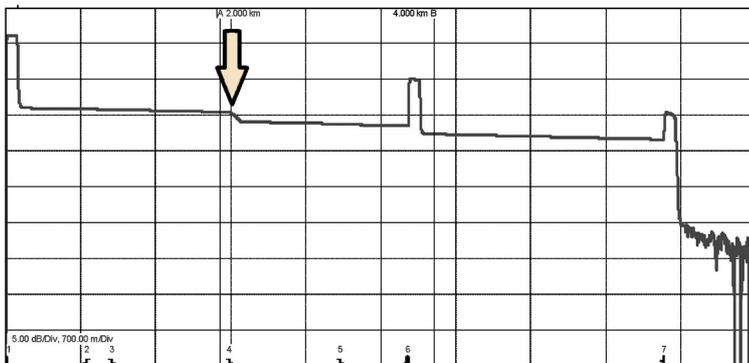


Figura 4. Representación d'un acontecimiento no reflexivo a la traza de l'OTDR

4) Final de fibra

El final de fibra se caracteriza por un descenso rápido del nivel de retrodifusión hasta lograr el nivel de ruido del OTDR.

En función de si se produce o no reflexión justo antes del descenso de la señal, podemos conocer el estado del extremo final de la fibra. Si aparece una reflexión, indica un final de fibra con un corte de fibra controlado o con un conector. En cambio, si no aparece una reflexión, es posible que tengamos una rotura.



Figura 5. Representación del final de fibra en la traza del OTDR

1.2.3. Medidas en los acontecimientos

Por medio del estudio de la traza para cada acontecimiento, se puede obtener información de las pérdidas de inserción, la reflectancia y su localización. Al hacer el estudio para un tramo de fibra, podemos obtener información sobre la longitud del tramo, las pérdidas en el tramo de fibra o el coeficiente de atenuación de la fibra (dB/km).

Ahora veremos cómo se hacen algunas de estas medidas.

1) Pérdidas en un tramo de fibra

La diferencia en dB entre la potencia medida en dos puntos cualquiera de la fibra nos proporciona la atenuación del tramo entre los dos puntos.

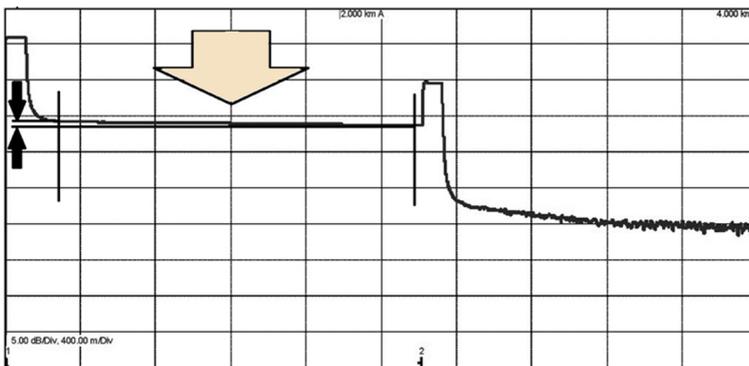


Figura 6. Medida de las pérdidas en un tramo de fibra

Si dividimos la pérdida de un tramo con solo fibra por la distancia entre los dos puntos, podemos encontrar el coeficiente de atenuación de la fibra, que habitualmente se expresa en dB/km.

2) Pérdidas de inserción

Para calcular las pérdidas de inserción, podemos diferenciar dos métodos:

Referencia bibliográfica

Optical Time Domain Reflectometers. Pocket Guide (2001). Agilent Technologies Deutschland.

- **Método de los dos puntos.** En este método, se calcula la pérdida de inserción a partir de la diferencia de los niveles de potencia anterior y posterior al acontecimiento.

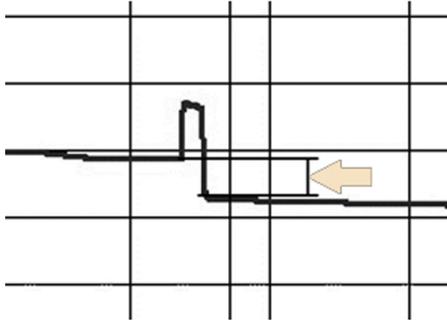


Figura 7. Medida de las pérdidas de inserción mediante el método de los dos puntos

Hay que tener en cuenta que el resultado de la medida, además de la pérdida real del acontecimiento, incluye los efectos de las pérdidas de la fibra entre los dos puntos (la distancia entre estos no es cero).

- **Método por mínimos cuadrados.** Este método es más preciso que el método de los dos puntos. En primer lugar, se calcula la pendiente de la señal de retrodifusión en los tramos de fibra anterior y posterior al acontecimiento utilizando el método de aproximación por mínimos cuadrados (LSA), el cual determina la línea de atenuación que más se aproxima a un conjunto de puntos adquiridos.

A continuación, se alargan las dos rectas hasta el punto donde se localiza el comienzo del acontecimiento. La pérdida de inserción se calculará como la diferencia entre los dos niveles de *backscattering* en este punto.

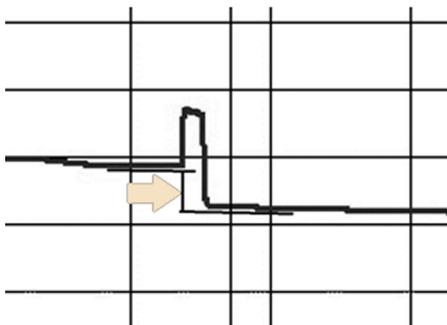


Figura 8. Medida de las pérdidas de inserción mediante el método por mínimos cuadrados

1.2.4. Anomalías en la medida

Además de los acontecimientos que habitualmente se presentan en las medidas y que, por lo tanto, son previsibles, también pueden suceder acontecimientos imprevisibles. Este tipo de acontecimientos pueden ser ecos, acontecimientos fantasma, de ganancia u ocultos. También se conocen como acontecimientos que constituyen una anomalía en la medida, y es importante identificarlos y eliminarlos.

1) Ecos

Los ecos son acontecimientos que aparecen en la traza, pero que no se corresponden con acontecimientos reales. Los ecos se deben a las múltiples reflexiones de un acontecimiento reflexivo. Si los ecos no se identifican correctamente, se cometen errores importantes en la interpretación de la medida.

Las características que ayudan a la identificación de los ecos son el hecho de que no tienen pérdida asociada y que su localización se puede relacionar con la de los otros elementos reflexivos de la traza.

Los ecos pueden aparecer en medio del trazado de la fibra o después del final, en la zona de ruido.

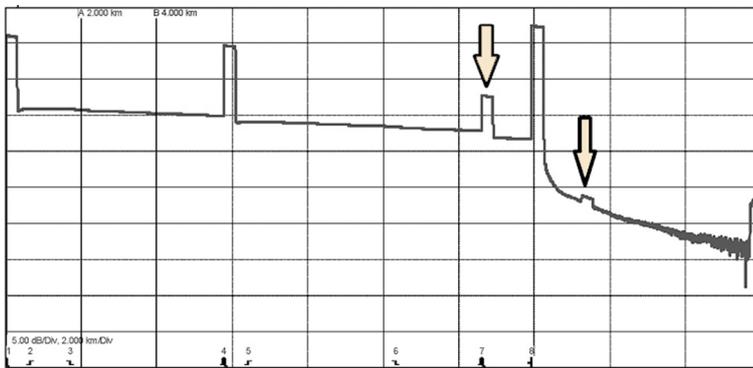


Figura 9. Representación de ecos en la traza del OTDR

2) Acontecimientos fantasma

Los acontecimientos fantasma son muy similares a los ecos, pero su causa es diferente. Estos se deben a una selección incorrecta de los parámetros de medida, concretamente por emplear una frecuencia de repetición del pulso demasiado elevada.

Se puede dar el caso de que la reflexión que indica el final de fibra no haya llegado al receptor cuando se transmite el pulso siguiente. En este momento, se inicia una nueva adquisición de datos y la reflexión del final de fibra del primer pulso se representa como un acontecimiento reflexivo.

La identificación de los acontecimientos fantasma se puede llevar a cabo modificando los parámetros de medida. Si al hacer esto el acontecimiento se desplaza de posición o desaparece, se tratará de un acontecimiento fantasma.

Para evitar los acontecimientos fantasma, tenemos que bajar la tasa de repetición del pulso o aumentar el margen de la distancia del OTDR.

3) Acontecimientos de ganancia

Esta anomalía se representa como una amplificación o un incremento de luz ficticia en la traza del OTDR.

Un acontecimiento de ganancia se da en una unión de dos tramos de fibra, y se puede deber a lo siguiente.

- Un mal emparejamiento de las dos fibras con distintas aperturas numéricas.
- El segundo tramo de fibra presenta un mayor coeficiente de *backscattering*.
- Las dos fibras presentan distintos diámetros del núcleo.
- Las dos fibras presentan diferentes diámetros efectivos.

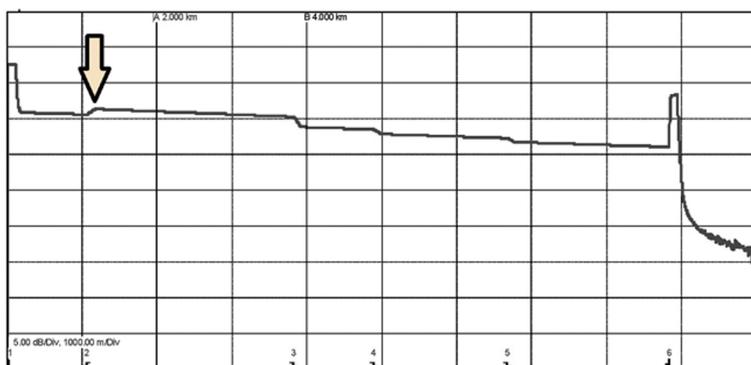


Figura 10. Representación de un acontecimiento de ganancia en la traza del OTDR

Si repetimos la medida reflectométrica desde el extremo contrario (desde el final de fibra), el resultado en la unión será una pérdida en lugar de una ganancia.

4) Acontecimientos ocultos

Esta anomalía está relacionada con la zona muerta del OTDR y la distancia entre los acontecimientos. Cuando llega al receptor del OTDR una fuerte reflexión, este se satura durante un cierto periodo de tiempo e imposibilita una medida precisa. Este periodo de tiempo se conoce como zona muerta.

Si la distancia entre dos acontecimientos es menor que la zona muerta, el segundo acontecimiento no se podrá diferenciar, puesto que quedará oculto dentro del primero.

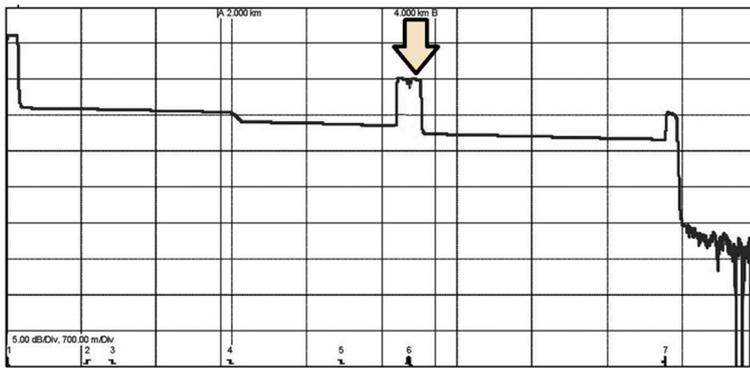


Figura 11. Representación de un acontecimiento oculto en la traza del OTDR

5) Error de *offset*

Los OTDR utilizan convertidores analógicos digitales para convertir la señal analógica del receptor óptico en señal digital, y de este modo procesarla y mostrarla.

Los convertidores tienen un *offset* que provoca que la traza varíe cuando la señal retrodispersada se acerca al nivel del ruido. El efecto provocado se conoce como *roll-off*, y provoca errores en las medidas que se dan cerca del final de la fibra.

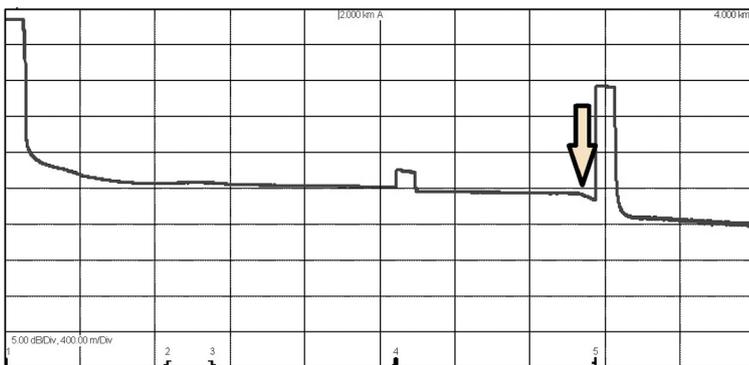


Figura 12. Representación del error de *offset* en la traza del OTDR

1.3. Características técnicas del OTDR y su influencia en la medida

1.3.1. Especificaciones del OTDR

1) Margen dinámico de reflexión

El margen dinámico de reflexión se define como la relación entre la potencia reflejada en una reflexión del conector del panel frontal del OTDR y la potencia de ruido. Este parámetro se expresa en dBs.

Algunos OTDR presentan problemas de saturación cuando les llega un exceso de señal procedente de acontecimientos muy reflexivos. El margen dinámico de reflexión indica cuáles son los límites de medida del OTDR en las reflexiones.

Para llevar a cabo esta medida, hay que desconectar la fibra del OTDR y empezar el proceso de adquisición. Una vez finalizada la medida, es preciso colocar un cursor en la parte superior de la reflexión adquirida y el otro cursor en el nivel de ruido del OTDR. Finalmente, se mide la diferencia de nivel entre los dos cursores.

2) Margen dinámico de *scattering*

El margen dinámico de *scattering* (o simplemente margen dinámico) es la relación entre la potencia de la señal de *back scattering* después del conector del panel frontal y la potencia del nivel de ruido del OTDR. Por lo tanto, el margen dinámico de *scattering* indica la pérdida óptica total que el aparato puede analizar, y que se relaciona con la máxima longitud de fibra que el aparato nos permite medir.

El margen dinámico depende del ancho del pulso, el tiempo de adquisición y el ancho de banda del OTDR. Cuanto más ancho de pulso, más energía del pulso tendremos y mayor será el margen dinámico. Cuanto más tiempo de adquisición, se promediarán más puntos de muestreo, el nivel de ruido disminuirá y aumentará el margen dinámico. Cuanto menos ancho de banda del OTDR, más bajo será el nivel de ruido y, por lo tanto, tendremos más margen dinámico.

Para medir el margen dinámico, hay que conectar una fibra al OTDR. La distancia de análisis del OTDR debería ser mayor que la fibra empleada. Seleccionamos el ancho del pulso y el tiempo de adquisición deseado para medir el margen dinámico. Después de adquirir la forma de onda, colocamos un cursor justo después de la reflexión del conector del panel frontal del OTDR y el otro cursor en el nivel de ruido. Finalmente, encontramos el margen dinámico *scattering* midiendo diferencia de nivel entre los dos cursores.

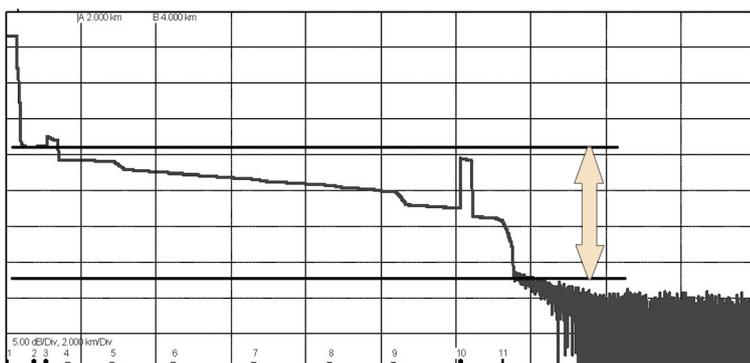


Figura 13. Medida del margen dinámico de *scattering*

3) Zona muerta

La zona muerta es aquella distancia en la que no se pueden conocer las características de la fibra porque el OTDR ha recibido un acontecimiento altamente reflexivo y su circuito de detección se ha saturado.

Depende del ancho del pulso transmitido, de la reflectancia del acontecimiento reflectivo y del mismo OTDR. Cuanto mayor sea el ancho del pulso, más potencia reflejada retornará del acontecimiento y más grande será la zona muerta. Además, acontecimientos con altas reflectancias producen zonas muertas más grandes.

Se define zona muerta del acontecimiento como la distancia entre el borde anterior de la reflexión y el punto en el borde de caída, donde el nivel de la señal cae 3 dB por debajo del máximo de la reflexión.

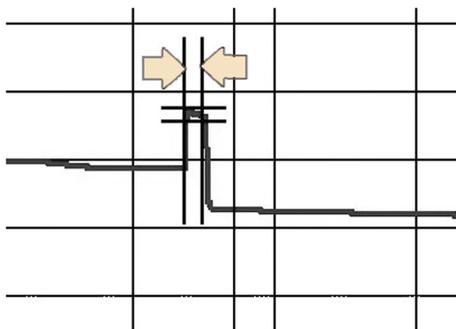


Figura 14. Medida de la zona muerta de un acontecimiento reflexivo

La zona muerta del acontecimiento nos aporta información sobre la posibilidad de sufrir enmascaramientos o acontecimientos ocultos, puesto que esta nos indica la distancia a partir de la cual se pueden diferenciar dos acontecimientos cercanos.

Se define la zona muerta de medida de las pérdidas (LMZD) como la distancia desde la reflexión al punto donde la traza del OTDR llega a 0,1 dB del nivel de *backscattering*.

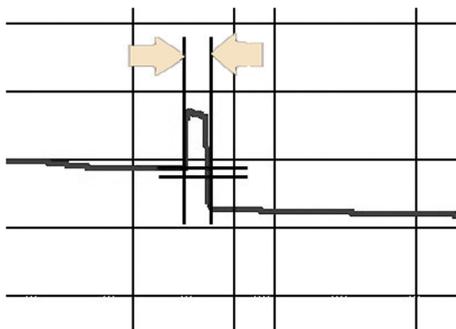


Figura 15. Zona muerta de medida de las pérdidas (LMZD)

4) Resolución de pérdida

La resolución de pérdida indica la mínima diferencia de pérdida que se puede medir entre dos niveles de potencia óptica recibida. Está definida por la resolución del circuito de adquisición.

5) Resolución de muestreo

La resolución de muestreo se define como la mínima distancia entre dos puntos de adquisición. Para aumentar la resolución, solo es preciso que aumentemos el número de puntos adquiridos y así reducimos la distancia entre puntos. La capacidad del OTDR para localizar un acontecimiento va en función de su resolución de muestreo.

6) Precisión en la atenuación (linealidad)

La linealidad del circuito de adquisición determina la similitud entre el nivel óptico y el nivel eléctrico de la muestra. La linealidad o la precisión de la atenuación se expresan en dB/dB.

7) Precisión en la distancia

La precisión en la distancia hace referencia a la capacidad de determinar la distancia exacta de cualquier punto o acontecimiento a lo largo de la fibra. Este parámetro depende de los factores siguientes:

- El índice de refracción.
- La precisión de la base de tiempo.
- El ajuste de *offset*.
- El intervalo de muestreo.
- El factor de hélice.

Es importante que el índice de refracción introducido en el OTDR sea el de la fibra óptica que estamos midiendo, puesto que el aparato calcula la distancia de un determinado punto a partir del tiempo que tarda en recibir la señal reflejada. La relación entre el tiempo que ha tardado y la distancia es la velocidad dentro de la fibra óptica, y esta se calcula a partir de la velocidad de la luz en el vacío y del índice de refracción. Para distancias largas, un pequeño error del índice de refracción puede llegar a provocar errores significativos en la distancia calculada. Algunos OTDR permiten definir distintos índices de refracción en función de la distancia. Esto es útil si unimos tramos de fibra con índices diferentes.

La precisión de la base de tiempo es importante para determinar el tiempo que se tarda en recibir un pulso reflejado.

El ajuste de *offset* se hace especificando que la reflexión producida en el conector del panel frontal del OTDR corresponde a la distancia de cero metros.

El intervalo de muestreo hace referencia al espacio mínimo entre muestras. En el caso de que el inicio de un acontecimiento se encuentre entre dos muestras, no se podrá determinar su distancia de manera exacta. Si reducimos el intervalo de muestreo, disminuimos el error.

El factor de hélice es la relación entre la longitud de la fibra medida por el OTDR y la longitud del cable. El factor de hélice depende del tipo de cable, del diseño del cable y del fabricante.

1.3.2. Tipos de OTDR

En general, hay dos tipos de OTDR.

- El OTDR de corto alcance (*shorthaul*). El receptor de este OTDR tiene un ancho de banda elevado, lo que se traduce en tiempos de transición muy rápidos y zonas muertas muy pequeñas. Este tipo de OTDR tiene un mayor nivel de ruido, puesto que el ruido en el receptor es proporcional a su ancho de banda. Al tener más ruido, también tenemos menos margen dinámico. Los OTDR de corto alcance utilizan, en general, pulsos más estrechos para obtener zonas muertas más pequeñas.
- El OTDR de largo alcance (*longhaul*). En este caso, el ancho de banda del receptor está limitado, para reducir el nivel de ruido y así aumentar el margen dinámico. Por el contrario, esto eleva los tiempos de transición del receptor y aumenta las distancias de las zonas muertas. Estos OTDR utilizan anchos de pulsos grandes para incrementar el nivel de *backscattering*, lo que aumenta el margen dinámico pero provoca que las zonas muertas sean más grandes.

1.3.3. Mejora de las medidas reflectométricas

1) Compromiso de los parámetros de adquisición con el margen dinámico

En el proceso de configuración de la medida con el OTDR, nos encontramos con varios compromisos que pueden determinar la elección del valor de algunos de los parámetros de adquisición.

En el caso de querer aumentar el margen dinámico del OTDR, podemos aumentar el nivel de la señal de *backscattering* y/o disminuir el nivel de ruido.

- **Compromiso entre el margen dinámico y el ancho del pulso.** Si aumentamos el ancho (duración) del pulso, incrementaremos la energía del mismo y, por lo tanto, obtendremos un mayor nivel de *backscattering*. Por el contrario, un pulso ancho hace que la zona muerta sea elevada. De este modo, nos encontramos con un compromiso entre zona muerta y margen dinámico: los pulsos cortos reducen la zona muerta, pero pro-

vocan un margen dinámico pequeño. Los pulsos largos aumentan la zona muerta, pero proporcionan un mayor margen dinámico.

- **Compromiso entre el margen dinámico y la potencia del láser.** Para aumentar el nivel de la señal de *backscattering* y así mejorar el margen dinámico, podemos incrementar la potencia del pulso. Al tener una mayor potencia, aumentamos la energía del pulso de luz, sin tener que hacer el pulso más ancho.
Aumentar la potencia del láser del OTDR no limita su funcionamiento, pero el aumento está limitado a las especificaciones de seguridad del láser y a los efectos no lineales de la fibra óptica.
- **Compromiso entre el margen dinámico y el ancho de banda del receptor.** Para disminuir el nivel de ruido y de este modo aumentar el margen dinámico del OTDR, una posibilidad es emplear un OTDR con un ancho de banda del receptor pequeño. El principal problema es que, en este caso, el OTDR es más lento al responder a los cambios de la señal.
- **Compromiso entre el margen dinámico y el número de medias.** Para disminuir el nivel de ruido y así aumentar el margen dinámico del OTDR, otra posibilidad es aumentar el número de medias. Al aumentar este parámetro promediamos el ruido y, por lo tanto, se reduce. Por el contrario, aumentar el número de medias implica aumentar el tiempo de análisis.

2) Mejora en los procedimientos y la configuración de medida

- **Uso de bobinas de lanzamiento.** En una traza de OTDR donde se ha conectado la fibra del enlace al conector del panel frontal, no podemos extraer las características del primer conector, puesto que no tenemos referencia previa al conector.
Una bobina de lanzamiento consiste en un tramo de fibra óptica de longitud conocida, que se conecta entre el OTDR y la fibra que hay que analizar. La utilización de la bobina nos proporciona el nivel de *backscattering* de referencia necesario para medir las pérdidas del primer conector.
La misma problemática ocurre con el final de fibra. Hay unas bobinas denominadas bobinas de recepción con la misma funcionalidad que las bobinas de lanzamiento, pero que se utilizan para analizar el último conector.
- **Medida en los dos extremos.** Una técnica que asegura una correcta adquisición de los acontecimientos y una fácil identificación de las anomalías es la medida en los dos extremos. Consiste en llevar a cabo una adquisición desde cada uno de los extremos y, posteriormente, hacer un análisis conjunto de las dos trazas.
- **OTDR con enmascaramiento óptico.** Para minimizar los acontecimientos ocultos, se puede aumentar el ancho de banda. Con un ancho de ban-

da grande obtenemos una respuesta más rápida del OTDR, pero se incrementa la cantidad de ruido y, por lo tanto, se reduce el margen dinámico. Los fabricantes de OTDR incorporan una característica denominada enmascaramiento óptico. El enmascaramiento óptico minimiza los efectos negativos de las reflexiones, y reduce la zona muerta entre dos reflexiones muy cercanas. El elemento principal del enmascaramiento óptico es la sustitución del acoplador por un conmutador óptico. Al detectarse una reflexión con un nivel de potencia elevado, el conmutador desconecta la fibra del receptor y así previene su saturación.

2. Monitorización de prestaciones de señales ópticas

En las redes ópticas de transporte y alta capacidad, es muy común que una misma señal óptica viaje por varios nodos ópticos y atraviese distancias relativamente largas (entre 100 y 1.000 km) antes de llegar a su destino. Por este motivo, las compañías operadoras de estas redes suelen dotarlas con una capa de inteligencia que implementa algoritmos capaces de gestionar de manera automática los múltiples caminos que puede atravesar una misma señal y, al mismo tiempo, detectar posibles fallos de varios subsistemas y hacerles frente: amplificadores ópticos, filtros, módulos de agregación y separación de señales, acumulación de dispersión cuando la señal viaja por diferentes caminos, etc. Por este motivo, se hace necesario monitorizar la red de manera más o menos continuada y detectar distorsiones, degradaciones, ruidos y otras anomalías.

En este apartado, hablaremos de las técnicas básicas de monitorización de los parámetros más comunes que definen la calidad de la señal: la relación señal-ruido óptica, la acumulación de dispersión cromática y la acumulación de dispersión en el modo de polarización.

2.1. Relación señal-ruido óptica

La relación señal-ruido óptica (OSNR) es uno de los parámetros más útiles para estimar la calidad de una señal directamente en el dominio óptico. Esto sucede porque la podemos relacionar muy fácilmente con la probabilidad de error de bit de la señal transmitida a través de un enlace amplificado de manera óptica. Además, puesto que la OSNR es transparente a la velocidad de bit y al formato de modulación de la señal óptica, resulta un parámetro ideal para monitorizar las prestaciones de los enlaces en redes reconfigurables de manera dinámica.

De hecho, podemos utilizar la OSNR en este tipo de redes para configurar y optimizar los enlaces, determinar las causas de los posibles problemas del sistema, configurar alarmas por degradación de la señal, activación de mecanismos de resiliencia, etc. Por lo tanto, para gestionar y mantener este tipo de redes de manera eficiente, resulta deseable tener la capacidad de monitorizar la OSNR de cada uno de los canales ópticos (multiplexados por división en longitud de onda).

Nota

La monitorización de prestaciones también se conoce en inglés como *optical performance monitoring*.

Nota

Nos referiremos a la relación señal-ruido óptica también como *OSNR*, que proviene del inglés *optical signal to noise ratio*.

Nota

El ruido de emisión espontánea amplificada es el ruido típico asociado a los amplificadores ópticos. El término *ASE* proviene de la forma inglesa *amplified spontaneous emission*.

Tradicionalmente, la OSNR se mide haciendo una interpolación lineal, en la que medimos la potencia del ruido de la emisión espontánea amplificada (ASE) en las longitudes de onda entre canales WDM y después se interpola a longitud de onda de la señal. Esta técnica podría estimar de manera cuidadosa la OSNR en un enlace convencional punto a punto (donde el espectro de ruido es más o menos uniforme). Sin embargo, en redes modernas reconfigurables de manera dinámica, las señales WDM se agregan y se desagregan directamente en la capa óptica.

Por lo tanto, cada señal puede atravesar distintos caminos, pasando por un diferente número de amplificadores ópticos. Además, el espectro de ruido en estas redes puede no ser uniforme debido al filtrado óptico inherente a varios elementos de la red. Como resultado, los niveles de ruido acumulados en estas redes pueden ser diferentes de un canal al otro.

De este modo, el ruido ASE que permanece dentro del ancho de banda de la señal (y como consecuencia, el verdadero valor de la OSNR) no se puede medir usando la interpolación lineal. Durante la pasada década, muchos investigadores han intentado desarrollar técnicas capaces de monitorizar el verdadero valor de la OSNR (es decir, *in-band OSNR*), en un entorno de redes reconfigurables. Para este propósito, es necesario diferenciar y detectar los pequeños componentes del ruido que enmascara la señal (mucho mayor). Por ejemplo, podemos conseguir esta diferenciación utilizando las diferentes características ópticas de la señal y el ruido: el ruido ASE es incoherente y no polarizado, mientras que la señal óptica es coherente y polarizada. Aquí revisaremos distintas técnicas de monitorización, también las basadas en estos principios.

2.1.1. Análisis de espectro

En esta técnica, se asume que el espectro del ruido ASE es casi uniforme. Por lo tanto, mientras no utilicemos ningún componente que se comporte como un filtro de banda estrecha, podemos estimar los niveles de señal óptica y ruido de fondo a partir del espectro óptico medido.

La figura 16 muestra un espectro de señal óptica afectada por el ruido ASE. Observad que el nivel de ruido de fondo se puede identificar fácilmente. Por lo tanto, podemos estimar el nivel de ruido en la longitud de onda de operación de una señal interpolando a partir de los niveles de ruido medidos en las longitudes de onda alrededor del canal de interés. La OSNR se puede determinar directamente por la diferencia (en dB) entre los niveles de señal óptica y de ruido ASE. Con un algoritmo simple de análisis de patrones, es posible determinar de manera automática los picos (es decir, la señal útil) y los valles (es decir, niveles de ruido) necesarios para estimar la OSNR.

Nota

WDM es el término utilizado para referirnos a la multiplexación por división de longitud de onda, que es la multiplexación más común dentro de las redes ópticas. Concretamente, WDM viene de la forma inglesa *wavelength division multiplexing*.

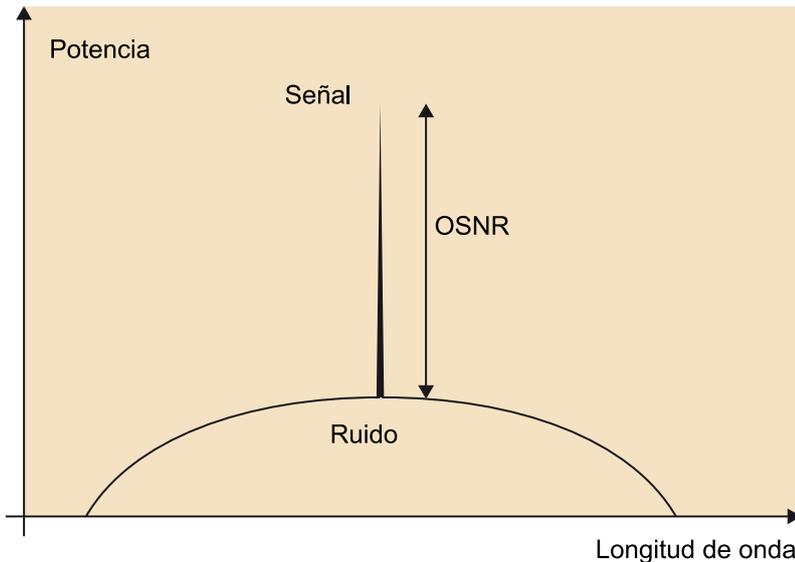


Figura 16. Espectro óptico de una señal afectada por ruido

2.1.2. Técnicas de polarización

Las técnicas de nulo de polarización y de análisis del grado de polarización se basan en asumir que las señales útiles son altamente polarizadas, mientras que el ruido es completamente no polarizado. Dicho de otra manera, los ruidos ASE tienen una distribución de potencia igual para todas las direcciones posibles de polarización, mientras que la señal óptica (útil) suele estar en un solo estado de polarización. Por lo tanto, en las técnicas de estimación de OSNR basadas en polarización hacemos uso de estas propiedades para monitorizar la OSNR en la misma banda de la señal (evitando hacer interpolación lineal). En esta sección, introduciremos el principio de operación de las principales técnicas de monitorización de OSNR basadas en polarización.

La figura 17 muestra el principio de operación de la técnica de monitorización de nulo de polarización. Una señal óptica polarizada de manera arbitraria se puede polarizar en un estado concreto mediante un control de polarización. No obstante, este control de polarización no cambia el estado de polarización del ruido ASE, dado que viene completamente despolarizado. De este modo, podemos alinear el estado de polarización de la señal útil de tal manera que solo salga por una de las salidas del divisor de polarización. La potencia de la señal óptica, junto con la parte correspondiente del ruido, se encuentra en esta salida, mientras que la otra rama solo nos da ruido. Observad que los ruidos ASE polarizados tienen la mitad de la potencia total de ruido.

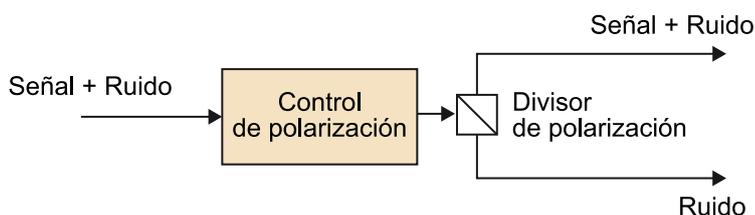


Figura 17. Esquema para la medida de OSNR con la técnica de nulo de polarización

Por lo tanto, las potencias ópticas medidas después del divisor de polarización se pueden expresar como:

$$P_p = P_s + \frac{1}{2}P_n \quad (1)$$

$$P_o = \frac{1}{2}P_n \quad (2)$$

Por lo tanto, resulta muy directo obtener la medida de la OSNR:

$$OSNR = \frac{P_s B_n}{P_n B_r} = \frac{P_p - P_o}{2P_o} \frac{B_n}{B_r} \quad (3)$$

Lectura de la fórmula (3)

B_n : ancho de banda de medida (típicamente determinada por el filtro de paso banda de selección del canal que hay que medir).

B_r : ancho de banda de resolución que define la OSNR (típicamente, 0,1 nm).

Por lo tanto, podremos estimar de manera fiable la OSNR simplemente midiendo P_p y P_o .

Otra técnica sería la medida de los parámetros de Stokes de la señal óptica. El grado de polarización (DOP), que se calcula a partir de los parámetros de Stokes, puede servir como indicador de la potencia de los ruidos ASE y viene dado por:

$$DOP = \frac{P_s}{P_s + P_n} \quad (4)$$

Por lo tanto, la OSNR se puede estimar de manera directa a partir del DOP como:

$$OSNR = \frac{DOP}{1 - DOP} \frac{B_n}{B_r} \quad (5)$$

El principio de fondo de esta técnica es básicamente idéntico al de la técnica de nulo de polarización que hemos descrito anteriormente. Sin embargo, los parámetros de Stokes también permiten extraer toda la información del estado de polarización de la señal, por lo que igualmente los podemos usar para ver los efectos de la PMD. La figura 18 muestra la correlación entre el DOP y la OSNR utilizando la ecuación anterior con $B_n/B_r = 4$ (por ejemplo, si el ancho de banda de medida es de un canal WDM de 50 GHz, mientras que la OSNR se define sobre 12,5 GHz).

Lectura de las fórmulas (1) y (2)

P_p : potencia medida en la rama que contiene señal y ruido.

P_o : potencia medida en la rama que contiene solo ruido.

P_s : potencia de la señal.

P_n : potencia total del ruido.

Nota

DOP es la abreviatura más común para referirnos al grado de polarización, y viene del inglés *degree of polarization*.

Lectura de la fórmula (4)

P_s y P_n : potencias de la señal útil y del ruido ASE, de manera respectiva.

Lectura de la fórmula (5)

B_n : ancho de banda de medida.

B_r : ancho de banda de resolución definido para la OSNR.

Nota

PMD es la abreviatura del inglés *polarization mode dispersion* o 'dispersión en el modo de polarización'.

Hay que notar que el error de medida de la OSNR es muy sensible al error del DOP cuando se incrementa la OSNR que hay que medir. Por ejemplo, un DOP del 96,15% equivale a medir una OSNR de 20 dB y para un DOP de 1, teóricamente se llega al infinito. Esto quiere decir que hace falta una medida de DOP de alta resolución y bajo error para monitorizar la OSNR, especialmente cuando esta se encuentra por encima de los 20 dB. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que, como se ha dicho antes, la medida espectral de parámetros de Stokes resulta igualmente beneficiosa para la monitorización simultánea de OSNR y PMD.

Referencia bibliográfica

Podéis encontrar el procedimiento detallado para obtener los parámetros de Stokes en la referencia:

D. Derickson (1997). *Fiber Optic Test and Measurement*. Prentice Hall.

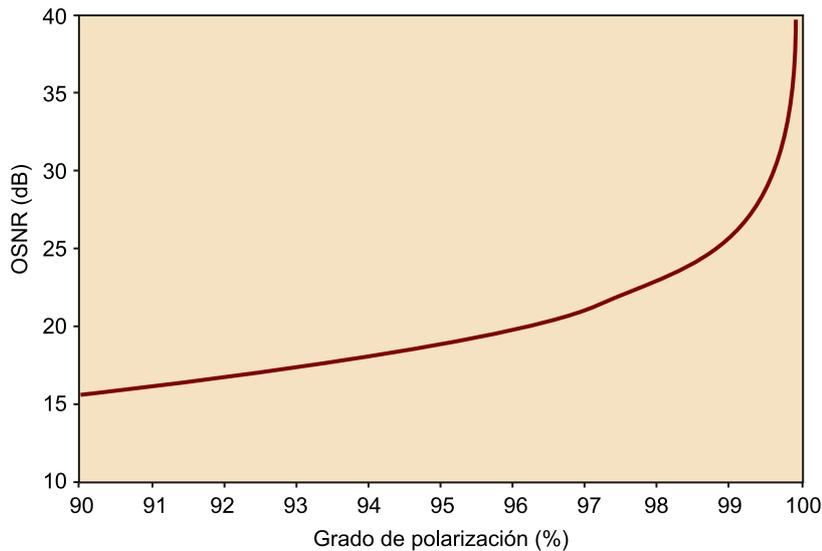


Figura 18. Variación de la OSNR en función del grado de polarización para $B_n/B_r = 1/4$

En la práctica, sin embargo, las hipótesis en las que se basan estas técnicas no se tienen que cumplir de manera necesaria, sobre todo debido a los efectos sobre el estado de polarización que se tienen en los enlaces de transmisión. Por ejemplo, la señal útil puede ser despolarizada por la PMD y otros fenómenos de birrefringencia, mientras que los ruidos quizá queden parcialmente polarizados debido a pérdidas del medio de transmisión que pueden depender de la polarización. Además, en el caso de usarse en enlaces aéreos (fibra colgada entre postes y no soterrada), estas técnicas deberían ser capaces de adquirir y seguir las rápidas fluctuaciones de polarización causadas por el viento y las corrientes eléctricas de las líneas de alta tensión (que se suponen adyacentes a la fibra). De hecho, hay varias técnicas para evitar estos problemas. Por ejemplo, podemos usar la técnica de análisis del grado de polarización para estimar y separar las contribuciones de PMD y ruido ASE, con el objetivo de hacer una buena estimación de la señal útil y mejorar la resolución de la OSNR.

2.1.3. Técnicas interferométricas

Las técnicas basadas en interferometría explotan el hecho de que el ruido ASE es incoherente, mientras que la señal útil es coherente. Por lo tanto, esta técnica mide la potencia de ruido después de eliminar el componente de la señal útil, lo que provoca una interferencia destructiva. Sin embargo, esta técnica

no puede monitorizar de manera cuidadosa la OSNR dentro de la banda de interés, porque el ruido ASE también se puede ver seriamente afectado por la interferencia destructiva (especialmente cuando necesitamos monitorizar la OSNR de señales WDM de muy alta eficiencia espectral). Una posibilidad para evitar este efecto es forzar una interferencia entre dos componentes de estados de polarización ortogonales entre sí, y combinarlos después en el mismo estado de polarización. En este caso, el ruido ASE se puede separar de la señal óptica sin ningún cambio, a pesar de la interferencia destructiva de la señal.

Estas técnicas se basan en la asunción de que la señal óptica es altamente coherente (correlada), mientras que los ruidos ASE son incoherentes. De manera conceptual, constan de un filtro sintonizable para seleccionar el canal que hay que monitorizar, un interferómetro de Mach-Zehnder y un medidor de potencia. Esto lo podéis ver en la figura 19. El interferómetro de Mach-Zehnder es un dispositivo que consiste en dos acopladores de 3 dB que dividen la señal de entrada en dos caminos distintos, y uno de estos dos caminos contiene un módulo de retraso y ajuste de fase. El ajuste de fase varía la fase de la señal en una de las dos ramas, de tal modo que cuando se combinan en la salida, se puede producir una interferencia destructiva o constructiva a voluntad.

Por su parte, el retraso lo utilizamos para controlar el FSR del interferómetro, es decir, el espaciado frecuencial entre dos picos de transmisión adyacentes. La potencia total (señal + ruido) la podemos medir con la interferencia constructiva, tal y como se puede ver en la figura 20. Por otro lado, el ruido lo podemos medir eliminando la señal óptica con la interferencia destructiva, tal y como se muestra en la figura 21. De este modo, la OSNR de la señal la podemos estimar a partir del ruido y de la potencia óptica total. Observad que, por el principio básico de buscar la periodicidad de la señal, esta técnica es insensible a la dispersión cromática o a los efectos de polarización.

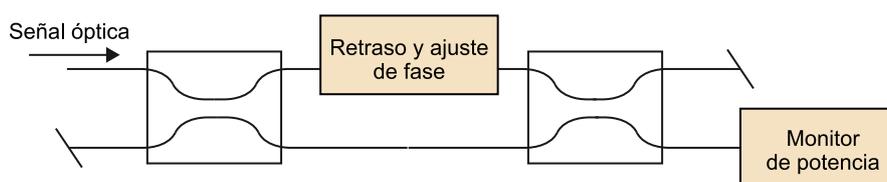


Figura 19. Esquema de medida de OSNR basado en un interferómetro de Mach-Zehnder

Nota

FSR proviene del inglés *free spectral range* y hace referencia al margen espectral libre del interferómetro. En otras palabras, se refiere a su periodicidad.

Nota

El interferómetro de Mach-Zehnder se denomina así en honor a los físicos Ludwig Mach (hijo del célebre Ernst Mach) y Ludwig Zehnder, sus inventores. La versatilidad de esta estructura ha permitido que sea empleada en un amplio espectro de aplicaciones, desde investigación en temas de mecánica cuántica hasta óptica y telecomunicaciones.

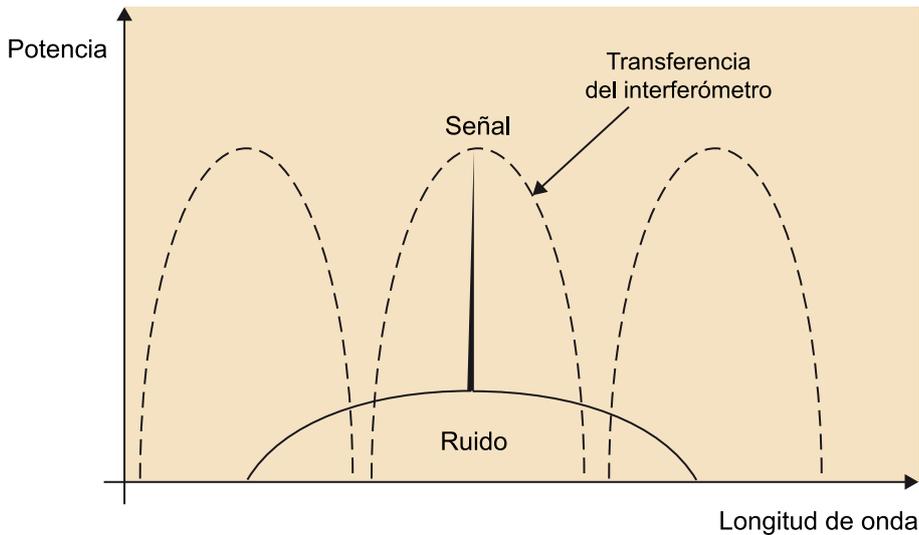


Figura 20. Filtrado óptico cuando se obtiene interferencia constructiva para el esquema de medida basado en interferometría

Nota

PRBS viene del inglés *pseudo-random bit sequence* y se refiere a las secuencias que se usan para emular tráfico, así como a la aleatoriedad de dichas secuencias. En otras palabras, cuanto más alta es la PRBS que emula los datos, más aleatorios son los bits entre sí, y ocupan más parte del espectro frecuencial.

Para más información, podéis consultar el libro:

J. G. Proakis (1995). *Digital Communications*. John Wiley & Sons.

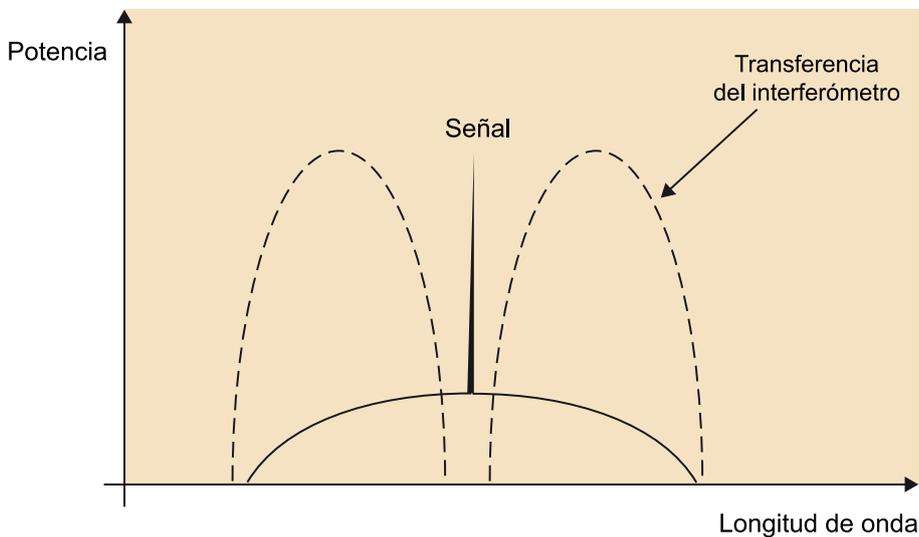


Figura 21. Filtrado óptico cuando se obtiene interferencia destructiva para el esquema de medida basado en interferometría

2.1.4. Otras técnicas

Aparte de las técnicas basadas en interpolación de espectro y explotación de propiedades del estado de polarización de las señales, hay otras técnicas menos populares para estimar la OSNR. Entre estas, contamos con las técnicas basadas en el análisis de ruido mezclado. Estiman la OSNR dentro de la banda de interés mediante el análisis de los ruidos resultantes de las múltiples combinaciones entre señal y ruido que se encuentran después de un fotodetector, debidas al hecho de que este presenta una transferencia óptico-eléctrica de manera cuadrática y no lineal. Por lo tanto, la densidad de ruido en la región de bajas frecuencias la podemos monitorizar usando un fotodetector de baja velocidad mientras la señal óptica no está modulada (o está modulada con una PRBS baja, $2^{15} - 1$ máx.). Sin embargo, en casos en los que la señal óptica es modulada con un patrón largo (o de alta aleatoriedad), esta técnica no puede medir la densidad de ruido en la región de bajas frecuencias, a causa de la interferencia que se debe a los productos entre señal y ruido.

Las técnicas denominadas de estimación de OSNR deducen la OSNR midiendo solo las potencias de la señal (asumiendo que las características de los amplificadores ópticos son conocidas). Concretamente, la técnica de monitorización de OSNR basada en enlace estima la OSNR basándose en estimar enlace a enlace, en lugar de hacerlo canal a canal, como es convencional. Por lo tanto, el ruido ASE que se acumula en cada enlace se mide por separado. Después un controlador centralizado de monitorización de prestaciones ópticas, toma la información del ruido de cada enlace y actualiza la OSNR por una ruta óptica concreta (previamente establecida). Aunque esta técnica es tan solo un cálculo de la OSNR y no una medida, ofrece la posibilidad de monitorizar de manera cuidadosa la OSNR dentro de la banda de interés de señales WDM, incluso en redes ópticas dinámicas.

2.2. Dispersión cromática

La dispersión cromática es un fenómeno de la fibra óptica no deseado en las aplicaciones de telecomunicaciones. Precisamente, actúa como un filtro que disminuye su ancho de banda de paso a medida que se incrementa la distancia de fibra y, de este modo, limita la velocidad de transmisión. Posiblemente por esto, se trata del efecto más impactante en telecomunicaciones, por lo que el control y la mitigación de sus efectos son clave para el buen funcionamiento de las redes de comunicaciones ópticas. En esta sección, veremos las técnicas más populares para monitorizar la dispersión cromática acumulada de una señal óptica.

2.2.1. Medida con tono radiofrecuencia

Un método que se ha demostrado efectivo para monitorizar la dispersión cromática en tiempo real y que podemos aplicar de manera general como monitorización de prestaciones ópticas consiste en detectar la conversión de una señal modulada en fase en una señal modulada en amplitud debido a la dispersión cromática.

Nota

Para referirnos a la radiofrecuencia, utilizamos la abreviatura de uso común RF. Normalmente, la utilizamos para hacer referencia a señales de frecuencias por encima de los 100 MHz.

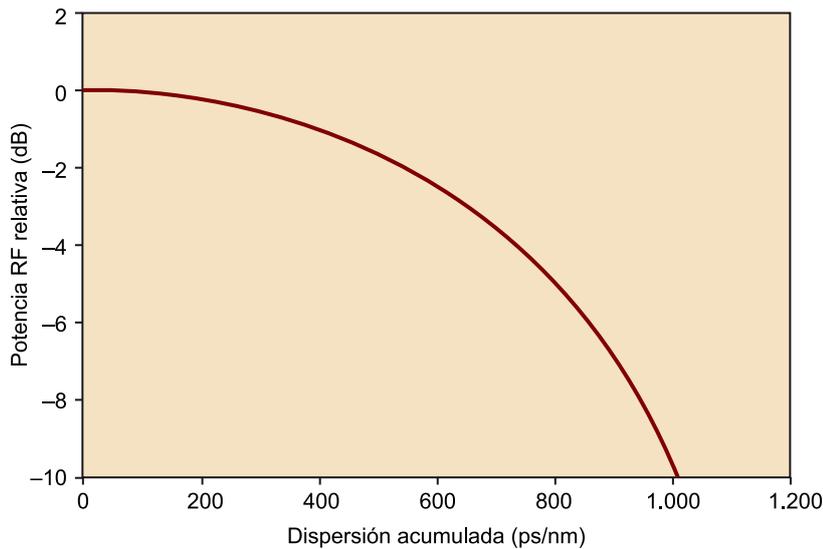


Figura 22. Potencia del tono de RF a 7 GHz en función de la dispersión acumulada

Un segundo método consiste en insertar subportadoras eléctricas en el transmisor. Se consigue medir la dispersión observando el retraso de las subportadoras respecto a la banda base. Esta medida da una idea de la dispersión con una resolución media-alta y sin tener conocimiento del historial de transporte de la señal. El tono no contiene ningún tipo de datos y posee un ancho espectral pequeño, de menos de pocos MHz. Puesto que el tono está dentro de la banda de frecuencias de los datos, sufre también la misma dispersión que los datos y lo podemos usar como sensor de dispersión. Las bandas laterales de la subportadora estarán inicialmente en fase en la salida óptica del transmisor. Sin embargo, debido a la dispersión cromática, se acumula una diferencia de fases entre las dos bandas a lo largo de la transmisión. El grado de desfase lo podemos relacionar con la cantidad de dispersión acumulada cuando la subportadora se detecta de manera óptico-electrónica y la potencia de la subportadora detectada cae de acuerdo con el cambio de fase, de una manera que se puede predecir como sigue:

$$I(f_{sc}) = I_0 m \cos\left(\frac{\pi f_{sc}^2 \lambda^2 DL}{c}\right) \quad (6)$$

La figura 22 muestra las curvas teóricas para frecuencia de subportadora de 7 GHz, en la que la caída se produce de acuerdo con un \sin^2 cuando se incrementa la dispersión.

Una característica importante de esta técnica es que la sensibilidad se incrementa para valores grandes de dispersión, dado que encontramos valores altos cuando la curva de la figura 22 decrece más rápidamente y, por lo tanto, los podemos medir de una manera más cuidadosa. Por ejemplo, según la figura 22 es más preciso medir dispersiones en torno a 800 ps/nm (donde hay más margen de potencias para discriminar el valor de la dispersión) que en torno

Lectura de la fórmula (6)

I_0 : pico de corriente de foto-detección.

m : profundidad de modulación.

f_{sc} : frecuencia de la subportadora.

λ : longitud de onda de la portadora.

DL : dispersión total acumulada.

c : velocidad de la luz en el vacío.

a los 200 ps/nm. Es posible reconfigurar el margen de medida y la sensibilidad del monitor simplemente sintonizando la frecuencia del tono de RF. De hecho, el margen de medida lo podemos expresar de esta manera:

$$DL = \frac{c}{2\lambda^2 f_{sc}^2} \quad (7)$$

Por lo tanto, si empleamos una frecuencia de subportadora más alta, se obtiene una sensibilidad más alta para dispersiones acumuladas más bajas. Ello se muestra en la figura 23. Por otro lado, usando una frecuencia más baja tendremos un mayor margen de medida, pero la sensibilidad puede no ser la adecuada. Una solución consiste en usar dos tonos para mejorar el margen de medida y la sensibilidad al mismo tiempo, sin incrementar la complejidad del sistema.

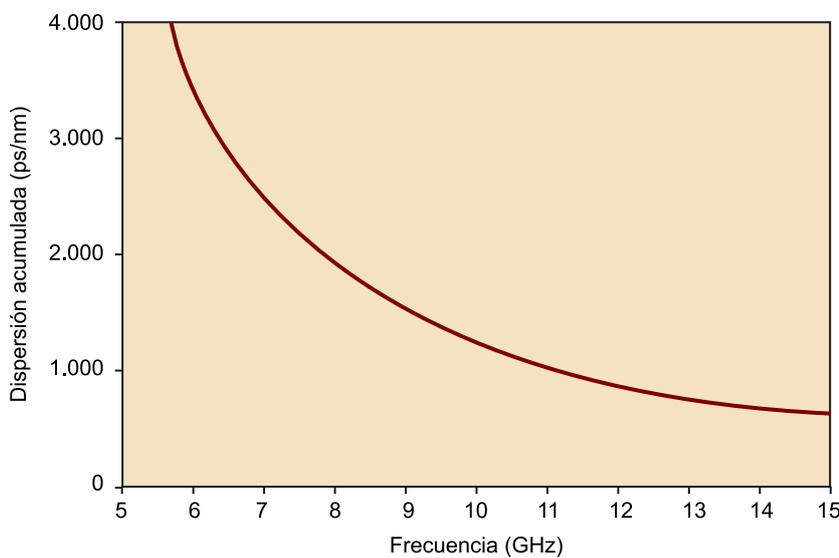


Figura 23. Margen de medida en función de la frecuencia de la subportadora eléctrica

Otro obstáculo de las técnicas de monitorización basadas en tonos AM es la dificultad de discriminar el signo (positivo o negativo) de la dispersión acumulada. Por este motivo, podemos añadir un tono modulado en frecuencia para detectar el retraso de fase diferencial, y determinar de esta manera el signo de la dispersión.

De aquí sale un tercer método, que se basa en la modulación óptica en frecuencia al transmisor. Puesto que el retraso de grupo de la señal transmitida varía con la frecuencia de portadora, la fase de la señal de reloj recuperada en el receptor también está modulada con la misma frecuencia. Por lo tanto, podemos obtener la dispersión cromática de la señal transmitida a partir de la desviación de fase de la señal de reloj.

Nota

AM es la abreviatura para referirnos a señales de amplitud modulada. Observad que la técnica de monitorización en la que se introducen tonos de radiofrecuencia en la señal óptica se basa, al fin y al cabo, en la interpretación de los tonos AM detectados.

2.2.2. Medida del retraso en dos bandas vestigiales

Una técnica potente para monitorizar la dispersión cromática consiste en detectar el retraso de grupo relativo entre las dos bandas laterales vestigiales (VSB) de los datos transmitidos: las dos bandas se obtienen sintonizando un filtro óptico estrecho y ligeramente desplazado a la derecha y a la izquierda de la portadora óptica, tal y como se muestra en la figura siguiente.

Nota
VSB es el acrónimo utilizado para referirnos a señales de banda lateral vestigial. Proviene del inglés *vestigial sideband*.

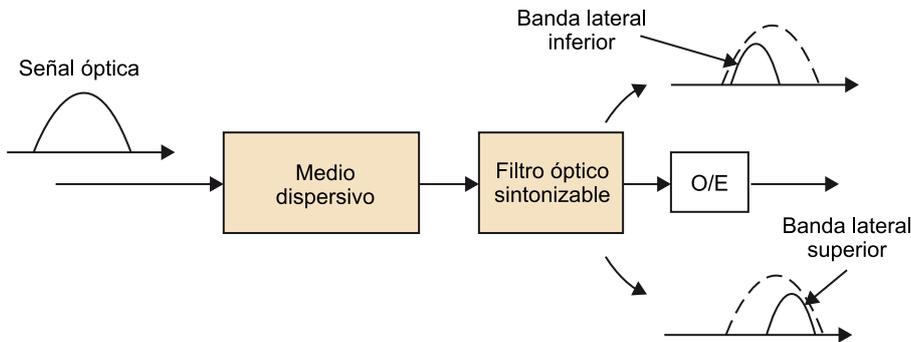


Figura 24. Medida de la dispersión cromática mediante la medida del retraso en dos bandas vestigiales

De manera típica, en sistemas de transmisión ópticos de alta velocidad la señal óptica tiene dos bandas laterales que contienen la misma información. Podemos seleccionar cada banda lateral mediante un filtro óptico que tenga un ancho de banda aproximadamente igual a la velocidad de los datos. En general, el filtrado de banda vestigial se implementa sintonizando el filtro ligeramente desplazado del centro del espectro de la señal óptica. Puesto que las dos bandas laterales ocupan distintos márgenes de longitud de onda, la dispersión cromática de la fibra introduce un retraso de grupo relativo entre las bandas superior e inferior. Este retraso de grupo lo podemos medir mediante una recuperación de reloj y una detección de fase. Observad que esta técnica no requiere ningún tipo de modificación del transmisor, es altamente sensible, no está afectada por la PMD ni las no linealidades de la fibra y se puede aplicar a todas las bandas WDM simplemente resintonizando el filtro. Observad que en esta técnica, la monitorización se lleva a cabo a partir de una detección de fase de la señal de reloj recuperada; por lo tanto, el margen de dispersión cromática que podemos monitorizar está limitado por el margen de desfase relativo, de -180° a 180° . También hay un compromiso entre resolución de la medida y velocidad.

2.2.3. Histograma

Si muestreamos una señal recibida, podemos obtener histogramas que nos permiten evaluar la calidad de la señal (por ejemplo, con la tasa de error de bit). Este método es sensible a la distorsión de la señal y al ruido, por lo que lo podemos utilizar para monitorizar distorsiones inducidas por la dispersión cromática.

En general, podemos encontrarnos con dos tipos de muestreo: síncrono y asíncrono. El diagrama de ojo es una distribución de amplitud síncrona en un periodo de bit. Se trata de una herramienta de uso común para analizar la calidad de las señales, y la podemos utilizar también para monitorizar sus prestaciones. Sin embargo, el inconveniente es que se requiere una recuperación de reloj para muestrear de manera síncrona. De este modo, cuando la información de reloj no se puede recuperar, la señal solo se puede muestrear de manera asíncrona. En este caso, el histograma de la amplitud se obtiene haciendo un muestreo aleatorio que cubre todo el tiempo de bit. Con un número bastante grande de muestras aleatorias, un histograma asíncrono puede representar la distribución de la amplitud en un periodo de bit.

En la figura 25, podéis ver una comparativa entre diagramas de ojo síncronos y asíncronos. Si nos basamos en el histograma, podemos estimar el factor Q y la tasa de error de bit (BER). La figura 25b describe el histograma tanto del diagrama de ojo muestreado de manera asíncrona, como del diagrama de ojo muestreado de manera síncrona en su máxima apertura (parte central de la figura 25a).

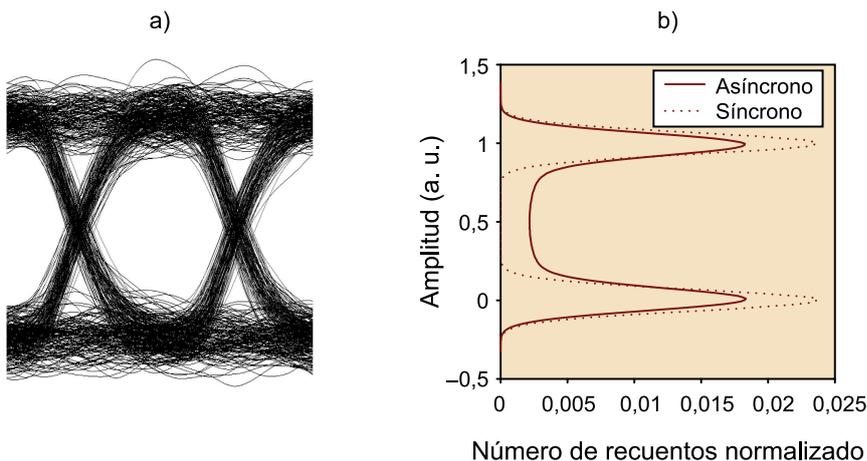


Figura 25. Medida de la dispersión cromática mediante la medida del histograma

La principal diferencia entre los histogramas síncronos y asíncronos se encuentra en los cruces de nivel entre los niveles de 0 y 1. Precisamente, en esta región de transición vemos cómo el histograma asíncrono contiene un cierto número de recuentos, mientras que el síncrono no lo tiene. Los recuentos adicionales están relacionados con los flancos de subida y bajada de los pulsos ópticos, que se pueden ver afectados por la dispersión cromática. De hecho, el histograma asíncrono puede evaluar la calidad total de la señal, dado que también es sensible a la OSNR y a otras degradaciones aparte de la dispersión cromática. Podemos monitorizar el factor Q o la OSNR en señales OOK utilizando este método, así como la dispersión cromática y la PMD. Sin embargo, puesto que se trata de una medida en el dominio eléctrico, la clave está en cómo medir el valor absoluto del factor Q, o la OSNR, la dispersión cromática y la PMD de manera simultánea. Es decir, el histograma nos sirve para ver los efectos del conjunto de todas las degradaciones que afectan al sistema

Nota

BER proviene de la forma inglesa *bit error rate* y es el acrónimo que comúnmente usamos para referirnos a la tasa de error de bit. Es la medida experimental de la probabilidad de error de bit y se obtiene dividiendo el número de bits erróneos entre el número total de bits.

Nota

OOK (del inglés *on off keying*) es el formato de modulación digital más básico, en el que la información se codifica en pulsos.

de transmisión, pero el problema viene cuando queremos discriminar una de estas respecto de las otras (por ejemplo, si solo queremos saber el valor de la dispersión cromática), debido a su dificultad.

2.2.4. Monitorización electrónica

Las técnicas electrónicas de monitorización están basadas en el análisis de la señal eléctrica después de la conversión O/E en el receptor; por ejemplo, la medida del factor Q, el análisis del diagrama de ojo o la BER. La correlación de la información de errores proveniente del bloque de FEC y los coeficientes obtenidos de un ecualizador electrónico en el receptor también se puede usar para la monitorización de prestaciones y para cuantificar las distorsiones sin ningún otro equipo de monitorización de la red. Si comparamos los coeficientes de un ecualizador eléctrico con los coeficientes ideales computados de manera previa, es posible identificar y cuantificar las distorsiones más comunes en el enlace óptico.

La BER es la medida última de las prestaciones del sistema, y el parámetro preferido para la gestión de fallos. No obstante, una dificultad para la monitorización de la BER en medio de redes ópticas es que la señal no tiene que presentar de manera necesaria los mismos errores que cuando consideramos el enlace entero. Por lo tanto, puede que si monitorizamos la BER donde se encuentra el fallo, tengamos un BER 0, sin errores; mientras que si medimos el enlace entero, es posible que nos encontremos con una degradación notable de la BER, también a causa de la acumulación de ruido dentro de la red. Por lo tanto, una solución para detectar la degradación dentro de la red consiste en añadir a la señal óptica una carga controlada de ruido, con la finalidad de tener una BER medible en cada punto del enlace. De este modo, podemos encontrar el punto de fallo mucho más fácilmente.

Una alternativa a la BER consiste en monitorizar el factor Q. Este lo podemos definir de la manera siguiente:

$$Q = \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (8)$$

Así pues, esta es una medida altamente correlacionada con la relación señal-ruido y, como consecuencia, con la BER. De este modo, el factor Q se ve afectado también por las mismas degradaciones que afectan a la BER y, por lo tanto, la medida del factor Q es altamente efectiva en la gestión de fallos. A pesar de esto, su coste es elevado si se pretende usar de manera sistemática en cada nodo de la red, puesto que sería necesario que cada nodo tuviera un detector de alta velocidad para cada canal dedicado a monitorización. Sin embargo, siempre podemos utilizar una unidad portátil que implemente estimación del factor Q.

Nota

O/E se refiere a la conversión de señal óptica a eléctrica. FEC proviene de la forma inglesa *forward error correction* y es la abreviación para referirnos al bloque de corrección de errores del receptor, que normalmente se implementa en un procesamiento digital de la señal.

Lectura de la fórmula (8)

I_1 : valor medio de los 1.

I_0 : valor medio de los 0.

σ_1 : desviación estándar del ruido de los 1.

σ_0 : desviación estándar del ruido de los 0.

Finalmente, y como contrapunto, en un receptor coherente podemos detectar directamente todo el campo óptico (amplitud y fase) y no solo su intensidad/potencia. Esto facilita enormemente la estimación de la dispersión, dado que no es más que un retraso de selectivo en frecuencia. De este modo, podemos estimar la dispersión introduciendo señales y/o secuencias conocidas en el transmisor y viendo cómo se detectan.

2.3. Dispersión en el modo de polarización

La dispersión en el modo de polarización (PMD) es el tercer parámetro más importante que puede afectar a la transmisión de una señal en una red óptica. Está causado por pequeñas imperfecciones en la fibra que cambian sus propiedades en términos del estado de polarización. Por encima, podemos decir que la PMD de primer grado consiste en un ligero retraso entre dos estados de polarización ortogonales, mientras que la PMD de segundo grado consiste en que la fibra presenta una dispersión cromática diferente para cada uno de los principales estados de polarización. De entre estos dos tipos de PMD, el que más suele afectar a la transmisión de las señales dentro de redes ópticas es la PMD de primer orden. Por este motivo, a continuación repasaremos los principios básicos de técnicas de monitorización de este parámetro.

2.3.1. Monitorización con tono RF

Este tipo de técnicas usan como principio básico el análisis espectral de señales, como por ejemplo los tonos RF. Lo cierto es que podemos descomponer un determinado componente frecuencial en dos estados de polarización ortogonales en el dominio óptico. Cada una de estas réplicas viaja a través de la fibra a velocidades ligeramente distintas debido a la PMD de primer orden, y esto provoca un desfase entre las mismas. Por lo tanto, este efecto reduce el componente espectral correspondiente del espectro de RF mediante interferencia destructiva. De este modo, la potencia recibida es función de la PMD y la podemos utilizar para monitorizar el nivel de PMD acumulado. Considerando la diferencia de fases entre las dos bandas de RF y los efectos de *chirp* y PMD, la potencia de RF después de fotodetectar queda de la manera siguiente.

$$P = P_0 \left[1 - 4\gamma(1-\gamma) \sin^2(\pi f_{RF} \Delta\tau) \right] \left(1 + \alpha^2 \cos^2 \left(\frac{\pi D_{total} \lambda^2 f_{RF}^2}{c} + \arctan(\alpha) \right) \right) \quad (9)$$

Esta ecuación indica que la disminución de potencia del tono RF la podemos usar para medir la PMD, pero la dispersión cromática puede afectar considerablemente, de modo que quizá suponga errores de monitorización. La figura 26 muestra las variaciones de potencia debidas al DGD para f_{RF} de 10 GHz, considerando la dispersión cromática constante a D_{total} de 1.200 ps/nm, $\alpha = 0$ y $\gamma = 1/2$.

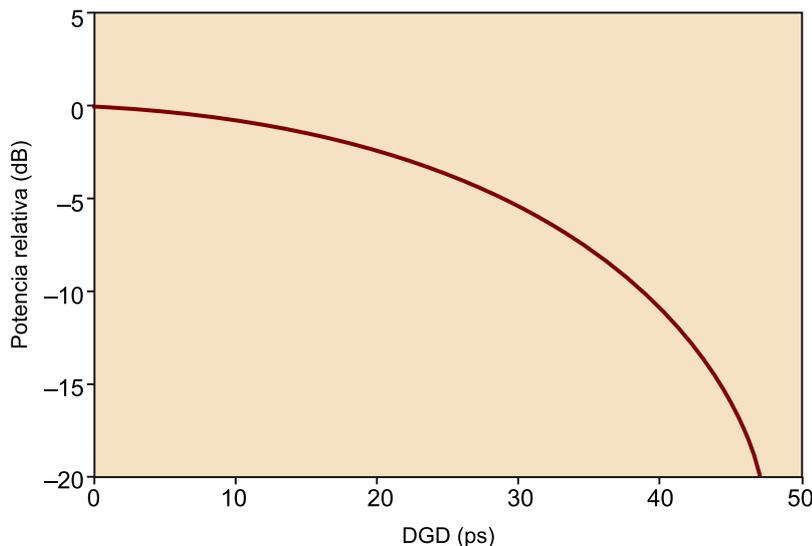


Figura 26. Variaciones de potencia debidas al DGD para f_{RF} de 10 GHz, considerando la dispersión cromática constante a D_{total} de 1.200 ps/nm

Como ejemplo, supongamos que tenemos una señal RZ. Por lo tanto, tendrá un fuerte componente de reloj porque en cada bit retorna a 0, de modo que se podría usar como señal de monitorización. Desafortunadamente, tal y como se muestra en la ecuación anterior, la dispersión cromática también afecta a la potencia del tono de RF, puesto que igualmente causa un retraso relativo entre los componentes del espectro óptico que caen por debajo y por encima de la longitud de onda de la portadora óptica. De esta manera, después de la fotodetección, el reloj de RF se atenuará cuando estos dos componentes estén en contrafase debido a la dispersión cromática. Podemos decir que la dispersión cromática causa ambigüedad cuando utilizamos el tono RF recibido para monitorizar la PMD.

Lectura de la fórmula (9)

P_0 : potencia de RF sin efectos de dispersión cromática ni PMD, que depende de la ganancia y/o pérdidas propias de la señal.

γ y $\Delta\tau$ son factores relativos a la PMD.

γ : relación de potencias.

$\Delta\tau$: retraso de grupo diferencial (DGD) entre los dos estados ortogonales de polarización.

α : parámetro que relaciona la variación de fase inducida por la intensidad de la luz modulada, también conocida como *chirp*.

D_{total} : dispersión cromática acumulada.

f_{RF} : frecuencia del tono RF.

λ : longitud de onda de la portadora óptica.

c : velocidad de la luz en el vacío.

Nota

DGD proviene de la forma inglesa *differential group delay*. Se trata de la abreviatura más común para referirnos al retraso de grupo diferencial, que es el parámetro básico que caracteriza a la PMD de primer orden.

Una solución potencial para evitar los efectos de la dispersión cromática consiste en utilizar un filtro óptico muy estrecho y centrado en una de las bandas laterales de la señal óptica. En este caso, solo detectamos un tono de RF y los efectos de la dispersión cromática desaparecen. De este modo, la potencia del tono RF solo depende de la mezcla de la portadora óptica y del mismo tono. Dado que los efectos de PMD de primer orden dependen de la polarización, también tendremos atenuación del tono recibido en este caso de recepción de banda lateral. Por ejemplo, para un sistema RZ de 10 Gb/s, un filtro estrecho centrado en el tono de 10 GHz por encima de la portadora óptica permite medir la PMD a partir de la potencia de este tono.

Sin embargo, este es un caso muy particular, puesto que los sistemas estándar implementan el formato de modulación NRZ. Por lo tanto, el tono de reloj no aparece. Una solución para estos sistemas consiste en filtrar de manera muy estrecha con un *fiber bragg grating* (FBG) para generar el tono de reloj y monitorizar la PMD, pero el resultado todavía es sensible a la dispersión cromática. Otra técnica consiste en intentar detectar una de las bandas laterales de la señal de reloj, por ejemplo añadiendo un filtro óptico a la salida del FBG. De este modo, podemos recuperar el tono RF igual que cuando filtrábamos ópticamente la señal RZ; y la potencia del reloj recuperado depende solo del retraso relativo entre los dos estados ortogonales de polarización, que está fijado por la PMD.

Aparte de estos efectos, también se puede comprobar que la PMD provoca un filtrado *notch* de manera repetida en el espectro eléctrico después de la fotodetección, por lo que también se puede emplear para monitorizar la PMD. A partir de la ecuación anterior, podemos ver que si el DGD del sistema es bastante grande, la frecuencia de estos *dips* se puede medir de manera fácil y cuidadosa, lo que facilita el cálculo del DGD cuanto más baja sea su frecuencia. Para mejorar la sensibilidad, se puede introducir un elemento de gran DGD dentro del módulo de monitorización y antes de la fotodetección. De esta manera, se incrementa el valor total del DGD y los *dips* aparecen a más baja frecuencia. La figura 27 muestra el esquema de módulo que monitoriza la PMD basado en este principio. La señal que hay que monitorizar se envía a un filtro óptico, pasa por un control de polarización y después entra en un trozo de fibra mantenedora de polarización, que introduce un DGD grande. Para monitorizar la PMD, el control de polarización varía de manera aleatoria y pasa por todos los posibles estados de polarización. Por lo tanto, varía la posición de los *dips* de frecuencia (de $f_{máx}$ a $f_{mín}$) y se pueden medir con un analizador de espectros de radiofrecuencia. Si consideramos que transmitimos a través de una fibra que introduce un valor de DGD β_1 y que la fibra mantenedora de polarización introduce un DGD conocido de β_2 , entonces el máximo y el mínimo DGD se pueden expresar como:

Nota

RZ, del inglés *return to zero*, es una codificación de la información típica del formato de modulación OOK. Consiste en que durante una parte del tiempo de bit, está a 0. Por ejemplo, en un sistema RZ al 50%, durante cada bit la mitad de su duración será el bit que hay que transmitir codificado, mientras que durante la otra mitad del tiempo la señal permanecerá a cero. Por el contrario, en la codificación de señal NRZ (del inglés *no return to zero*) no se vuelve nunca a cero durante el tiempo de bit, y la señal codificada se mapa directamente con los bits transmitidos.

$$\begin{aligned} DGD_{m\acute{a}x} &= \beta_1 + \beta_2 \\ DGD_{m\acute{i}n} &= |\beta_1 - \beta_2| \end{aligned} \quad (10)$$

Puesto que $DGD_{m\acute{a}x}$ es proporcional a $f_{m\acute{a}x}$ y $DGD_{m\acute{i}n}$ lo es a $f_{m\acute{i}n}$, los valores de DGD β_1 y β_2 se pueden calcular a partir de la ecuación anterior.

Observad que en este último caso, el hecho de incluir un elemento de gran DGD ayuda a mover la posición del *dip* hacia el margen de bajas frecuencias, aunque el DGD del enlace sea pequeño. Monitorizar con componentes de baja frecuencia con una sensibilidad mejorada es altamente deseable, porque no solo elimina el uso de electrónica de alta frecuencia, sino que el módulo de monitorización también se vuelve insensible a la PMD de orden superior. Además, dado que se mide la posición de un nulo en RF y no un valor de potencia, este esquema de monitorización es insensible también a la velocidad de transmisión de la señal. Por lo tanto, no hace falta ningún tipo de conocimiento previo sobre el nivel de potencia de RF.

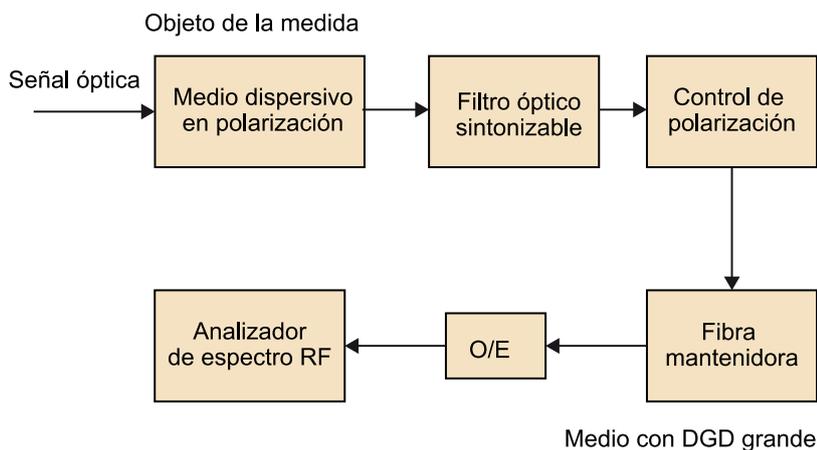


Figura 27. Esquema de medida de PMD introduciendo un elemento de gran DGD. Por ejemplo, fibra mantenedora de polarización

2.3.2. Medida del DOP

El grado de polarización de una señal viene dado por la relación entre la potencia de la parte polarizada de esta señal y el total de la potencia. La medida del grado de polarización de una señal también sirve para evaluar señales afectadas por la PMD con una serie de ventajas respecto de las otras técnicas:

- No hacen falta dispositivos de alta velocidad.
- Tiene una mayor simplicidad.
- Es independiente de la velocidad de transmisión.
- No está afectado por otras degradaciones como, por ejemplo, la dispersión cromática.

Nota

SOP es la abreviatura más común para referirnos al estado de polarización de una señal óptica, y se corresponde con la forma inglesa *state of polarization*.

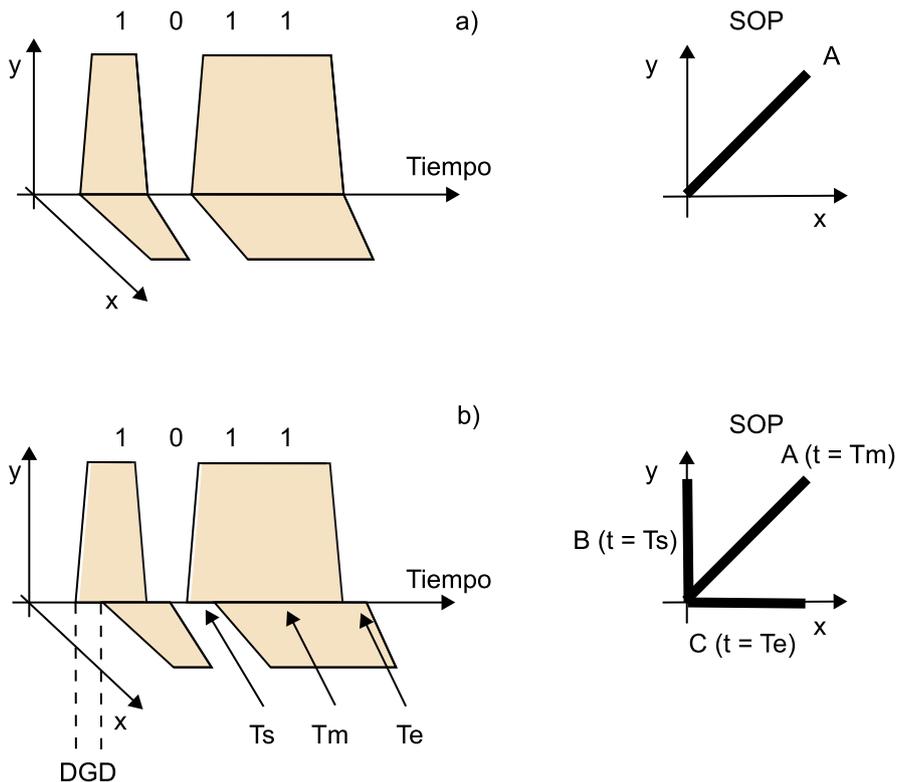


Figura 28. Degradación del estado de polarización de una señal NRZ causado por la PMD de primer orden. a) Señal óptica y estado de polarización sin PMD. b) Señal óptica y estado de polarización cuando tenemos PMD. Los ejes x e y corresponden a los dos estados ortogonales del medio de transmisión.

El mecanismo de degradación del estado de polarización mediante la PMD se ilustra en la figura anterior. Sin PMD, la señal óptica es luz puramente polarizada con un solo estado de polarización, como en la figura 28a. Con PMD, el estado de polarización al final (SOP B y SOP C) y en su punto del medio (SOP A) de los 1 de una señal NRZ es diferente debido al retraso relativo entre los componentes de polarización del pulso, como podéis ver en la figura 28b. El decrecimiento del grado de polarización corresponde a la distorsión de la señal causada por la PMD. Para una señal OOK con codificación NRZ, por las propiedades intrínsecas de este formato de modulación, el grado de polarización estará entre 0,5 y 1, con lo cual limita el margen de medida de la PMD y solo se pueden medir DGD relativamente pequeños.

2.3.3. Monitorización electrónica

Como hemos dicho antes, las técnicas de monitorización electrónica son aquellas que están basadas en el análisis de la señal eléctrica después de la conversión O/E en el receptor; por ejemplo, la medida de la BER y/o del factor Q, el análisis del diagrama de ojo y el análisis del histograma.

Concretamente, el diagrama de ojo es una herramienta muy común para el análisis de calidad de las señales y lo podemos usar también para la monitorización de la PMD. Recordad que si somos capaces de medir la apertura del ojo, podemos medir el impacto del conjunto de todas las degradaciones del sistema. Los principales problemas que presenta, sin embargo, son que hace

falta una recuperación de reloj y el hecho de que no sea posible aislar los efectos de las diferentes degradaciones. También podemos ver un diagrama de ojo como una distribución de la amplitud dentro del tiempo de bit adquirida de manera síncrona.

Así pues, cuando la señal de reloj no se puede recuperar o bien es del todo ausente, solo podemos muestrear la señal de manera asíncrona. Cuando muestreemos de manera aleatoria y asíncrona dentro del tiempo de bit, podemos obtener el histograma de la amplitud. Con un número bastante grande de muestras aleatorias, un histograma asíncrono puede representar la distribución de la amplitud de los pulsos en un periodo de bit. Esta técnica puede ser un método de bajo coste y transparente a la velocidad de bit para hacer una monitorización de prestaciones de un canal, dado que no hay que recuperar el reloj.

Como hemos visto antes, podemos evaluar la calidad de la señal con un histograma asíncrono, pero es sensible a la OSNR, a la dispersión cromática y a la PMD. Además, puesto que se trata de una medida hecha en el dominio eléctrico, la clave consiste en cómo medir el valor absoluto de la PMD y otras degradaciones de manera separada.

Bibliografía

Chan, C. C. K. (2010). *Optical Performance Monitoring Techniques*. Elsevier.

Derickson, D. (1997). *Fiber Optic Test and Measurement*. Prentice Hall.

HP 8147 Optical Time Domain Reflectometer. User's Guide (1997). Hewlett-Packard.

Optical Time Domain Reflectometers. Pocket Guide (2001). Agilent Technologies Deutschland.

