



INTRODUCCIÓN A LA INSTRUMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA

Índice

	<i>pág.</i>
1. Perspectiva histórica	2
2. Instrumentación en enlaces ópticos digitales de fibra óptica para la estimación de la calidad <i>extremo a extremo</i>	4
3. Instrumentación en enlaces ópticos analógicos de fibra óptica para la estimación de la calidad <i>extremo a extremo</i>	9
4. Instrumentación para caracterizar fibra óptica	11
4.1. Medida de la dispersión cromática de la fibra monomodo	11
4.2. Medida de la atenuación de la fibra monomodo	12
5. Instrumentación para caracterizar fuentes de luz	13
5.1. Potencia óptica emitida	13
5.2. Espectro de emisión	14
5.3. Longitud de onda central de emisión	15
5.4. Anchura de línea de la fuente	16
5.5. Estado de polarización de la luz de la fuente	17
6. Instrumentación para caracterizar detectores ópticos	19
7. Instrumentación para caracterizar componentes con múltiples puertos ópticos	20
7.1. Pérdidas de inserción en componentes pasivos	20
7.2. Pérdidas de retorno	22
8. Otras fuentes de información	23

INSTRUMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA

Introducción a la instrumentación para la caracterización de componentes y la medida de la calidad de la transmisión en enlaces y redes de fibra óptica

1. Perspectiva histórica

La comercialización de instrumentos destinados a la caracterización de componentes y la medida de la calidad de la señal transmitida en enlaces de fibra óptica data de finales de los años 1970. La instrumentación disponible para tal fin se reducía en aquellos momentos casi exclusivamente a medidores de potencia con los que era posible monitorizar la presencia de señales para comprobar si sus niveles eran adecuados a lo largo del enlace. Una fuente de luz y un medidor de potencia formaban un sencillo equipo que servía para estimar los parámetros fundamentales de los componentes utilizados en el enlace (la potencia emitida por el emisor del enlace, las pérdidas de inserción de un acoplador en una posición intermedia entre el emisor y el receptor, etc.) La localización de fallos en el tendido de fibra se hacía a través de esquemas sencillos de reflectometría en el dominio del tiempo.

En estos últimos 30 años los enlaces y las redes de fibra óptica han evolucionado mucho y en el mercado se venden hoy instrumentos destinados a caracterizar dichos enlaces extremo a extremo, a monitorizar la señal en puntos intermedios, o a predecir el funcionamiento de los dispositivos que se emplean para procesar y enrutar la señal de luz. Es por ello que la titulación de *Ingeniero de Telecomunicación* debe incluir un conjunto de temas cuyo objetivo sea introducir al estudiante en los fundamentos teóricos y el manejo de dicha instrumentación. Varios son los factores que han hecho que hoy por hoy la instrumentación de fibra óptica sea una disciplina con entidad propia por su extensión y complejidad:

- *Los sistemas de multiplexación en longitud de onda:* en los enlaces primitivos de fibra no importaba la longitud de onda exacta de emisión de la fuente, ni sus fluctuaciones con los parámetros ambientales por ejemplo. La tolerancia de la calidad de la transmisión con respecto a dichas fluctuaciones era grande. Hoy en día, las necesidades de gran ancho de banda obligan a emplear en ocasiones varias longitudes de onda sobre la misma fibra (son los sistemas WDM, *Wavelength Division Multiplexing*, o de multiplexación en longitud de onda) separadas tan sólo 100GHz (0.8nm.) Para evitar interferencias entre unos canales y otros, es importante que las fuentes emitan de manera estable en una cierta longitud de onda y con un cierto nivel de potencia con independencia de factores externos o debido al envejecimiento. En sistemas WDM se necesita la instrumentación precisa para que conectada en algún punto del enlace, a través por ejemplo de acopladores de monitorización, sea capaz de determinar la potencia, longitud de onda y relación señal/ruido de cada canal con gran precisión.

- *Enlaces de gran longitud:* en los primeros enlaces de fibra óptica, cuando la longitud que se pretendía cubrir era muy grande, se empleaban repetidores en puntos intermedios. Estos consistían en recuperar la señal en formato eléctrico en dicho punto por medio de un receptor óptico, acondicionarla y retransmitirla empleando una fuente de luz. La invención de los amplificadores ópticos, entre los que destacan los de fibra dopada con Erblio (EDFA, *Erbium Doped Fiber Amplifier*), que pueden actuar simultáneamente sobre varias longitudes de onda en tercera ventana a 1550nm, ha favorecido la implantación de los sistemas WDM así como la transición de los primeros enlaces en la ventana de mínima dispersión a 1300nm hacia la ventana de mínima atenuación ya que, de hecho, los sistemas WDM funcionan mejor si existe cierta dispersión cromática ya que los efectos no lineales en la

fibra se compensan parcialmente. La presencia de amplificadores ópticos no sólo permite enlaces de mayores longitudes sino que también hace menos crítica las pérdidas de componentes destinados al procesado o al enrutamiento de los distintos canales como los multiplexores. No obstante, los EDFAs, al mismo tiempo que refuerzan la potencia de la señal óptica sin necesidad de pasar por el dominio eléctrico, introducen también un cierto ruido óptico (el ruido ASE, *Amplified Spontaneous Emission*.) Es importante poder caracterizar un amplificador óptico tanto desde el punto de vista de ganancia como de figura de ruido en función de la longitud de onda del canal.

- *Las velocidades de transmisión digital son cada vez mayores:* los sistemas WDM son la forma más avanzada de aumentar la capacidad de transmisión aprovechando el enorme ancho de banda potencial de la fibra óptica. Sin embargo, emplear varias longitudes de onda en el enlace aumenta las exigencias de los componentes del mismo: las fuentes deben ser de gran estabilidad frente a variaciones de temperatura o envejecimiento, es importantísima la linealidad de la fibra y componentes de fibra intermedios, en el extremo receptor es necesario filtrar cada canal rechazando perfectamente los adyacentes pues de lo contrario se produciría un efecto pernicioso de interferencia entre canales (o *crosstalk*), y en general la instrumentación asociada también es más compleja (por ejemplo, para la respuesta de los filtros pasobanda ópticos de recepción se precisan instrumentos de gran rango dinámico de medida, la longitud de onda de los láseres debe estimarse con una precisión en torno a la centésima de nm, etc.) En los enlaces digitales varias señales de algunos Kbps (Kilobits por segundo), por ejemplo, pueden multiplexarse en el tiempo (técnicas TDM, *Time Division Multiplexing*) dando lugar a una señal a varios Gbps (Gigabits por segundo) que modula una única fuente de luz. En la actualidad existen enlaces digitales a 2.5Gbps y 10Gbps, y se están desarrollando los componentes para 40Gbps y velocidades superiores. Aunque la capacidad de un sistema digital a dichas velocidades es muy grande, no es trivial modular la fuente de luz tan rápidamente. La anchura del espectro del láser mientras es modulado es un parámetro importantísimo en enlaces digitales a gran velocidad y se necesita la instrumentación necesaria para estimarla. La dispersión cromática de la fibra óptica o la dispersión por el modo de polarización de la luz, por ejemplo, también deberían poder ser medidas, pues ambas dan lugar en el extremo receptor al solapamiento o interferencia entre símbolos (ISI –*Inter-Symbolic Interference*–) por ensancharse temporalmente la forma de onda de los bits conforme éstos se propagan por la fibra. Sería deseable, finalmente, poder estimar la tasa de error que se comete en la recuperación de la información digital en el extremo receptor con respecto a la información realmente transmitida.

- *La capacidad de los sistemas de transmisión analógica es también mayor:* en los sistemas modernos de distribución de televisión, por ejemplo, varios canales de vídeo y datos modulan subportadoras eléctricas que, tras sumarse, modulan la potencia de un único láser. Toda la información es así enviada sobre la envolvente de la señal de luz desde un nodo central hasta el nodo receptor más cercano al hogar del usuario. En este nodo receptor (normalmente en el barrio del usuario) la señal óptica se detecta y los distintos canales eléctricos son enviados al usuario por cable coaxial de la manera tradicional. Se ha desarrollado la instrumentación óptica precisa para observar el espectro de la señal total de televisión y datos entre los nodos central y de barrio y deducir los niveles de distorsión armónica e intermodulación entre canales, debido a la falta de linealidad perfecta en fuentes y receptores ópticos, que limita la capacidad de dichos sistemas analógicos. Por otro lado, tanto para el caso del formato analógico como para el del digital, los conversores E/O (electro-ópticos), o fuentes de luz, así como los O/E (óptico-eléctricos), o receptores, no responden bien a cualquier velocidad de la señal (eléctrica u óptica) en su entrada. El ancho de banda de transmisores y receptores debería poder ser, asimismo, medido.

- *Monitorización en tiempo real de pérdidas en redes:* en redes de arquitecturas distribuidas como las actuales con tamaños que van desde las pequeñas redes de área local a los enlaces transoceánicos de varios miles de Km, de las que puede depender el servicio a muchos

usuarios, sería deseable poder monitorizar la señal óptica continuamente para poder detectar fallos rápidamente y localizarlos espacialmente con precisión. El uso de técnicas avanzadas de reflectometría en el dominio del tiempo hace posible tal tarea. Se pueden emplear las fibras sin tráfico de datos del cable o bien una longitud de onda que no interfiriera con la empleada en la transmisión de información, de modo que la atenuación de la fibra y las pérdidas de inserción de los componentes intermedios entre el punto emisor y el receptor pueden ser monitorizados en tiempo real. Por su importancia, las técnicas de reflectometría en el dominio del tiempo merecerán un tema aparte en este curso.

Los siguientes apartados son una introducción a la instrumentación y técnicas necesarias para estimar la calidad de la transmisión de la información *extremo a extremo* tanto en sistemas digitales como analógicos. Del mismo modo se fija la atención en los parámetros de los componentes del sistema óptico: se describe la instrumentación y técnicas habituales para medir la dispersión y atenuación en la fibra óptica, así como los procedimientos y aparatos necesarios para medir las características fundamentales de fuentes y detectores ópticos, y también las de los componentes de varios puertos ópticos (acopladores, multiplexores, amplificadores ópticos, etc.)

2. Instrumentación en enlaces ópticos digitales de fibra óptica para la estimación de la calidad *extremo a extremo*

En un sistema óptico de transmisión digital, la portadora óptica es modulada entre dos niveles de potencia distintos correspondientes al 1 y al 0 lógicos. Diversos factores intervienen a lo largo del enlace de modo que la señal eléctrica en el extremo receptor del enlace óptico está degradada con respecto a la señal eléctrica de partida. En la Fig. 1 pueden verse los distintos efectos que los componentes del enlace tienen sobre la señal de datos.

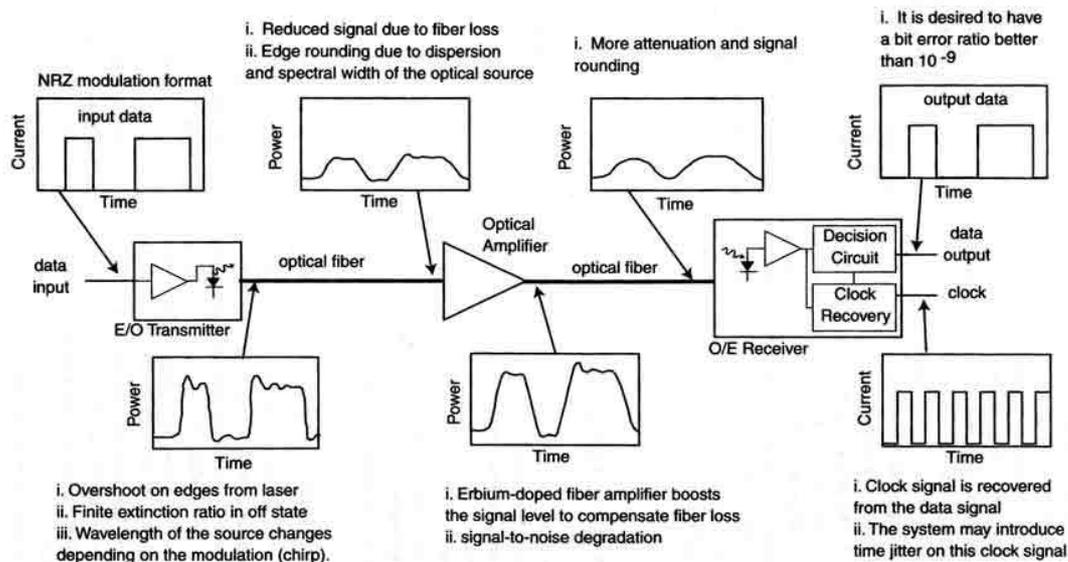


Fig. 1. Esquema genérico de un enlace óptico digital de fibra óptica

La señal detectada se muestrea con una frecuencia igual a la velocidad de transmisión de datos (BR, *bit rate*, en bps) y el circuito de decisión estima si el valor de cada muestra corresponde a uno u otro nivel lógico y asigna uno u otro valor de corriente eléctrica constante a la salida. Dado que la señal muestreada está degradada, se cometen

errores en la regeneración de la señal dando lugar a lo que se conoce como la tasa de error en el enlace o proporción de bits erróneos (BER, *bit error ratio*.) Algunos autores se refieren a este valor como la probabilidad de error del enlace digital.

La calidad de la transmisión en un enlace digital viene por tanto definida, extremo a extremo, a través del valor de la tasa de error. Dicho valor puede ser estimado mediante el montaje de la Fig. 2. Mediante un generador de bits se transmite por el enlace una secuencia de datos. A la salida del receptor se obtiene una cierta señal regenerada a partir de la señal a la salida del enlace, que se compara directamente con la señal transmitida. La proporción de bits erróneos en la señal regenerada es una medida directa de la tasa de error.

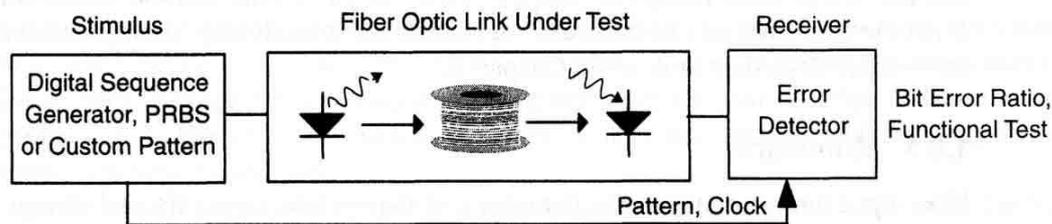


Fig. 2. Medida directa de la tasa de error en un enlace digital de fibra óptica

Para que la medida de la tasa de error mediante el sistema de la Fig. 2 sea representativa de la tasa de error del enlace funcionando con datos reales es crítica la elección de una secuencia de datos adecuada. Lo ideal sería poder generar secuencias de bits de gran longitud totalmente aleatorias. Matemáticamente es sencillo generar secuencias binarias *pseudo-aleatorias* (PRBS, *Pseudo-Random Binary Sequence*), que son secuencias "aleatorias" de bits que se repiten después de un cierto número de bits muy elevado ($2^{23}-1$ bits, por ejemplo.) Una tasa de error de 10^{-9} es considerada como una calidad mínima estándar en telecomunicaciones. Para comunicaciones de datos la tasa máxima aceptada suele ser todavía menor, en torno a 10^{-13} .

La medición de la tasa de error según la Fig. 2 requiere una conexión física entre el emisor y el receptor del enlace digital de modo que en el receptor tenemos tanto la señal de datos como de reloj del emisor. Sin embargo, salvo en la etapa de diseño o experimentación del enlace, en la mayor parte de las ocasiones tal conexión es inviable porque el enlace está tendido y entre emisor y receptor hay una gran distancia. En ese caso, la información de la señal de reloj se suele recuperar a partir de la señal de datos en recepción y los extremos transmisor y receptor tienen un conjunto de secuencias de evaluación de calidad de la transmisión que ambos conocen. Este método, por tanto, sólo es capaz de proporcionar en general estimaciones de tasa de error sobre secuencias que simulan datos reales pero que no lo son, y además no proporciona ninguna información extra acerca del nivel de ruido o dispersión cromática, por ejemplo, existentes en el enlace, ya que directamente se maneja la señal regenerada.

Una forma más completa de observar la calidad de la transmisión de datos en un enlace digital consiste en observar la forma de onda de la corriente en el extremo transmisor y luego en el extremo receptor utilizando un osciloscopio digital rápido, como en la Fig. 3. Es posible entonces determinar si el láser introduce mucha sobre-oscilación o no, si la dispersión cromática es más o menos importante, o si el nivel de ruido adquirido en las distintas etapas del enlace es mayor o menor.

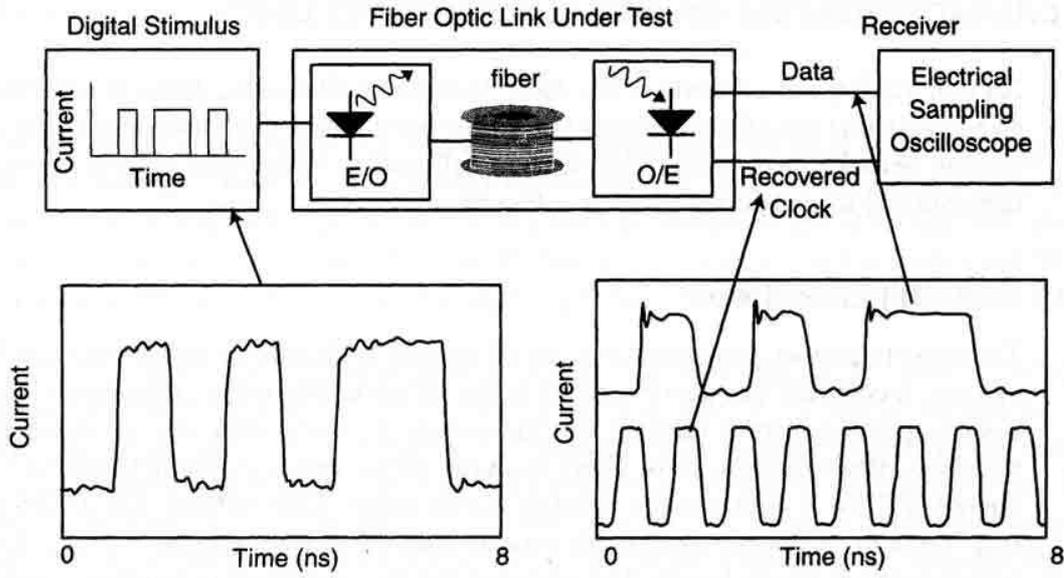
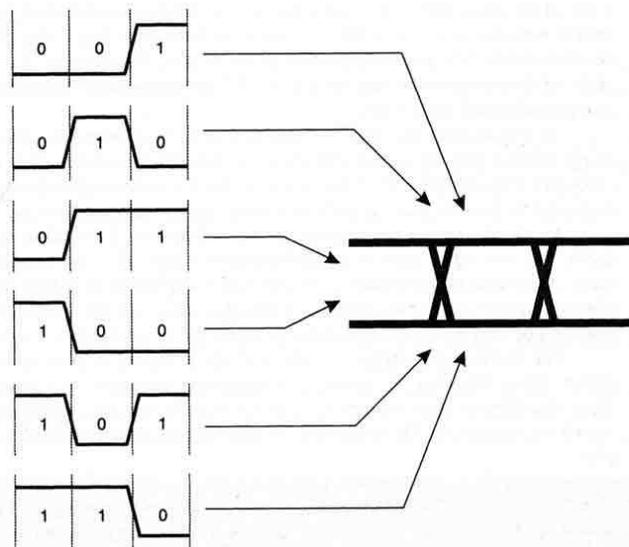


Fig. 3. Calidad de la transmisión en un enlace digital por observación de la forma de onda de la corriente eléctrica a la entrada y a la salida

Sincronizando el *trigger* del osciloscopio con la señal de reloj recuperada a partir de los datos se puede obtener el denominado diagrama de ojo (*eye diagram*) que consiste en una superposición de las formas de onda de todos los bits transmitidos. Los estándares internacionales SONET (*Synchronous Optical Network*) y SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) especifican límites sobre la distorsión aceptable en la forma de onda utilizando receptores ópticos que también están estandarizados. La norma define una máscara que establece los límites admitidos para los puntos del diagrama de ojo para cierta calidad de transmisión a cierta velocidad (Fig. 4.) La medida de la calidad de la transmisión utilizando máscaras es lo más habitual y lo más rápido. No obstante, también puede obtenerse el valor de la tasa de error a partir de los valores estadísticos de los puntos del diagrama del ojo si es que el osciloscopio permite generar histogramas.



(a)

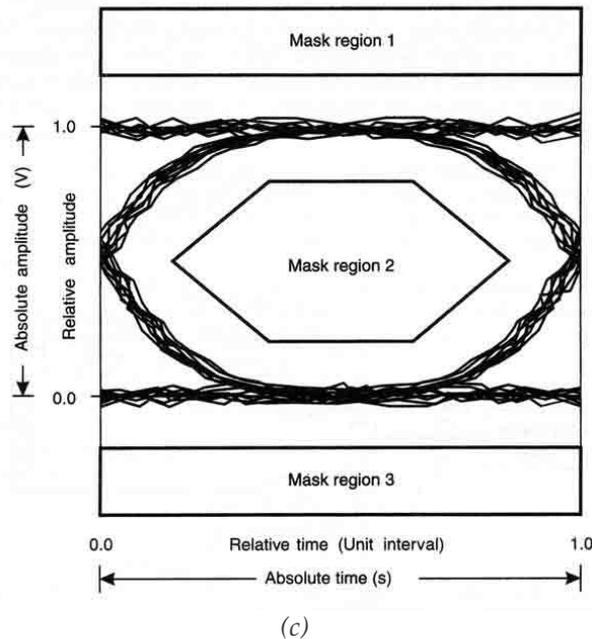
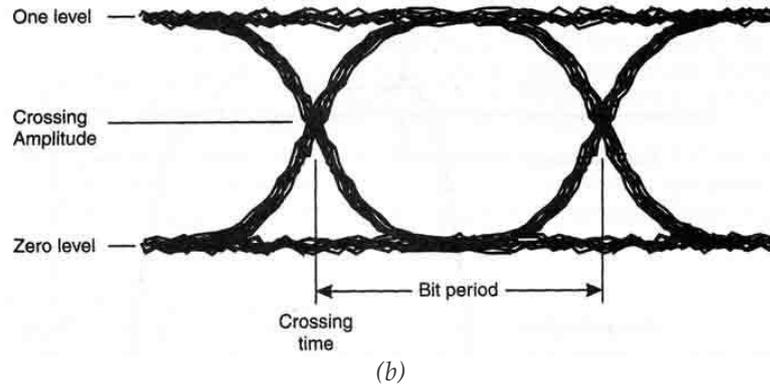


Fig. 4. (a) Concepto de diagrama de ojo, (b) ejemplo de diagrama de ojo y (c) concepto de máscara en una transmisión digital

El circuito de recuperación de la señal de reloj produce una cierta modulación de fase parásita que desplaza ligeramente los flancos del reloj (que marcan el muestreo de la señal de datos) con respecto a sus posiciones ideales debido al ruido eléctrico y a la dependencia del funcionamiento de dicho circuito con secuencias concretas de 1's y 0's (por ejemplo, es más fácil que el circuito pierda la sincronía si se transmiten sub-secuencias largas de sólo uno u otro valor lógico.) En el diagrama de ojo esto se traduce en que el flanco de subida y de bajada del bit se cruzan en una zona amplia y no en un punto más o menos localizado como cabría esperar. La anchura de dicha zona (alrededor del punto de cruce, *crossing time* en la Fig. 4b) es lo que llamamos *jitter* temporal. A partir del diagrama de ojo se obtiene el valor que estadísticamente es el más óptimo para el muestreo, a pesar del *jitter*, como aquel en el que la apertura del ojo es máxima (y el valor umbral para el circuito de decisión como el valor en el punto de cruce, *crossing amplitude*, en la Fig. 4b.) El *jitter* se mide en unidades relativas al tiempo de bit nominal. Así un *jitter* de 0.1 (ó 0.1UI, *Unit Intervals*) corresponde a una amplitud máxima de la desviación del flanco de la señal de reloj con respecto a su posición teórica de un 10% del tiempo de bit nominal. Estas unidades de medida relativas de *jitter* permiten dar su valor con independencia de la velocidad de transmisión.

En ocasiones, la señal de reloj recuperada en recepción es empleada para disparar un generador de bits en una etapa posterior del enlace, por ejemplo. En sistemas digitales

es muy importante la propagación del *jitter* a lo largo de las distintas partes del enlace. Por eso son frecuentes medidas extremo a extremo que caracterizan el *jitter* presente en el reloj de entrada y el *jitter* propagado al reloj de salida.

La Fig. 5 muestra la forma en que podemos caracterizar la propagación del *jitter* en el enlace. El generador de secuencias pseudo-aleatorias es disparado por una señal de reloj con *jitter* sinusoidal de amplitud y frecuencia controlables. Son típicas las siguientes tres medidas:

- *Jitter absoluto*: excursión máxima (en tanto por uno respecto a la duración nominal del bit) de la desviación de los flancos de la señal de reloj recuperada en recepción respecto a sus posiciones teóricas.
- *Tolerancia al jitter*: amplitud máxima del *jitter* en la señal de reloj a la entrada en función de la frecuencia de modo que la calidad de la transmisión no esté por debajo de un nivel de tasa de error dado. El circuito de recuperación de reloj tiene mejor tolerancia a variaciones lentas del tiempo de bit nominal y sigue peor el *jitter* de alta frecuencia lo que conduce a una mayor tasa de error. Por tanto, fijada una calidad de transmisión mínima, la amplitud máxima aceptable del *jitter* de entrada disminuye conforme aumenta su frecuencia. SONET/SDH estandarizan máscaras de tolerancia al *jitter* a distintas velocidades de transmisión. Por ejemplo para una señal OC-48 de SONET (2.48832Gbps), la máscara desciende desde una amplitud máxima de *jitter* del reloj a la entrada del enlace de 15UI a 10Hz hasta 0.15UI a 20MHz.
- *Función de transferencia del jitter*: es la relación entre la amplitud del *jitter* en recepción respecto del *jitter* en transmisión. Dado el especial efecto perjudicial del *jitter* de alta frecuencia en los sistemas digitales, se define una frecuencia de corte por debajo de la cual se tolera que el *jitter* se mantenga o incluso se incremente un poco con respecto a la entrada, y por encima de la cual se espera que la amplitud del *jitter* se atenúe. En la señal OC-48, dicha frecuencia de corte está alrededor de 2MHz. A 20MHz, por ejemplo, el *jitter* a la entrada debe atenuarse 20dB a la salida. SONET/SDH también estandarizan las máscaras para la función de transferencia del *jitter* en función de la velocidad de transmisión.

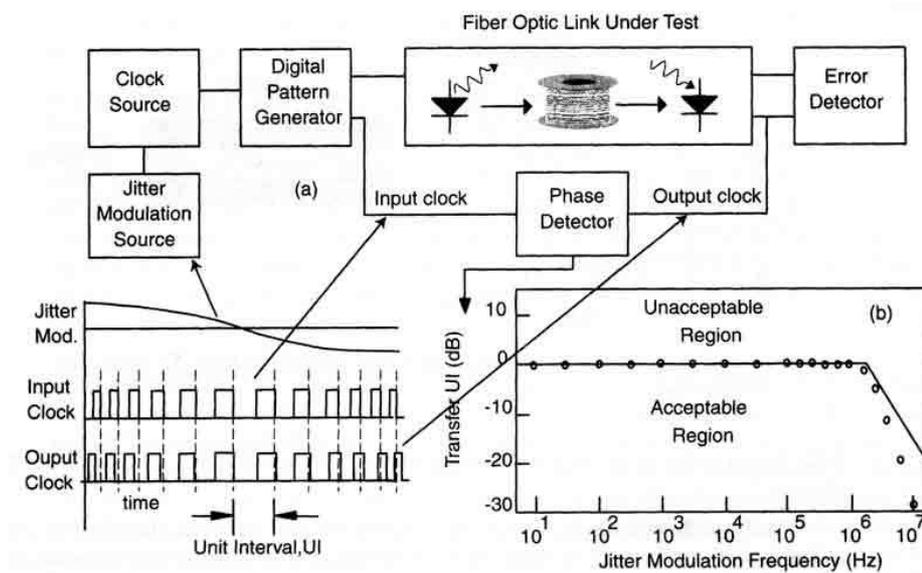


Fig. 5. (a) Caracterización del jitter en sistemas de transmisión digital, (b) ejemplo de función de transferencia de jitter

3. Instrumentación en enlaces ópticos analógicos de fibra óptica para la estimación de la calidad *extremo a extremo*

En la Fig. 6 puede observarse el diagrama de bloques básico de un enlace óptico analógico de fibra óptica. La potencia óptica de la fuente es en este caso modulada de forma continua y no de manera discreta como en los enlaces digitales. Se trata de obtener en el extremo receptor una réplica de la información eléctrica de la entrada.

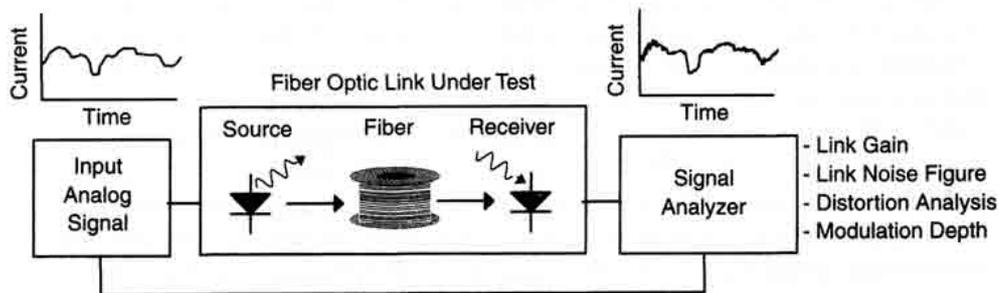


Fig. 6. Esquema genérico de un enlace óptico analógico de fibra óptica

Aunque la distribución de la información también podría hacerse directamente en formato eléctrico, se necesitarían muchos amplificadores eléctricos para alcanzar distancias moderadas y la degradación de la relación señal/ruido sería muy rápida. Si por el contrario la distribución de la información se hace modulando la envolvente de una portadora óptica, las distancias que pueden cubrirse son muy altas y, tras detectar la señal óptica en recepción, la señal eléctrica mantiene una adecuada relación señal/ruido.

Los enlaces ópticos analógicos son usados para transportar con bajas pérdidas la señal de microondas en diversas aplicaciones de antenas y radar. Sin embargo, la aplicación comercial estrella de los enlaces ópticos analógicos es la distribución de la señal de canales de televisión por cable (CATV, *Cable-TV*.) Cada canal de TV modula una subportadora eléctrica, de frecuencia f_i , usando modulación de amplitud con banda lateral residual (VSB-AM, *Vestigial Side-Band Amplitude Modulation*.) Las señales eléctricas correspondientes a cada canal se combinan y la señal resultante modula la amplitud de la portadora óptica. En recepción la señal óptica se detecta, recuperando así la señal eléctrica inicial que se distribuye por cable coaxial desde el nodo receptor de barrio hasta el hogar del usuario final. El parámetro que fundamentalmente limita la calidad global del enlace óptico es la linealidad de la conversión E/O y O/E. Si éstas no son perfectas aparecen la distorsión armónica (réplicas del canal a los múltiplos de la frecuencia central del canal) y los productos de intermodulación (batidos entre las frecuencias de canales distintos) que degradan el funcionamiento del sistema. Por ejemplo, si el número de canales que se transmiten es N , entonces aparecen del orden de N^2 productos de intermodulación del tipo $f_i \pm f_j$, y N^3 del tipo $f_i \pm f_j \pm f_k$. Supongamos que 60 canales de TV se emiten en la banda entre 50MHz y 450MHz. En la parte baja del espectro aparecen en torno a 50 productos de intermodulación de segundo orden, y hacia los 200MHz coinciden unos 1100 términos de tercer orden. Sin duda, la calidad de la señal por canal es tremendamente dependiente de la posición y potencia exacta de dichos productos de intermodulación.

En un enlace óptico analógico, la calidad de la señal transmitida sobre la envolvente de la portadora óptica se observa utilizando un detector óptico seguido de un analizador de espectros eléctrico (ESA, *Electrical Spectrum Analyzer*.) El conjunto también se comercializa como un único instrumento bajo el nombre de *analizador de señales de luz* (LSA, *Lightwave Signal Analyzer*) que incluye un fotodetector calibrado precedido de un atenuador óptico y un circuito de recuperación del nivel *dc* de la fotocorriente (que se

filtraría en un ESA.) (Ver Fig. 7a.) El atenuador óptico permite determinar si los términos de la distorsión no lineal están presentes en la señal o proceden del propio instrumento de medida ya que el ESA es un instrumento fuertemente no lineal (tiene un amplificador logarítmico, por ejemplo.)

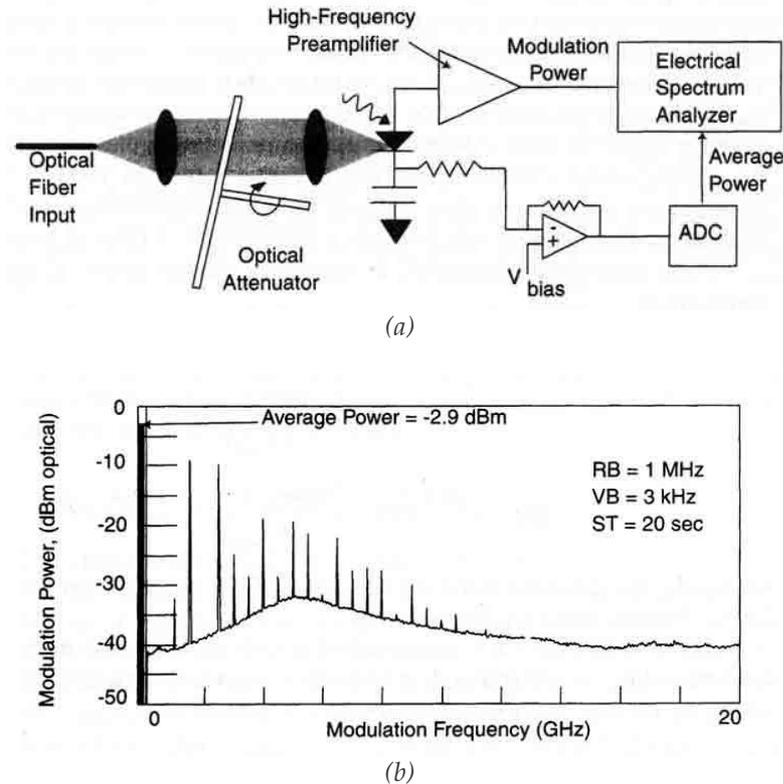


Fig. 7. Análisis de la calidad de la señal transmitida en un enlace óptico analógico: (a) esquema de un analizador de señales de luz y (b) medida típica

No debería confundirse la representación en un analizador de espectros óptico (OSA, *Optical Spectrum Analyzer*) con la representación en un analizador de espectros eléctrico (o, equivalentemente, en un analizador de señales de luz), aunque ambos son utilizados en instrumentación óptica y los *displays* de ambos representan espectros. El OSA informa sobre la señal óptica total e incluye información tanto de la anchura de línea y otros parámetros de la fuente sin modular como de la señal de modulación. El OSA siempre sería la mejor solución si existieran de la resolución necesaria para observar el espectro de la señal óptica modulada con una señal de microondas. El ESA sólo ofrece información de la envolvente de la señal óptica, es decir, sólo sobre la modulación, perdiendo toda la información sobre la fase de la fuente óptica empleada o su longitud de onda central.

Un ESA mide la potencia eléctrica eficaz en función de la frecuencia de modulación de la fotocorriente. Es decir, que si la parte de modulación de la fotocorriente, tras el amplificador de transimpedancia, tiene la forma $V_{mod} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{mod} \cdot t)$, porque la potencia óptica ha sido modulada en amplitud con una frecuencia f_{mod} , el ESA mostraría un "pincho" de valor $V_{mod}^2 / (2 \cdot Z_{in})$ (vatios), siendo $Z_{in} = 50 \Omega$ la impedancia de entrada del ESA (y, por consiguiente la impedancia de salida del detector) en la frecuencia f_{mod} . Si conociéramos la responsividad del fotodetector y la ganancia del amplificador eléctrico posterior, se podría, midiendo la potencia óptica media, calcular el valor de la corriente de *dc* a la salida del detector, I_{dc} , y a partir de ahí calcular la profundidad o índice de modulación de la portadora óptica como $m = V_{mod} / V_{dc}$, siendo $V_{dc} = I_{dc} \cdot Z_{in}$, a partir de la medida de V_{mod} en el ESA. Esto es equivalente a hacer $m = P_{\text{óptica pico}}(f_{mod}) / P_{\text{óptica media}}$, siendo $P_{\text{óptica pico}}(f_{mod})$ la

excursión de la potencia óptica respecto de la potencia óptica media para la frecuencia de modulación f_{mod} . Cuando $P_{\text{óptica pico}}(f_{mod}) = P_{\text{óptica media}}$, la potencia óptica se modula entre un máximo y la extinción y el índice de modulación es $m = 1$ (100%.) El índice de modulación puede medirse también directamente sobre la pantalla de un osciloscopio digital si éste no filtra la componente continua.

Sobre la pantalla del ESA se pueden medir, además de los términos de la distorsión no lineal y el índice de modulación por canal si se conoce la responsividad del detector, la relación portadora/ruido por canal en los extremos eléctricos del sistema determinando así el ruido incorporado por el enlace óptico (figura de ruido por canal.) La ventaja de un LSA frente a un ESA convencional es que trae incorporado un detector calibrado de manera que la pantalla admite, para la comodidad del usuario, dos modos: eléctrico y óptico. El primero correspondería al modo habitual de un ESA con la particularidad de que incluiría además la potencia eléctrica de dc . En este modo se calculan las potencias de los términos de distorsión no lineal y las relaciones portadora/ruido. El modo óptico es adecuado para la medición de la profundidad de modulación óptica por canal ya que muestra en continua la potencia óptica media y el pico de la excursión de la potencia óptica respecto a la potencia óptica media para la frecuencia de modulación de cada canal. En este modo de funcionamiento (Fig. 7b), el índice de modulación se estima de manera inmediata por cociente entre los valores de potencia mostrados a la frecuencia del canal y en continua. Cuando la excursión de la potencia óptica de un canal desciende a la mitad, en este modo observaríamos que el "pincho" correspondiente baja 3dBs. Sin embargo, en el modo eléctrico, observaríamos que desciende 6dBs ya que aunque la potencia óptica es proporcional a la fotocorriente, la potencia eléctrica es proporcional al cuadrado de la fotocorriente. Normalmente en el display de un LSA se suele especificar si la medida está en "dB eléctricos" o "dB ópticos" para evitar confusiones acerca del modo de funcionamiento del instrumento.

4. Instrumentación para caracterizar fibra óptica

Dos son los parámetros fundamentales que caracterizan la fibra monomodo que empleamos habitualmente en los enlaces ópticos de telecomunicaciones: la dispersión cromática y la atenuación.

4.1. Medida de la dispersión cromática de la fibra monomodo

La medida de la dispersión cromática de la fibra monomodo consiste en determinar cómo varía el retardo de propagación de una señal óptica por un tramo de dicha fibra cuando cambia la longitud de onda central de la señal. Existen distintas técnicas para efectuar esta medida: algunas son directamente en el dominio del tiempo y consisten, por ejemplo, en inyectar un pulso estrecho en longitud de onda y observar su retardo de propagación conforme la longitud de onda central del pulso varía; otras son interferométricas y resultan útiles cuando el tramo de fibra que se pretende caracterizar es corto; y otras están basadas en el fenómeno de la *supresión de portadora eléctrica* y hacen uso del *analizador de componentes ópticos* que introduciremos más adelante (este tipo de medida de la dispersión cromática será descrito con detalle en el tema dedicado a la instrumentación asociada a la modulación analógica en este curso.)

Una de las técnicas más habituales de medición de la dispersión cromática emplea, como en la Fig. 8, un láser sintonizable en longitud de onda de anchura de línea muy estrecha. Se modula su intensidad utilizando un modulador externo a cuyos electrodos conectamos una señal sinusoidal. Cuando en recepción se detecta la señal óptica se obtiene una corriente eléctrica sinusoidal cuyo desfase con respecto a la señal eléctrica modulante depende de la longitud de onda del láser. El desfase relativo que sufre la

señal eléctrica en recepción cuando el láser se sintoniza primero a una longitud de onda y luego a otra longitud de onda indica el retardo de grupo relativo entre esas dos longitudes de onda. La derivada del retardo de grupo con respecto a la longitud de onda es la dispersión cromática de la fibra monomodo.

La dispersión de la fibra monomodo limita la velocidad de transmisión máxima en enlaces digitales por el efecto de la interferencia entre símbolos en recepción y se han desarrollado numerosas técnicas para combatirla: redes de difracción Bragg con acoplo resonante distribuido, fibras especiales de dispersión desplazada que hacen coincidir el mínimo de atenuación con el mínimo de dispersión, fibras especiales de dispersión negativa que combinadas con las fibras estándar de dispersión positiva cancelarían globalmente el ISI en el receptor, entre muchas otras.

Aunque la fibra de dispersión desplazada (DSF, *Dispersion-Shifted Fiber*) parecería la solución mágica al problema de la dispersión cromática, hay que tener en cuenta que en un sistema WDM algunos efectos no lineales en la fibra se cancelan parcialmente si existe un cierto nivel de dispersión cromática. Para las aplicaciones de WDM se inventaron unas fibras especiales con un nivel de dispersión cromática bajo, pero no nulo, en tercera ventana.

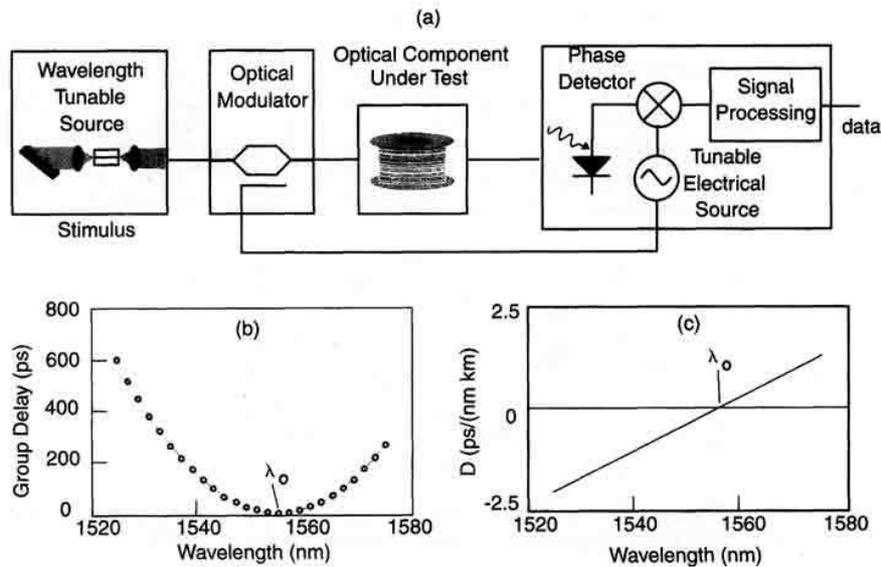


Fig. 8. (a) Montaje para la medida de la dispersión cromática de una fibra óptica monomodo, (b) retardo de grupo relativo típico, (c) dispersión cromática típica

4.2. Medida de la atenuación de la fibra monomodo

La técnica tradicional de medida de la atenuación de un carrete de fibra de longitud no conocida es el método del corte atrás (*cut-back*.) Se conecta una fuente de luz en la entrada del carrete y se mide la potencia óptica en el otro extremo (P_1 .) Desde el extremo receptor se mide hacia la fuente un tramo de longitud conocida (L) y se corta. Se vuelve a medir la potencia óptica en la salida del carrete (P_2 .) La atenuación del carrete de fibra se estima entonces como $(P_2 - P_1)/L$ en dB/Km. La técnica es precisa pero es destructiva y tras la medida el carrete mide L metros menos.

Cuando una señal óptica es inyectada en una fibra óptica, continuamente se refleja una pequeña parte de la potencia a través del fenómeno de la *dispersión espacial de Rayleigh*. En cada punto de la fibra una pequeña fracción de la potencia óptica es dispersada en todas las direcciones del espacio por las irregularidades en la estructura de la fibra.

Existe una contribución de potencia óptica procedente de dicha dispersión espacial que se acopla en la fibra y se propaga en sentido contrario a la señal: la potencia del *backscattering* de la fibra.

Supongamos que un pulso óptico de duración limitada es inyectado en la fibra y que pudiéramos medir la potencia óptica reflejada (deberíamos separar la potencia inyectada de la reflejada a través de un acoplador como en la Fig. 9.) Podríamos medir la potencia reflejada en función del tiempo o, lo que es lo mismo, en función de la distancia a través de la velocidad de grupo. La atenuación de la fibra se estimaría entonces como la variación de la potencia de *backscattering* entre dos puntos de la fibra.

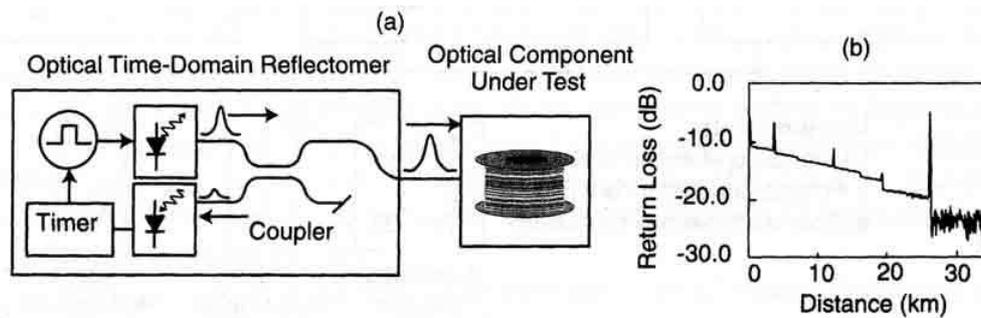


Fig. 9. (a) Esquema del funcionamiento de un OTDR, (b) traza típica en la pantalla de un OTDR

Este método se conoce como reflectometría en el dominio del tiempo y el instrumento que describimos es el reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR, *Optical Time-Domain Reflectometer*.) Pero un OTDR no sólo es capaz de medir la atenuación de una fibra óptica y las posibles variaciones de dicho parámetro a lo largo del carrete, sino que también permite localizar espacialmente y medir las pérdidas de inserción de los componentes intermedios del enlace (un empalme por fusión, por ejemplo) como variaciones de la potencia de *backscattering*, así como la reflectividad de conectores, empalmes mecánicos, grietas, etc. En la Fig. 9b se observa la traza típica en la pantalla del OTDR donde los trozos rectos se corresponden con tramos de fibra (las pendientes son la atenuación de la fibra en dichos tramos), los escalones descendentes en la traza son variaciones del *backscattering* por pérdidas de inserción (en el empalme por fusión de antes, por ejemplo), y los picos corresponden a eventos reflexivos como un conector o una grieta.

5. Instrumentación para caracterizar fuentes de luz

No es objeto de este documento describir la enorme variedad de fuentes de luz que existen en el mercado. Sus características y precios son muy diferentes. Dada una aplicación de fibra concreta, será más ventajoso desde el punto de vista *prestaciones vs. coste* una u otra. Todas ellas, eso sí, vienen definidas por una serie de parámetros como son la potencia óptica emitida, la longitud de onda o el espectro de emisión. En este apartado repasaremos los instrumentos y las técnicas necesarias para caracterizar los parámetros fundamentales de una fuente de luz genérica.

5.1. Potencia óptica emitida

La potencia óptica emitida por una fuente de luz (y por tanto su curva característica *potencia óptica vs. corriente*) se mide usando un conversor O/E calibrado (Fig. 10).

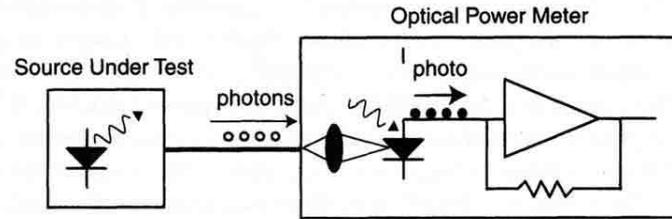


Fig. 10. Medición de la potencia óptica emitida por una fuente de luz

El fotodetector empleado en un medidor de potencia óptica como el de la Fig. 10 tiene una responsividad (en amperios/vatio, A/W) que debe ser independiente de la longitud de onda de la luz incidente. En las bandas típicas empleadas en enlaces de telecomunicaciones por fibra óptica esto no supone un problema mayor. La máxima potencia óptica que se puede medir viene determinada por el límite de saturación del fotodetector que hace que su responsividad decrezca (no obstante se pueden medir potencias ópticas arbitrariamente grandes utilizando atenuadores ópticos calibrados antes del medidor de potencia.) La mínima potencia óptica que se puede medir viene determinada por la corriente de oscuridad del fotodetector.

El medidor de potencia óptica debería ser insensible al estado de polarización de la luz a la entrada. Asimismo las pérdidas de retorno deberían ser muy grandes, ya que si la potencia reflejada por el medidor de potencia a la fuente de luz es grande podríamos alterar su espectro o su potencia de emisión.

5.2. Espectro de emisión

Otra característica fundamental de una fuente de luz es su espectro de emisión. El instrumento empleado para medir el contenido espectral de la señal emitida por una fuente es el analizador de espectros óptico u OSA. Los OSAs habitualmente utilizados en aplicaciones de fibra óptica están basados en una red de difracción espacial, que actúa de monocromador, y un medidor de potencia, como en la Fig. 11.

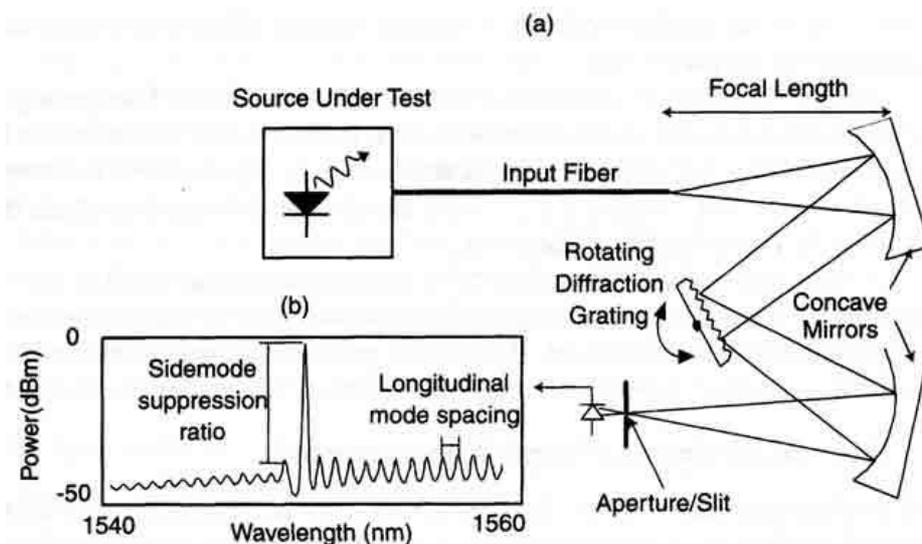


Fig. 11. (a) Esquema genérico de un OSA basado en una red de difracción espacial, (b) espectro típico de emisión de un láser DFB

La luz de la fuente entra en el OSA a través de una fibra monomodo, el haz se colima por medio de un sistema óptico y la onda plana incide sobre la red de difracción. En función de la posición de la red, sobre la apertura de salida se focaliza una u otra longitud de onda ya que la red difracta en ángulos distintos las distintas longitudes de onda. La resolución de este esquema de filtro óptico pasobanda o monocromador depende del tamaño de la red de difracción (mayor resolución cuanto mayor sea la red) y de la calidad de los sistemas ópticos de colimación y enfoque. La red va variando continuamente su inclinación con respecto a la luz colimada de entrada de modo que el monocromador se va sintonizando a todas las longitudes de onda entre una mínima y una máxima que definen el *span* de la medida. La potencia óptica en cada longitud de onda se mide utilizando un fotodetector.

La forma del filtro del monocromador del OSA (anchura y rango dinámico) es su parámetro fundamental junto con su sensibilidad (la mínima potencia óptica que puede medir y que viene determinada por el ruido de la circuitería eléctrica asociada al fotodetector.) Existen modificaciones al esquema genérico de la Fig. 11 que consiguen aumentar la resolución sin aumentar el tamaño del OSA que sería lo más evidente. Aún así la mínima resolución de los OSAs habituales en los laboratorios de comunicaciones ópticas está entre 0.01 y 0.1nm que es insuficiente para caracterizar la anchura de línea de los láseres DFB por ejemplo o su espectro de modulación utilizando una señal de microondas.

También existen esquemas de monocromadores basados en filtros *Fabry-Perot* que pueden ofrecer una resolución muy elevada. Sin embargo, la característica de un filtro *Fabry-Perot* es periódica y por tanto a la salida del monocromador son necesarios nuevos filtros pasobanda.

Un OSA no sólo es válido para observar cómo emite una fuente, sino en general para inspeccionar el espectro de la señal óptica en cualquier punto de la red (por ejemplo en sistemas WDM son obligatorios.) Combinados con fuentes de luz blanca permiten estimar las pérdidas de inserción de componentes pasivos mediante una medición del tipo estímulo-respuesta. Son utilizados asimismo para medir la ganancia y la figura de ruido de los amplificadores ópticos. Por su versatilidad, dedicaremos un tema específico a los OSAs en este curso.

5.3. Longitud de onda central de emisión

Aunque la longitud de onda central de emisión de una fuente de luz puede observarse en su espectro de emisión con el OSA, en determinadas ocasiones se requiere una determinación muy precisa de dicha longitud de onda. Por ejemplo, en sistemas WDM la medida de las longitudes de onda centrales de los láseres debe hacerse con una precisión por debajo de 0.01nm, y la precisión aumenta a 0.001nm en estudios de envejecimiento de dichos láseres o variaciones frente a la temperatura. En tales casos, la resolución ofrecida por los OSAs habituales no es suficiente.

En tales casos se recurre a técnicas interferométricas como las del interferómetro de *Michelson* de la Fig. 12. La luz de la fuente se divide entre los dos brazos del interferómetro. Uno de tales brazos tiene una longitud fija y el otro tiene una longitud ajustable por medio de un espejo móvil. Al variar la posición del espejo, cambia la corriente de fotodetección que oscila entre un máximo y un mínimo debido a interferencias constructivas o destructivas, respectivamente, a esa longitud de onda. La excursión total que debe hacer el espejo para detectar dos picos de corriente consecutivos es media longitud de onda. Se compara dicho valor de excursión con el correspondiente a una fuente de luz de calibración cuya longitud de onda es estable y conocida y de ahí se deduce la longitud de onda de la fuente que se quiere medir.

Dado que tanto para la fuente de calibración como para la fuente que se desea caracterizar las influencias ambientales son iguales, el método es muy preciso.

De hecho, el patrón interferométrico de la corriente de fotodetección se corresponde en general con la autocorrelación de la señal a la entrada, de modo que el espectro total de emisión también puede calcularse haciendo una transformada de *Fourier*. Aunque en principio la resolución podría ser muy elevada ya que estaría limitada tan sólo por la ventana temporal en que se toma la autocorrelación, en la práctica no se puede diseñar un espejo móvil muy preciso y al mismo tiempo con gran distancia entre las posiciones máxima y mínima. El rango dinámico de medida en este espectrómetro tampoco es muy grande ya que la excursión de valores de potencia óptica en el fotodetector es muy elevada (ruido *shot*.)

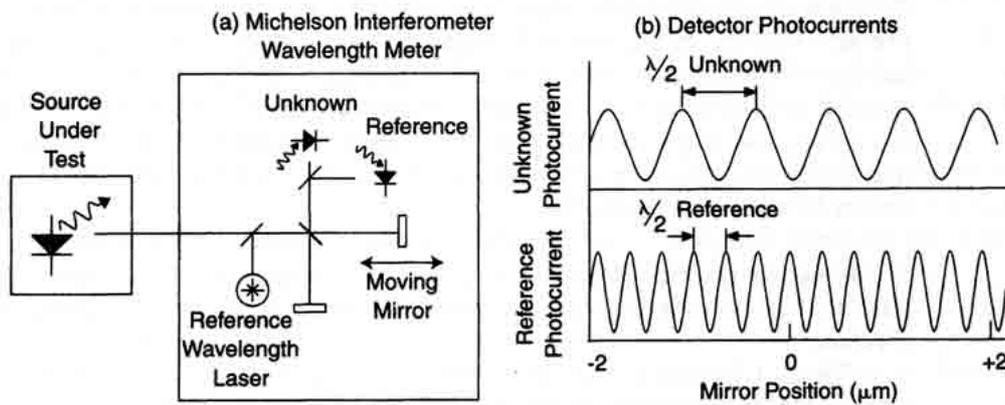


Fig. 12. (a) Interferómetro de Michelson para la medición de la longitud de onda central de emisión de una fuente de luz, (b) corrientes de fotodetección a la longitud de onda de medida y de referencia

5.4. Anchura de línea de la fuente

Ni el interferómetro de *Michelson* de la Fig. 12 ni el OSA de la Fig. 11 proveen entonces de suficiente resolución en longitud de onda para medir por ejemplo la anchura de línea de un DFB o su espectro de emisión cuando se modula con una frecuencia de microondas (con un fotodetector seguido de un analizador de espectros eléctrico, ESA, podríamos determinar el espectro de la señal modulante, pero no el de la señal óptica completa, cuya fase perderíamos en la detección.)

Para medidas de muy alta resolución de espectros ópticos, anchuras de línea de fuentes, *chirp*, etc. se inventaron las técnicas de heterodinado y homodinado ópticas (Fig. 13.)

En el heterodinado, la señal de la fuente (que puede haber sido modulada en intensidad) se mezcla en el fotodetector con la señal de una fuente de luz que actúa como oscilador local óptico. Los campos eléctricos de la señal y el oscilador local se suman y la potencia óptica total incidente (que es el cuadrado del valor absoluto de la suma de dichos campos eléctricos) se detecta (la conversión potencia óptica a corriente es lineal a través de la responsividad del fotodetector.) La clave de la técnica consiste en que matemáticamente se puede demostrar fácilmente que a una frecuencia eléctrica intermedia, que es la diferencia entre las frecuencias de la señal y del oscilador local, se conserva tanto la información de la modulación de la intensidad de la señal como la de la modulación de la fase de la misma. Por tanto, por medio de un ESA podemos ver a

una frecuencia eléctrica intermedia tanto la información de modulación como de anchura de línea de la fuente. Asimismo, como el oscilador local está perfectamente caracterizado, el valor de la frecuencia intermedia eléctrica informa sobre la longitud de onda de emisión de la fuente de señal (Fig. 13b)

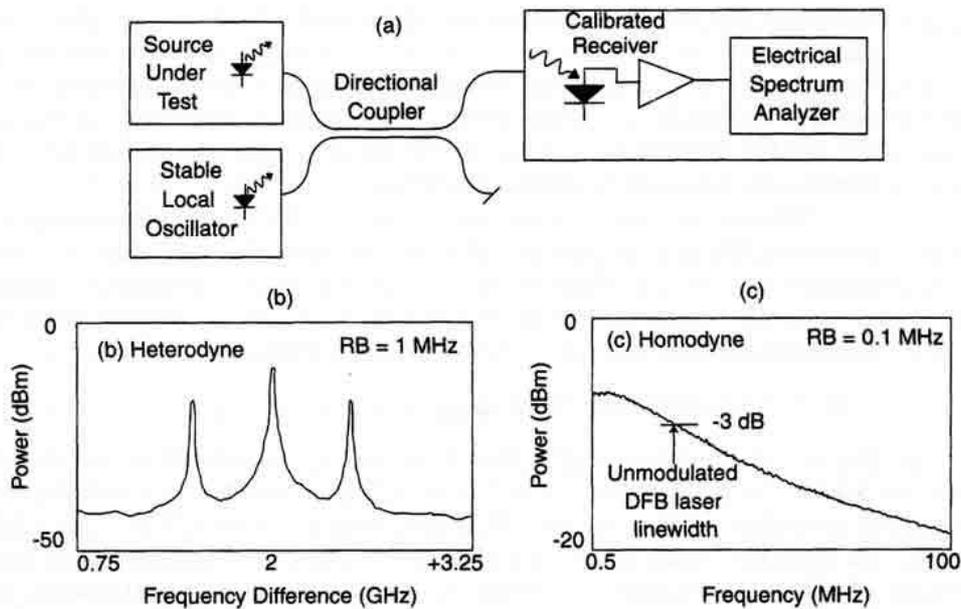


Fig. 13. (a) Esquema de la técnica de heterodinado para medir el espectro óptico de una fuente de luz, (b) espectro óptico de una fuente DFB cuya intensidad ha sido modulada con una señal de 500MHz utilizando heterodinado, (c) anchura de línea de la fuente DFB sin modular utilizando homodinado

El homodinado consiste básicamente en lo mismo, salvo en que la señal del oscilador local es la propia señal retardada en el tiempo. La desventaja es que el espectro eléctrico aparece centrado en 0Hz, se pierde la información de la longitud de onda central de emisión así como de posibles asimetrías en el espectro (Fig. 13c.)

5.5. Estado de polarización de la luz de la fuente

La polarización es la orientación del campo eléctrico de la onda de luz. Una fuente láser emite prácticamente toda su potencia linealmente polarizada, es decir, con el campo eléctrico orientado en una dirección fija. Un diodo LED es un ejemplo de fuente de luz no polarizada, es decir, el campo eléctrico no tiene una orientación preferida.

La importancia de la polarización de la luz emitida por la fuente no sería mayor sino fuera porque el núcleo de la fibra es un material birrefringente, es decir, que el retardo de la señal así como sus pérdidas de propagación dependen de la polarización de la luz a la entrada. Las consecuencias de esta birrefringencia son muchas. Para empezar, aun cuando la dispersión cromática de la fibra estuviera totalmente compensada, el que parte de la potencia óptica tuviera una cierta polarización, y otra parte de la potencia otra polarización distinta haría que en una transmisión digital el pulso de entrada se ensanchara (Fig. 14) limitando la velocidad máxima. Es la denominada dispersión por modo de polarización (PMD, *Polarization Mode Dispersion*.)

La polarización de la luz cambia continuamente a lo largo de la fibra como consecuencia de los desfases relativos que adquiere la parte de la luz que está polarizada de un modo con respecto a la parte de la luz polarizada de un modo

distinto ya que viajan a velocidades diferentes. Si se tiene en cuenta, además, que factores como la "elipticidad" del núcleo de la fibra o la temperatura hacen variar la cantidad de potencia óptica que viaja en un estado u otro de polarización, el resultado global es que la señal a la salida de la fibra tiene una polarización imprevisible (salvo que se empleen fibras especiales mantenedoras de la polarización, PMF, *Polarization-Maintaining Fiber*.)

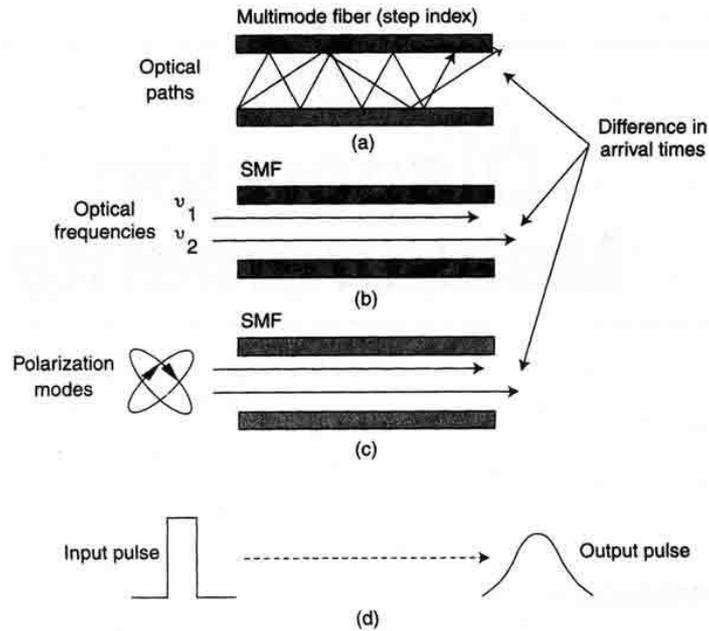


Fig. 14. *Dispersión en la fibra óptica: (a) dispersión intermodal, (b) dispersión intramodal o cromática, (c) dispersión por modo de polarización, (d) ensanchamiento del pulso por dispersión*

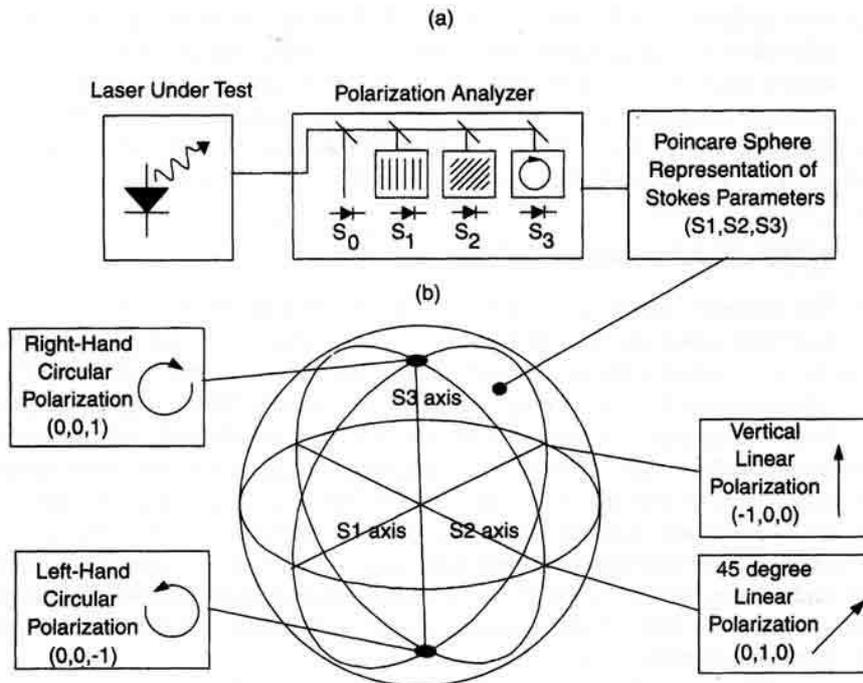


Fig. 15. (a) *Analizador de la polarización de la luz (b) y esfera de Poincaré*

Como se ha dicho, las pérdidas son también dependientes del estado de polarización, por lo que los componentes de fibra tendrán unas pérdidas de inserción que no sólo serán función de la longitud de onda sino también de la polarización de la luz a la entrada. Lo deseable es que en general los componentes sean lo más insensibles que sea posible a la polarización. Esto justifica, en cualquier caso, la necesidad de algún instrumento que sea capaz de medir la polarización de la luz a la salida de la fuente y, en general, en cualquier punto intermedio del enlace.

Un analizador de la polarización de la luz consiste en un instrumento que determina la proporción de luz polarizada verticalmente y horizontalmente, con +45 grados y -45 grados, y polarizada circularmente a derechas y a izquierdas (ver Fig. 15a.) Se calculan así los denominados parámetros de Stokes: S_0 es la potencia óptica total, S_1 es la diferencia de la potencia de luz polarizada verticalmente y horizontalmente, S_2 es la diferencia de la potencia de luz polarizada linealmente con +45 grados y -45 grados, y S_3 es la diferencia de la potencia de luz polarizada circularmente a derechas y a izquierdas. S_1 , S_2 y S_3 están normalizados respecto de la potencia total, S_0 , y por tanto, el vector (S_1, S_2, S_3) puede representarse espacialmente como un punto en la superficie o el interior de una esfera de radio 1. Es la llamada esfera de Poincaré (Fig. 15b.) Los puntos de la superficie de la esfera se corresponden con luz totalmente polarizada y los del interior de la esfera con luz parcialmente polarizada. La distancia del punto al centro de la esfera es el grado de polarización de la luz en tanto por 1. Los láseres tienen un grado de polarización superior a 0.95 (ó 95%.) Los puntos del ecuador de la esfera corresponden con luz linealmente polarizada, y los puntos de los polos de la esfera con luz circularmente polarizada. Los puntos entre el ecuador y los polos corresponden con luz polarizada elípticamente.

6. Instrumentación para caracterizar detectores ópticos

La responsividad de un detector consiste en utilizar una fuente óptica calibrada y un medidor de corriente o tensión eléctrica. Esta es una medida de *dc* o de continua, es decir, la potencia óptica a la entrada del detector se supone constante. Uno de los parámetros fundamentales que comparten en realidad tanto los detectores ópticos como las fuentes de luz es la velocidad máxima de la señal óptica o eléctrica, respectivamente, en su entrada que asegura que la conversión O/E y E/O funciona como es de esperar (a través de la curva característica *potencia óptica vs. corriente* para la fuente, o a través de la responsividad para el detector). Es el llamado ancho de banda de modulación que se mide utilizando el analizador de componentes ópticos de la Fig. 16.

El corazón de un analizador de componentes ópticos es un analizador vectorial de redes eléctrico. El analizador vectorial de redes eléctrico introduce una pequeña señal eléctrica sinusoidal en un sistema óptico y compara la señal eléctrica detectada con la inyectada, y deduce el parámetro de transmisión en módulo y en fase. De este modo, se puede obtener la respuesta de modulación en función de la frecuencia tanto en magnitud como en retardo de grupo para fuentes y receptores utilizando receptores y fuentes, respectivamente, debidamente calibrados.

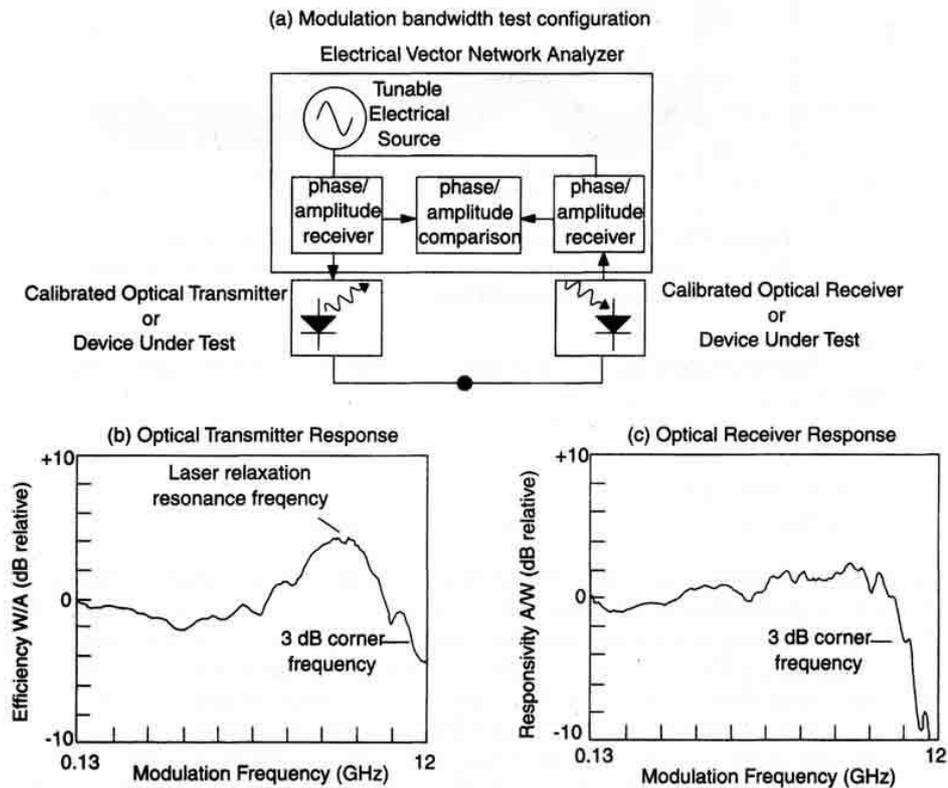


Fig. 16. (a) Analizador de componentes ópticos: mide la eficiencia de la conversión E/O ó O/E como función de la frecuencia de modulación, (b) respuesta de modulación típica de un láser, (c) respuesta de modulación típica de un receptor

7. Instrumentación para caracterizar componentes con múltiples puertos ópticos

En los enlaces de fibra óptica existen una gran variedad de dispositivos con dos o más puertos ópticos. Son los acopladores, multiplexores, atenuadores, amplificadores, etc. Se suele distinguir entre los dispositivos pasivos y los amplificadores, fundamentalmente. Los primeros quedan caracterizados con algún tipo de montaje que sea capaz de medir las pérdidas de inserción entre dos puertos dados del dispositivo en función de la longitud de onda. Los amplificadores quedan caracterizados a través de la ganancia y la figura de ruido en función de la longitud de onda, y habitualmente se emplea un OSA por lo que dejaremos la discusión de la caracterización de amplificadores para el tema del análisis espectral óptico. Otra medida habitual tanto en componentes pasivos como activos son las pérdidas de retorno ya que la estabilidad de la longitud de onda y potencia de emisión de los láseres depende de que la luz que se refleja hacia ellos no sea muy intensa.

7.1. Pérdidas de inserción en componentes pasivos

Las pérdidas de inserción en un componente pasivo son la atenuación de la potencia óptica entre la entrada y la salida del dispositivo o, en general, entre dos puertos dados del mismo, y son función de la longitud de onda.

Para su medición se necesita una fuente de luz que ilumine la entrada del componente como por ejemplo una fuente de luz blanca que emite en un rango de longitudes de

onda muy amplio. La medición del espectro de la luz a la salida del componente con un OSA da directamente la curva de las pérdidas de inserción si la densidad espectral de potencia de la fuente de luz blanca es plana. Si no, habrá que calibrar previamente el OSA con el espectro de dicha fuente de luz (configuración estímulo-respuesta.)

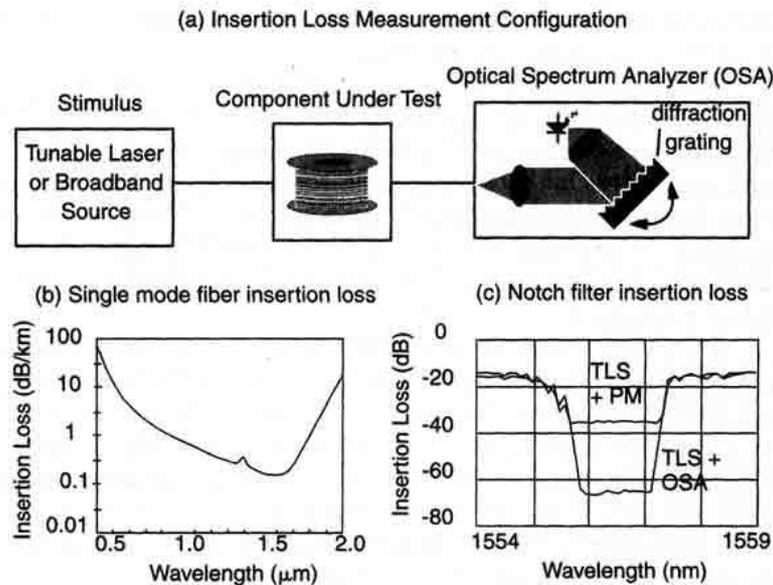


Fig. 17. (a) Medición de las pérdidas de inserción de un componente óptico pasivo empleando una fuente de luz blanca o un láser sintonizable y un OSA, (b) pérdidas de inserción de la fibra monomodo estándar, (c) pérdidas de inserción de un filtro notch utilizando un láser sintonizable y un OSA o un medidor de potencia

Algunos modelos de OSAs traen incorporada una fuente de luz blanca que emite en todo el rango de medida posible del OSA. El inconveniente principal cuando se usa una fuente de luz blanca es que la densidad espectral de potencia no puede ser, lógicamente, muy elevada por lo que las medidas que requieran un gran rango dinámico pueden no ser factibles. Una alternativa es utilizar un láser sintonizable, es decir, un láser con longitud de onda central ajustable. En tal caso la densidad espectral de potencia es mucho mayor. En realidad, si se emplea un láser sintonizable, no sería necesario un OSA sino simplemente un medidor de potencia. La desventaja de la combinación *láser sintonizable + medidor de potencia* frente a *láser sintonizable + OSA* es que el monocromador del OSA filtra parte del ruido del láser por lo que el rango dinámico de la medida puede ser mucho mayor (Fig. 17.)

Las pérdidas de inserción del componente pueden variar según el estado de polarización de la luz a la entrada del mismo. En tal caso, habría que caracterizar estas pérdidas no sólo como función de la longitud de onda sino también como función de dicho estado de polarización intercalando un sintetizador de polarización como en la Fig. 18.

Si varios componentes están en cascada las pérdidas globales de inserción se sumarían. Resulta muy ventajoso definir una función de transferencia de polarización de cada componente de manera que conociendo el modo de polarización de la luz en un punto cualquiera del enlace podamos inmediatamente saber el estado de polarización en la entrada de cualquiera de estos componentes. Esa función de transferencia de polarización es la matriz de transferencia de Jones, que es de valores complejos y de tamaño 2×2 , y que relaciona los vectores de Jones de polarización de la luz a la entrada y a la salida del componente. Los valores del vector de Jones representan la amplitud y la fase de las componentes horizontal y vertical del campo eléctrico. Una matriz de

transferencia alternativa que también suele usarse es la de *Müller*. Se trata en este caso de una matriz 4x4 de valores reales que relaciona los parámetros de *Stokes* a la entrada y a la salida del componente. Los parámetros de *Stokes* tienen la ventaja respecto a los vectores de *Jones* que la medición es inmediata (consiste en medir potencias ópticas) y que caracterizan tanto la parte polarizada como la no polarizada de la luz.

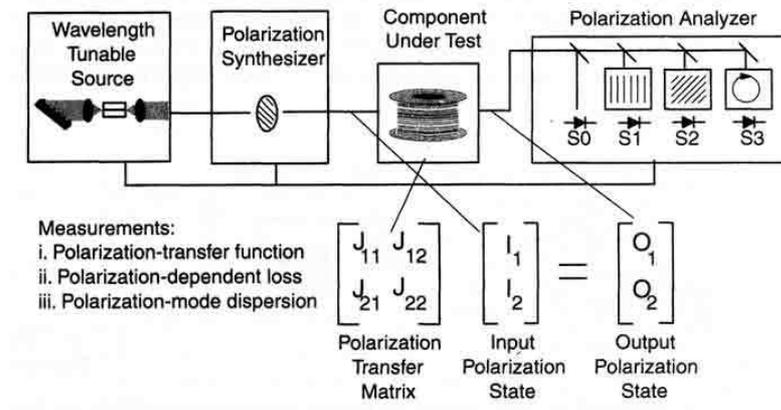


Fig. 18. Medición de las pérdidas de inserción de un componente pasivo teniendo en cuenta la polarización de la luz a la entrada del mismo

7.2. Pérdidas de retorno

Las pérdidas de retorno tanto de los componentes activos como pasivos de un enlace son muy importantes principalmente para la estabilidad de las fuentes de luz en sistemas reales, y deben ser lo más grandes que sea posible.

En la Fig. 19 se representa el montaje necesario para medir las pérdidas de retorno de un componente genérico. Se necesita un láser sintonizable y un medidor de potencia así como un acoplador que separe la luz incidente de la reflejada.

En ocasiones, las pérdidas de retorno no son suficientes y sería deseable poder observar dentro del dispositivo dónde se producen las reflexiones más grandes. En este caso se emplea una variante de OTDR con precisión micrométrica y en configuración normalmente interferométrica como en la Fig. 20.

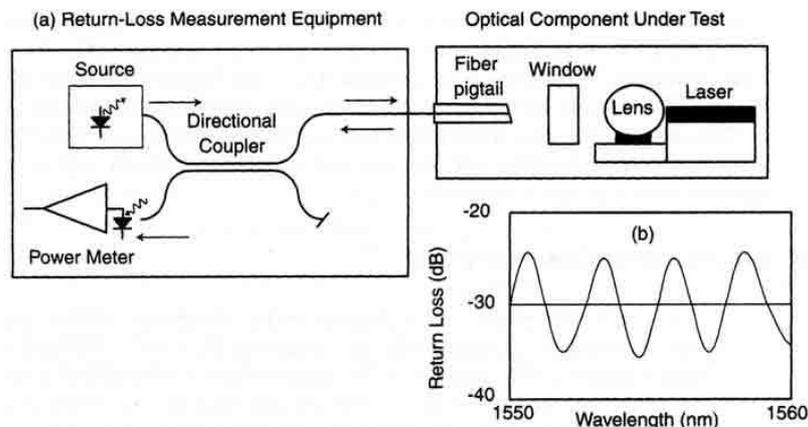


Fig. 19. Medida de las pérdidas de retorno de un componente óptico

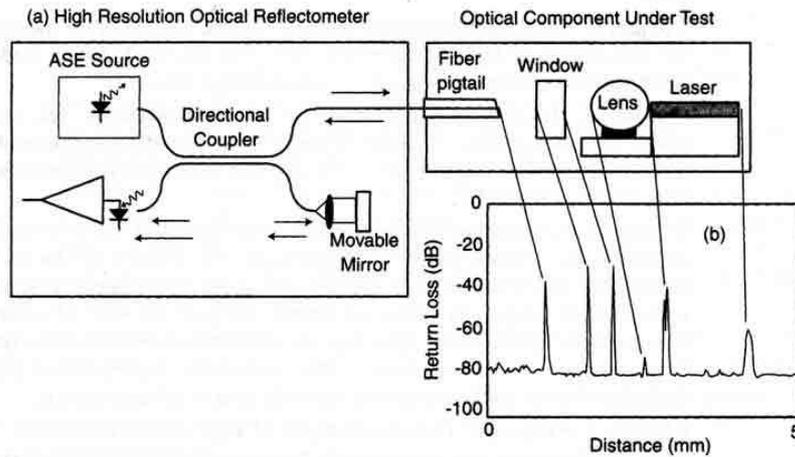


Fig. 20. Reflectometría óptica de alta resolución para observar las reflexiones que se producen en el interior de los componentes ópticos discretos

8. Otras fuentes de información

El libro más recomendable sobre técnicas e instrumentos de medición para componentes y enlaces de fibra óptica es *Fiber Optic Test and Measurement*, Dennis Derickson, Prentice Hall PTR, 1998, ISBN: 0-13-534330-5, de donde está recogida gran parte de la información y figuras de estos apuntes.