

DWDM: SISTEMAS DE INSTALACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO

ISABEL CRISTINA PÉREZ BLANCO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2004

DWDM: SISTEMAS DE INSTALACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO

ISABEL CRISTINA PÉREZ BLANCO

Monografía para optar al título de
Especialista en Telecomunicaciones

Director

OSCAR GUALDRÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES

ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2004

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PARÁMETROS CRÍTICOS DE LA TECNOLOGÍA DWDM	2
1.1 MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES	2
1.1.1 La Banda del Canal	2
1.1.2 Efectos Dependientes de la Polarización	5
1.1.3 Pérdidas por inserción (IL)	6
1.1.4 Directividad	7
1.1.5 Pérdidas ópticas por retorno (ORL)	7
1.2 FIBRA ÓPTICA	8
1.2.1 Dispersión Cromática	8
1.2.2 Dispersión por Modo de Polarización	10
1.2.3 Dispersión por Modo de Polarización de segundo Orden	11
1.2.4 No Linealidad	11
1.3 AMPLIFICADORES ÓPTICOS	16
1.3.1 Emisión Espontánea Amplificada	19
1.3.2 Figura de Ruido	19
1.3.3 Ruido por Interferencia Multicamino	21
1.4 TRANSMISORES	21
1.4.1 Transmisores ópticos	22
1.4.2 Módulos transmisores	23
1.5 RECEPTORES	23
1.6 COMPENSADORES DE DISPERSIÓN	24
1.7 SWITCHES	24
1.8 ATENUADORES	25
1.9 AISLADORES	25
2. COMPONENTES DE PRUEBA Y CERTIFICACIÓN	27
2.1 PRUEBAS PARA FUENTES ÓPTICAS	28
	29
2.2 PRUEBA PARA RECEPTORES	
2.2.1 Medidas de potencia	29
2.2.2 Analizador de espectros ópticos	30
2.2.3 Medidores de longitud de onda	31

2.3	COMPONENTES TÍPICOS EN PRUEBAS COMBINADAS	32
2.3.1	Multiplexores y demultiplexores	32
2.3.2	Switches	39
2.3.3	Fuentes ópticas	39
2.3.4	Receptores	40
2.3.5	Amplificadores de fibra óptica	41
2.3.6	Rejillas de Bragg	48
2.3.7	Aisladores	49
2.3.8	Fibra	50
2.4	SISTEMAS DE PRUEBA AUTOMATIZADOS PARA PROBAR COMPONENTES	56
2.5	CALIFICACIÓN AMBIENTAL	58
2.6	PRUEBA DE CAMPO	59
2.6.1	Grupo de Prueba de Pérdidas Ópticas	59
2.6.2	Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo	60
2.6.3	Medidor de Reflexión	61
2.6.4	Prueba PMD	61
3.	SISTEMA DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO	63
3.1	PARÁMETROS CRÍTICOS DE LOS SISTEMAS	63
3.1.1	Tasa de Error de Bit (BER)	64
3.1.2	Prueba de Pérdidas	66
3.1.3	Pérdidas Ópticas por Retorno	66
3.1.4	Relación Señal a Ruido Óptico	67
3.1.5	La Ganancia	68
3.1.6	Longitud de Onda Central	69
3.1.7	Variaciones Indeseadas (drift)	69
3.1.8	Diafonía (Crosstalk)	70
3.1.9	Efectos No Lineales	70
3.1.10	Mezcla de Cuatro Ondas	70
3.1.11	Dispersión por Modo de Polarización	71
3.1.12	Dispersión Cromática	71
3.1.13	Otros Fenómenos	72
3.2	INSTALACIÓN Y PRECOMMISSIONING	72
3.2.1	Compatibilidad de la Red	73
3.2.2	Commissioning	74
3.2.3	Mantenimiento y Monitoreo	74
3.2.4	Operabilidad Entre Vendedores (Inter-Vendor)	75
3.2.5	Arquitectura de las Interconexiones	75

3.3 COMMISSIONING	76
3.3.1 Transmisores	76
3.3.2 Receptores	77
3.3.3 Amplificadores Ópticos	77
3.3.4 Multiplexores Y Demultiplexores	78
3.3.5 Prueba de Nivel del Sistema	81
3.3.6 Proceso de Alarma	83
3.4 MANTENIMIENTO	84
3.4.1 Relación Señal a Ruido Óptico	84
3.4.2 Pérdidas	84
3.4.3 Dispersión por Modo de Polarización	85
3.4.4 Dispersión Cromática	85
3.4.5 La Ganancia Óptica	85
3.4.6 Longitud de Onda	86
3.4.7 Diafonía	86
3.5 MONITOREO	86
3.5.1 Canal Óptico de Supervisión	87
3.5.2 Sistema Remoto de Prueba de la Fibra	88
CONCLUSIONES	91
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	93
BIBLIOGRAFÍA	96

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

	Pág.
Figura 1.01 Longitudes de onda multiplexadas	2
Figura 1.02 Ilustración de señales indeseables de fuga	7
Figura 1.03 Dispersión cromática contra longitud de onda	9
Figura 1.04 Componentes de dispersión de los materiales y guías de onda	9
Figura 1.05 PMD en una fibra monomodo	10
Figura 1.06 La PMD es afectada por la tensión física, la temperatura y las imperfecciones de la fibra	10
Figura 1.07 La no linealidad se presenta a niveles altos de potencia	12
Figura 1.08 La mezcla de cuatro ondas	15
Figura 1.09 Posibles configuraciones para la implementación de un EDFA	16
Figura 2.01 Prueba usando fuentes perfectas	27
Figura 2.02 Región espectral de emisión y rango dinámico de diferentes tipos de fuentes	29
Figura 2.03 Esquema de bloques típico de una OSA	30
Figura 2.04 Representación esquemática de los monocromadores ópticos	30
Figura 2.05 El OSA localizado después del mux caracteriza el dispositivo	32
Figura 2.06 La fuente ASE dispara a través del mux mientras el OSA recibe la señal para cada puerto de salida	33
Figura 2.07 Un controlador polarizado se agrega para medir PDL	34
Figura 2.08 La diafonía puede ser medida usando a) Un láser sintonizable con un OSA b) Un láser sintonizable con medidores de potencia	36
Figura 2.09 Medidas de ORL dependientes de la longitud de onda	36
Figura 2.10 Este sistema provee las características de ancho de banda, usando una fuente ASE y un OSA	37
Figura 2.11 Medidas de ancho de banda con una fuente sintonizable y un medidor de potencia	37
Figura 2.12 Sistema de prueba automatizado que mide PDL, pérdidas por inserción y ORL	38
Figura 2.13 El medidor de potencia de alta velocidad hace posible probar los switches actuales	39
Figura 2.14 Caracterización de la fuente láser	40
Figura 2.15 Sistema automatizado usado para caracterizar la sensibilidad del receptor y el tiempo de detección	41
Figura 2.16 Dos sistemas diferentes para medir ORL	42

Figura 2.17	Las medidas del OSA en la redistribución de la ganancia espectral del EDFA como una función de las señales de entrada atenuadas	43
Figura 2.18	El medidor de potencia de alta velocidad detecta la luz reflejada de regreso al EDFA	44
Figura 2.19	Método de substracción RIN para la determinación de la figura de ruido del EDFA	46
Figura 2.20	Medida de RIN típica de un EDFA	46
Figura 2.21	Sistema usado para medir PMD	47
Figura 2.22	Medidas de la polarización dependiente de la longitud de onda dependiente de la ganancia del EDFA	48
Figura 2.23	El switch 2x2 permite pruebas de forma bidireccional	48
Figura 2.24	Sistema típico usado para medidas de reflectividad en rejillas Bragg	49
Figura 2.25	Sistema para medidas de PDL de un aislador	49
Figura 2.26	Medidas PMD de un aislador	50
Figura 2.27	Las PDL son medidas como una función de la longitud de onda	50
Figura 2.28	Sistema de medida típico para la dispersión cromática	51
Figura 2.29	Sistema para escanear la longitud de onda	52
Figura 2.30	Medidas de PMD usando una señal polarizada y el interferómetro	53
Figura 2.31	Esquema de bloques de un OTDR	60
Figura 3.01	Enlace típico punto a punto desde la fuente al usuario	63
Figura 3.02	Sistema BER usando un generador patrón tradicional	63
Figura 3.03	El medidor de potencia provee niveles de potencia fuente con gran precisión	75
Figura 3.04	El probador BER (BERT) provee la sensibilidad límite del receptor	76
Figura 3.05	El láser sintonizable realiza un barrido sobre el ancho de banda del EDFA	76
Figura 3.06	Ancho de banda medido con un OSA	77
Figura 3.07	Probando el BER en un solo rack WDM con un atenuador para simular las pérdidas del enlace	77
Figura 3.08	El medidor de potencia provee la uniformidad de la potencia de todos los puertos de salida	78
Figura 3.09	Las pérdidas por inserción se miden usando	78
	a) Un OSA al nivel del mux	
	b) Un medidor de potencia al nivel del demux	
Figura 3.10	Las longitudes de onda centrales de los canales son medidas usando:	79
	a) Una fuente ASE y un OSA para el demux	
	b) El OSA con el sistema de fuentes para el mux	
Figura 3.11	La Directividad del mux se analiza con el OSA	79
Figura 3.12	El OSA se usa en cualquier punto a lo largo del enlace	

	para caracterizar el sistema	80
Figura 3.13	El OSA es el mejor instrumento para medir OSNR	80
Figura 3.14	Un analizador de protocolo muestra el rendimiento de cada canal sobre un lazo cerrado del enlace óptico	81
Figura 3.15	Utilización completa de un sistema RFTS	86
Tabla 3.01	Presupuesto de Potencia	64

RESUMEN

TITULO: DWDM: SISTEMAS DE INSTALACIÓN, PRUEBAS Y MANTENIMIENTO

AUTOR: PÉREZ BLANCO, Isabel Cristina

PALABRAS CLAVES: Parámetros críticos de la tecnología WDM, Componentes de prueba y certificación en la tecnología DWDM, Calificación ambiental de sistemas DWDM, Prueba de campo para DWDM, Instalación de sistemas DWDM, Mantenimiento de sistemas DWDM, Monitoreo de sistemas DWDM.

DESCRIPCIÓN:

Al llegar una nueva tecnología, el proceso de pasar de la teoría a la experiencia práctica toma un tiempo de adaptación y requiere un trabajo riguroso. Las personas y las compañías que usan esta nueva tecnología generalmente necesitan un periodo de tiempo donde se aprenda y asimile los cambios y las nuevas necesidades. La tecnología WDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda) no es la excepción, en éste momento la industria de las telecomunicaciones y de la fibra óptica están en este proceso de cambios y en la búsqueda de satisfacer necesidades. En la medida que crece la tecnología WDM y siendo implementada crecientemente, más compañías y personas necesitan tener conocimiento sobre las prácticas de instalación, pruebas y mantenimiento de esta tecnología.

Esta es la propuesta que se desarrolla en este trabajo. Éste documento es una ayuda para ingenieros, técnicos e investigadores de la industria de las telecomunicaciones, quienes quieren aprender más acerca de los aspectos prácticos de las tecnologías WDM y específicamente DWDM. Además, los fabricantes, instaladores, proveedores de servicios y operadores de redes privados encontrarán información útil para su toma decisiones y procesos a realizar.

Partiendo de que ya se tienen los conocimientos básicos correspondientes a la tecnología WDM, en el primer capítulo, se exponen los parámetros críticos de WDM para cada uno de los componentes. En el segundo capítulo, se tratan específicamente las necesidades en los procesos de prueba y certificación de los fabricantes de componentes y fibra. El tercer capítulo cubre los sistemas de instalación, mantenimiento y monitoreo de WDM.

ABSTRACT

TITLE: **DWDM: SYSTEM INSTALLATION, TESTING AND MAINTENANCE**

AUTHOR: PÉREZ BLANCO, Isabel Cristina

KEY WORDS: Critical parameters in WDM technology, Component testing and qualification in DWDM technology, Environmental qualification in DWDM systems, Field testing in DWDM systems, System installation in DWDM, Maintenance in DWDM system, Monitoring in DWDM system.

DESCRIPTION:

When a new technology comes along, the process of moving from theory and lab experience to real-world deployment and practice takes time and hard work. The people and companies that use new technology often need to go through a period of learning and assessment to overcome both anticipated and unforeseen challenges. WDM technology is no exception. Right now, the fiber optic and telecommunications industries are in the middle of that period of changing process and reassessing needs. And as WDM grows and becomes more widely implemented, more people and companies that ever need access to practical, yet thorough, information about testing WDM technology.

This is where DWDM: System installation, testing and maintenance comes in. This book is aimed at the engineers, technicians, and scientist throughout the telecommunications industry who want to learn more about the practical aspects of WDM and DWDM technology. In addition, system and component manufacturers, installers, service providers, and private network operators will find useful information to take decisions and to get process.

Starting assuming that the reader knows the basics of WDM technology: what it is, what it does, definitions and concepts: chapter 1 outlines critical WDM parameters according to component, chapter 2 addresses the specific testing and qualification needs of component and fiber manufacturers, and chapter 3 covers the installation, maintenance, and monitoring of WDM systems.

INTRODUCCIÓN

La fibra óptica viene siendo el medio más apropiado para soportar el vasto volumen de tráfico, los requerimientos en cuanto a la velocidad de los datos y al cubrimiento geográfico debidos a la necesidad de transportar alrededor del mundo video, voz y datos además del uso creciente de Internet, han hecho que tecnologías como TDM (Multiplexación por División de Tiempo) sean de gran aplicación hoy día para dividir la capacidad de una sola fibra óptica en varios canales de comunicación. Sin embargo ésta tecnología se ha visto limitada por el incremento en la complejidad de la modulación y el equipo requerido para la multiplexación de la información a grandes velocidades. De ésta manera, las propiedades de la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) han demostrado gran aplicación como complemento de la tecnología existente.

Los sistemas WDM se basan en la habilidad de una fibra óptica de transportar simultáneamente diferentes longitudes de onda de luz sin interferencia mutua. Cada longitud de onda representa un canal óptico dentro de la fibra. Existen muchos métodos ópticos para combinar canales individuales dentro de una fibra y extraerlos en los puntos de la red donde se requiera. La tecnología WDM ha evolucionado al punto que las separaciones entre longitudes de onda del canal pueden ser muy pequeñas, décimas de nanometro, dando lugar a los sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM). Las redes en las cuales una sola fibra transporta más de 100 canales ópticos independientes y de forma bidireccional están disponibles comercialmente.

La llegada de DWDM, como sucede con cualquier tecnología, trae grandes ventajas pero también requiere cambios para los cuales hay que prepararse y capacitarse. La principal ventaja del nuevo sistema DWDM es su confiabilidad y estabilidad. Para garantizar que el sistema DWDM responderá correctamente a las especificaciones y que tendrá un alto rendimiento por largo tiempo, es importante, tener en cuenta, desde la calidad de los parámetros ópticos hasta el comportamiento del sistema integrado.

Aunque la tecnología DWDM hace las redes más eficientes agregando canales y ancho de banda, su aplicación efectiva requiere de cuidado. Algunos factores deben ser considerados y apropiadamente seleccionados en las etapas de planeación, diseño, fabricación e implementación.

Aquí describiremos los parámetros más importantes y los fenómenos a tener en cuenta. Estos parámetros están relacionados con la fibra, los componentes ópticos, los efectos de la no-linealidad, efectos por la dispersión de la fibra y componentes activos en el sistema.

1. PARÁMETROS CRÍTICOS DE LA TECNOLOGÍA DWDM

1.1 MULTIPLEXORES Y DEMULTIPLEXORES

Un multiplexor (mux) es usado para combinar señales de diferentes longitudes de onda en una sola fibra óptica (Figura 1.01). Un acoplador de banda ancha estándar puede ser usado como un multiplexor. Sin embargo, las pérdidas por inserción podrían ser muy altas, aproximadamente 4 dB para sistemas de dos canales, 7 dB para sistemas de cuatro canales, 13 dB para sistemas de 16 canales y así sucesivamente. Por lo tanto, otras técnicas como el filtrado son generalmente usadas para multiplexar las señales de entrada. Un multiplexor de banda estrecha DWDM práctico es un dispositivo que combina múltiples longitudes de onda en una sola fibra con una pérdida de señal tan baja como sea posible.

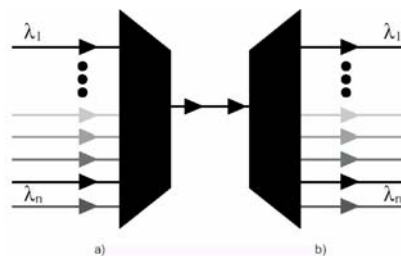


Figura 1.01 Longitudes de onda multiplexadas, todas tienen que ser precisas y lineales

Un demultiplexor (demux) separa una señal con múltiples longitudes de onda en sus componentes individuales. Conceptualmente, es el proceso inverso del multiplexor. De este modo, las tecnologías aplicables para multiplexación también se utilizarán para demultiplexación. Sin embargo un demultiplexor requiere tecnología más compleja. Mientras que se desea que las pérdidas por inserción sean tan bajas como sea posible, es más importante aún el fuerte rechazo entre las longitudes de onda fuera de los canales de señal. Esto, con el objetivo de proveer al receptor final canales con una alta razón de señal a ruido. En la medida, en que el espacio entre canales se hace más pequeño, adquiere mayor importancia la selectividad en las longitudes de onda.

1.1.1 La Banda del Canal

El rendimiento de un mux/demux depende de su capacidad para aislar los canales entrantes o salientes. La banda de cada canal es caracterizada por los siguientes parámetros:

- **La longitud de onda central del canal**

La longitud de onda central medida es frecuentemente usada para caracterizar un filtro o un canal multiplexor/demultiplexor. La longitud de onda central significa la longitud de onda media entre las longitudes de onda mayor y menor $[(\lambda_{upper} + \lambda_{lower})/2]$. Ésta no es necesariamente la longitud de onda para transmisión máxima.

El parámetro de longitud de onda central es más significativo para filtros, los cuales tienen sus formas simétricas o casi simétricas en el espectro. Generalmente, la longitud de onda central está definida como el punto medio entre las longitudes de onda correspondientes a la caída de 3 dB a cada lado del pico de transmisión. Para una distribución perfectamente simétrica, la longitud de onda central sería la misma longitud de onda del pico de transmisión, pero esto sucede en casos muy raros. De hecho, leves diferencias en la forma de la curva de transmisión pueden producir cambios significativos en la longitud de onda central.

- **Espacio entre canales**

En sistemas de redes existentes, se usan tanto canales espaciados uniformemente como los espaciados no uniformemente. Los canales espaciados uniformemente están generalmente definidos de acuerdo con la norma ITU, espaciada a intervalos de 100 GHz.

El espaciado no uniforme entre canales se usa para minimizar y predecir efectos no-lineales como la mezcla de cuatro ondas (four-wave mixing).. La mezcla de cuatro ondas surge cuando interactúan dos o más longitudes de onda para generar nuevas longitudes de onda. Con el espaciado uniforme entre canales, estas nuevas longitudes de onda degradan los canales existentes y crean diafonía (crosstalk). Y con un espaciado no uniforme, la mezcla de cuatro ondas causa ruido entre canales.

- **El ancho de banda**

El ancho de banda es la anchura del espectro sobre el cual la transmisión (o la reflectancia en el caso de dispositivos reflectivos como la rejilla de Bragg) excede un valor establecido. No tiene sentido hablar del ancho de banda sin especificar el umbral. El ancho de banda define el rango del espectro sobre el cual el dispositivo puede ser usado efectivamente.

Conocer el ancho de banda en dos o más niveles, indica la forma de los bordes de la banda (los cuales están generalmente relacionados con el orden del filtro). Los valores para atenuaciones muy altas (-20 dB o -30 dB) son útiles para predecir posible diafonía (crosstalk) en canales DWDM adyacentes. El valor del umbral en particular a ser usado depende de la separación requerida en canales adyacentes para una aplicación específica.

El ancho de banda de todos los componentes (y sub-componentes, en el caso de los multiplexores) es crítico al momento de determinar el espaciado entre canales y las características de la fuente láser.

- **Aislamiento y Diafonía (crosstalk)**

En términos generales, el aislamiento del canal y la diafonía describen el rechazo de señales desde una canal adyacente o cualquier otro canal en un dispositivo multicanal. Esta medida tiene en cuenta la característica de la banda de paso de cada canal y normalmente se especifica por debajo de la condición que establece el peor de los casos. El aislamiento y la diafonía tienen interpretaciones levemente diferentes. Mientras el aislamiento de un canal describe el rechazo de la señal desde o hacia otro canal. La diafonía describe la posibilidad de aceptar la interferencia de otros canales en la banda de paso. El aislamiento es el valor mínimo en dBm, al cual el DUT (dispositivo bajo prueba) elimina una señal de salida, mientras la diafonía es la diferencia en dB entre el valor máximo de entrada y el filtrado mínimo (aislamiento).

Además de la medida o estimación de la diafonía en el peor de los casos, en los canales de un sistema WDM, el usuario debe también determinar los niveles de diafonía que pueden ser tolerados. Tradicionalmente, el aislamiento entre canales adyacentes es de 25 dB o mayor.

Sin embargo, a medida que la complejidad de la red crece y más receptores son requeridos para un desempeño confiable con niveles bajos de señal, llegan a ser necesarios mayores niveles de aislamiento. Por la misma razón, el aislamiento entre canales no adyacentes, debe ser cuidadosamente considerado teniendo en cuenta hasta los parámetros insignificantes en el diseño de redes.

- **Rizo en el pico de la gráfica de potencia del canal versus la longitud de onda.**

El rizo en un canal provee al diseño información acerca de las posibles variaciones en la potencia transmitida como cambios en las longitudes de onda transmitidas dentro de la banda de paso nominal. El rizo excesivo es inaceptable en muchas aplicaciones prácticas.

Otro parámetro importante es la pendiente máxima del rizo, el cual establece el cambio en las pérdidas sobre los cambios en la longitud de onda (δ pérdidas / $\delta\lambda$).

- **La Uniformidad del canal**

La uniformidad del canal se refiere al valor de las pérdidas por inserción de canal a canal en un mux/demux.

1.1.2 Efectos Dependientes de la Polarización

De cualquier forma en una red de fibra óptica, el estado de polarización de la energía óptica es esencialmente desconocido. Este depende de la forma geométrica del camino de la fibra, en birefringencia debido a las asimetrías en el medio de transmisión, así también por la variedad de efectos ópticos en los componentes de la red.

Puesto que las características de muchos de los componentes comúnmente usados en las redes de fibra óptica varían en función de los estados de polarización, todas las características del canal como pérdidas por inserción, longitud de onda central y el ancho de banda variaran también con la polarización. Por lo tanto, para garantizar un buen rendimiento, un diseñador debe asignar el peor caso de polarización dependiendo de todos los componentes pasivos en el sistema.

Las pérdidas, el ancho de banda y la frecuencia central son particularmente sensibles al estado de polarización. Cada uno debe ser medido en diferentes estados de polarización usando un controlador de polarización. La variación de los resultados es la dependencia de la polarización del parámetro en cuestión. Idealmente, las medidas deben ser realizadas para todos los estados de polarización, pero una elección al azar usualmente es suficiente. Las siguientes secciones describen las tres medidas principales.

Pérdidas dependientes de la polarización (PDL)

Las PDL determinan la variación en pérdidas sobre el rango de los posibles estados de polarización. Este es obtenido de la relación entre la transmitancia en el mejor estado y el peor estado de polarización y es normalmente expresado en dB.

En general, el valor de las PDL es más bajo en la banda de paso, más alto en la región de transición, y el valor superior se encuentra en la banda de rechazo. La mayoría de los fabricantes de componentes y usuarios encuentran que es

suficiente obtener las medidas de las PDL en el centro del canal y en los límites de la banda de paso. En la mayoría de aplicaciones, se requiere unas medidas de PDL menores a 0.1 dB en estas regiones.

Dispersión por modo de polarización (PMD)

Otro efecto importante es la dispersión por modo de polarización, resulta cuando los dos componentes de polarización de una señal viajan a diferentes velocidades y por lo tanto, se produce un corrimiento de fase a lo largo del enlace de fibra. Este efecto, que es agravado en presencia de PDL y transmisores chirp, pulsos de señal distorsionados, aumenta y afecta la tasa de error en sistemas digitales y pueden introducir serias distorsiones de armónicos en sistemas análogos, tales como redes CATV. Bajo las condiciones que usualmente prevalecen en redes de fibra, las PMD se presentan estadísticamente como la raíz cuadrada de la distancia, en vez de linealmente a lo largo del enlace de fibra. De este modo, aunque las PMD totales son generalmente indicadas en unidades de tiempo, su coeficiente, que es, su valor por unidad de longitud de fibra, debe ser expresado como un retardo por la raíz cuadrada de la unidad de distancia. Sin embargo, para componentes tales como mux/demux, el proceso PMD es determinístico y normalmente solo interesa en el valor total de PMD del dispositivo (o por canal del dispositivo). De este modo, el componente PMD es normalmente especificado simplemente en unidades de tiempo.

1.1.3 Pérdidas por inserción (IL)

Las pérdidas de inserción de un componente es la diferencia entre la potencia entrante y saliente, por ejemplo, $IL (dB) = 10 \log_{10} ((P_{in} - P_{out})/P_{in})$. Esto define la pérdida de potencia en el dispositivo a una longitud de onda específica o sobre una región espectral dada. Para un componente DWDM, Las IL están normalmente definidas dependiendo de la banda de transmisión del dispositivo. Obviamente, las pérdidas por inserción deben ser tan bajas como sea posible. Para definir completamente las IL de un dispositivo DWDM, se requiere de una curva de pérdidas vs longitud de onda.

La medida mas usada de IL es el valor en la longitud de onda donde se presenta la mayor pérdida. Usando este valor, el diseñador puede calcular confiadamente un presupuesto de pérdidas que podrá aplicarse en cualquier longitud de onda de transmisión. De hecho, esta es la forma en que la mayoría de fabricantes de componentes, especifican las pérdidas por inserción del canal.

Este método es aplicable cuando el ancho del canal es conocido, pero existen algunos componentes deseados para aplicaciones generales donde las condiciones de operación exactas no pueden ser determinadas por adelantado.

En algunas situaciones la mejor forma para describir las IL del dispositivo es calcular la longitud de onda central del pasabanda y determinar las IL en esa longitud de onda. Este método es frecuentemente usado para caracterizar dispositivos monocanal o aquellos con banda de paso simétrica.

Los factores importantes a considerar en una unidad multicanal cuando comparamos los valores de IL para diferentes dispositivos incluyen los efectos de los conectores y la uniformidad de las IL a través de los canales.

1.1.4 Directividad

Algunas veces se hace referencia a la directividad como la causa de la diafonía o crosstalk, es una medida del aislamiento entre los puertos de entrada de un dispositivo de múltiples entradas. Esto es particularmente importante en un multiplexor, donde la potencia de retorno al sistema transmisor debe mantenerse al mínimo.

Los usuarios deben proveer una terminación no reflectora a la salida del dispositivo cuando se realiza la medida de la directividad. Si no se realiza de esta manera, reflexiones en el lado terminal de la fibra pueden degradar la medida.

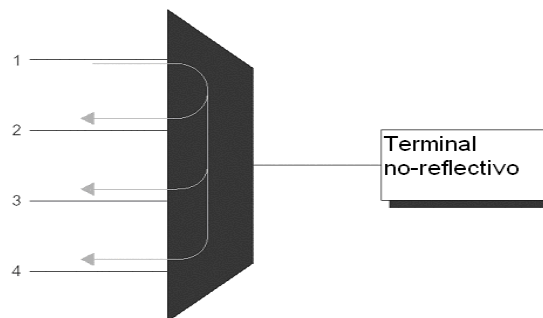


Figura 1.02 Ilustración de señales indeseables de fuga de la entrada 1 hacia las otras entradas

Usualmente, esto es suficiente para realizar las medidas de la directividad únicamente para las longitudes de onda nominales de los canales. Por ejemplo, en la figura 1.02, podemos insertar una señal en el canal 1 a la longitud de onda establecida por el diseño y medir la potencia que retorna por las otras entradas. La diferencia entre la potencia insertada y la que retorna a las otras entradas es la directividad para esa combinación de canales en particular. Las medidas deben ser tomadas para todas las combinaciones de los canales. Esto dificulta la toma de medidas automáticas de la directividad, especialmente en dispositivos de muchos canales.

1.1.5 Pérdidas ópticas por retorno (ORL)

Cuando la luz es inyectada en un componente de fibra óptica, tal como un conector, un multiplexor o la misma fibra, una parte de la energía es transmitida, una parte es absorbida y una parte es reflejada. En los sistemas de fibra óptica, la luz es reflejada por las reflexiones de Rayleigh scattering y Fresnel. Rayleigh scattering ocurre dentro de la misma fibra como un resultado inevitable de la interacción de la energía de la luz transmitida y las moléculas de las que esta hecha la fibra. Por lo tanto, Rayleigh scattering depende de la composición del cristal. También depende de la longitud de onda. La amplitud del Rayleigh scattering es cercana a -75 dB por metro de fibra típica a 1550 nm, y sus efectos pueden ser considerables sobre enlaces de fibra largos. Las reflexiones de Fresnel ocurren en interfaces discretas (conectores, adaptadores, etc.) como un resultado de espacios de aire, desalineamientos, e índices refractivos no coherentes.

La potencia óptica reflejada es indeseable por varias razones:

- Esto contribuye a las pérdidas de potencia totales.
- Los transmisores láser de alto rendimiento como los usados en sistemas DWDM son muy sensibles a la luz reflejada, la cual puede degradar significativamente la estabilidad del láser y la relación señal a ruido del sistema. En situaciones extremas, la potencia reflejada puede dañar el transmisor láser.
- La luz reflejada puede ser nuevamente reflejada (re-reflejada) hacia adelante. Como una propagación de reflexiones detrás de la señal original, causando problemas en la demodulación. Este fenómeno es llamado interferencia multicamino (MPI).
- Las reflexiones ocurridas internamente en un amplificador óptico EDFA – especialmente si la ganancia depende de ellos- puede ocasionar interferencia multicamino adicional y puede contribuir significativamente a amplificar el ruido.

1.2 FIBRA ÓPTICA

Cuatro parámetros claves de la fibra óptica limitan el rendimiento de los sistemas WDM: la no-linealidad, la dispersión cromática, y la dispersión por modo de polarización de primer y segundo orden.

1.2.1 Dispersión Cromática

La dispersión cromática describe la tendencia para diferentes longitudes de onda que viajan a diferentes velocidades en una fibra. En longitudes de onda donde la dispersión cromática es alta, los pulsos ópticos tienden a expandirse en el tiempo

y provocar interferencia, lo cual puede producir una inaceptable velocidad del bit, la figura 1.03 muestra como la dispersión cromática cambia con la longitud de onda para tres diferentes tipos de fibra.

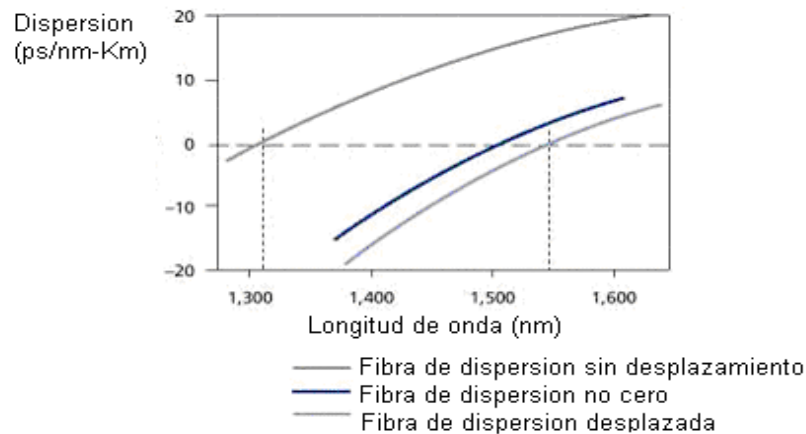


Figura 1.03 Dispersión cromática contra longitud de onda

La dispersión cromática de una fibra consiste de dos componentes – Material y Guía de Onda- como se muestra en la figura 1.04, el componente material depende de las características de dispersión de los dopantes y del silicio de construcción. Estos materiales no ofrecen mucha flexibilidad a ajustes significantes en la dispersión de la fibra, así que ese esfuerzo se ha enfocado en alterar la dispersión de guías de ondas de las fibras ópticas.

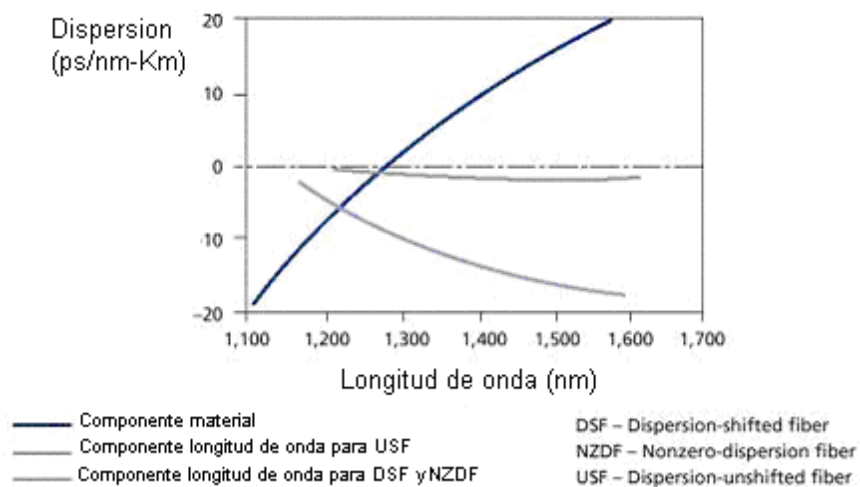


Figura 1.04 Componentes de dispersión de los materiales y guías de onda

1.2.2 Dispersión por Modo de Polarización

La dispersión del modo de polarización (PMD) es un problema para las redes DWDM de muy alta velocidad, y especialmente para las que operan a 10 Gbps o más. La señal óptica puede dividirse en dos modos de polarización opuestos ortogonalmente que viajan a través de la fibra a diferente velocidad, lo que provoca un ensanchamiento del impulso que se detecta como un error de bit tras la regeneración de la señal. Si la dispersión PMD supera ciertos límites, la tasa de errores de bit aumenta rápidamente, limitando la longitud del enlace y la velocidad de transmisión.

La figura 1.05 muestra los dos modos principales de una fibra asimétrica que es uniforme a lo largo de su longitud. El modo en el eje X es arbitrariamente etiquetado con un modo lento, mientras que en el eje Y es etiquetado en el modo rápido. La diferencia en los tiempos de arribo en los modos de dispersión por polarización (PMD), es típicamente medida en picosegundos, las unidades apropiadas para el coeficiente que caracteriza la fibra a si misma son ps/Km^{1/2}.

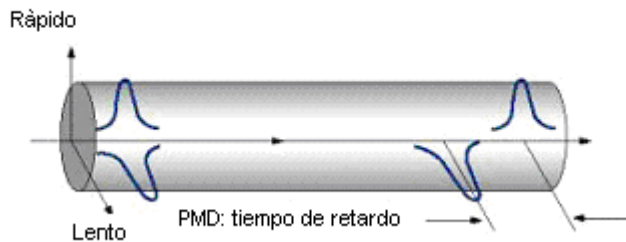


Figura 1.05 PMD en una fibra de modo simple cuya asimetría es uniforme a lo largo de su longitud

Todas las acciones mecánicas realizadas durante la fabricación, el arrollamiento, la instalación y la implementación de la fibra traen como resultado deformaciones locales de la fibra, deformaciones que alteran su geometría circular o la concentricidad del núcleo dentro del revestimiento, lo elonga (alarga) o lo dobla bruscamente, Figura 1.06.

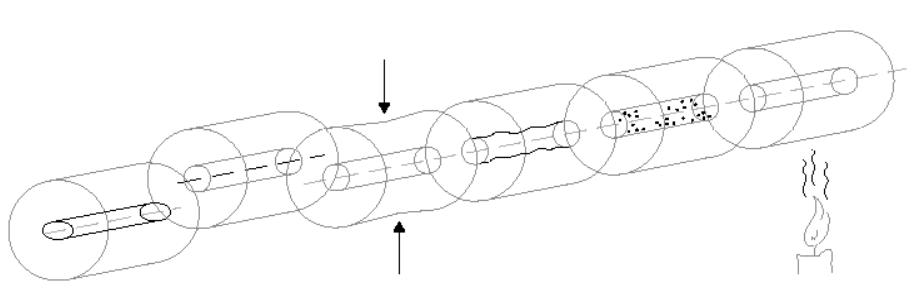


Figura 1.06 La PMD es afectada por la tensión física, la temperatura y las imperfecciones de la fibra

Una medida promedio puede ser usada para determinar las PMD de un enlace en particular conformado por un número de secciones. Las PMD totales de un número de tramas en una red esta dada por la raíz cuadrada de la sumatoria:

$$PMD_{TOT} = (\sum_N (PMD_N)^2)^{1/2}$$

1.2.3 Dispersión por Modo de Polarización de segundo Orden

Hasta hace poco, la PMD de segundo orden, referida a la variación de la dispersión por modo de polarización con la longitud de onda, habia tenido un efecto insignificante en el rendimiento de la red. Sin embargo, como las tasas de transmisión alcanzan 10 Gbps y más, esto puede llegar a ser un factor muy importante en la degradación del sistema. La PMD de segundo orden está siempre presente en fibras monomodo largas si la PMD de primer orden está presente. (De hecho, hay una simple relación matemática entre las dos para el caso común de las fibras acopladas directamente). Sin embargo, la PMD de segundo orden afectaría normalmente la degradación de un sistema solo si el enlace presenta dispersión cromática o si existen transmisores chirp. La magnitud de esta degradación puede ser del mismo orden de la dispersión cromática, y es proporcional a la longitud del enlace, a diferencia de la PMD de primer orden.

1.2.4 No Linealidad

Todos los intentos realizados para utilizar las capacidades de las fibras ópticas se encontrarán limitados por las interacciones no lineales que se producen entre las portadoras ópticas que transportan la información y el medio de transmisión. Estas no linealidades de la fibra producen interferencia, distorsión y atenuación adicional sobre las señales que se propagan, conduciendo finalmente a degradaciones en el sistema.

La no-linealidad de la fibra llega a ser notable cuando la intensidad de la señal láser (la potencia por unidad de área) alcanza un valor limite. También, los efectos no lineales generalmente llegan a ser evidentes después que las señales han pasado a través de una longitud de fibra, dependiendo de las características de su construcción y las condiciones de operación bajo las cuales esta puesta.

Ya que, el campo eléctrico (E) de la señal propagada es proporcional a la potencia de la señal (P), el índice no lineal de la fibra n_2 dividida por el área efectiva del núcleo de la fibra A_{eff} esta expresado en:

$$E(z + dz) = E(z) \exp [(-\alpha / 2 + i\beta + \gamma P(z,t) / 2) dz]$$

Donde α es la atenuación de la fibra, β es la fase de la onda de propagación, y γ es el coeficiente no lineal igual a $(2\pi/\lambda)(n_2/A_{\text{eff}})$. Si se asume que el haz de luz se propaga de forma Gaussiana, entonces:

$$A_{\text{eff}} = \pi(MFD)^2$$

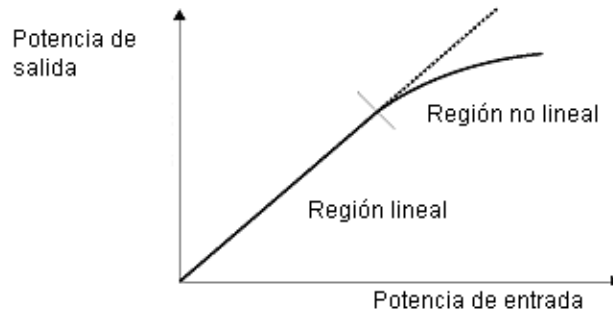


Figura 1.07 La no linealidad se presenta a niveles de potencia altos

Los efectos no lineales se pueden dividir en dos categorías, dependiendo del comportamiento del coeficiente no lineal γ . Estos son fenómenos de scattering (dispersión) (cuando γ es un número real y eleva las ganancias o las pérdidas) y un fenómeno de índice de refracción (cuando γ es un número imaginario y eleva la fase de modulación).

1. Con el fenómeno de dispersión, la señal láser se dispersa en ondas de sonido o en vibraciones moleculares de la fibra y se desplaza a mayores longitudes de onda. Dos tipos diferentes de fenómenos de dispersión, son los siguientes:
 - a) Dispersión estimulada de Brillouin.
 - b) Dispersión estimulada de Raman.
2. Con el fenómeno de índice de refracción, la potencia de la señal es suficientemente alta para que el índice de refracción no pueda ser tomado como una constante, y en su lugar es aproximado a:

$$n = n_0 + n_2 I$$

Donde n_0 es el índice de refracción lineal de la fibra, I es la intensidad de la señal, y n_2 el índice no lineal (aproximadamente de 2 a $3 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ para fibra de sílice). Los siguientes son fenómenos de índice de refracción diferentes:

- a) La automodulación de fase, o el efecto que tiene una señal en su propia fase.
- b) La modulación de fase cruzada, o el efecto que una señal produce en la fase de otro canal.
- c) Mezclado de cuatro ondas (four-wave mixing), o la mezcla de un número de longitudes de onda para producir nuevas longitudes de ondas.

Dispersión estimulada de Raman (SRS)

La dispersión de Raman se refiere a la interacción que sufren las ondas ópticas con las vibraciones moleculares del material. Las ondas incidentes se dispersan al chocar con las moléculas y experimentan una reducción de su frecuencia óptica. Este desplazamiento de frecuencia coincide precisamente con la frecuencia de vibración de las moléculas (llamada frecuencia de Stokes). Una cuestión a tener en cuenta se produce cuando se inyectan simultáneamente dos ondas ópticas separadas por la frecuencia de Stokes en un medio Raman activo. En este caso, la onda de menor frecuencia experimentará una ganancia óptica generada por, y a expensas, de la onda de mayor frecuencia (bombeo). Este proceso de ganancia se conoce como dispersión estimulada de Raman (SRS, stimulated Raman scattering) y constituye la base para la fabricación de los amplificadores ópticos de Raman.

El coeficiente para la dispersión de Raman es de 10–12 cm/W. La frecuencia de la señal es desplazada a frecuencias entre 10 a 15 THz en la ventana de 1550 nm, o aproximadamente una longitud de onda +100 nm más larga. Con un ancho de banda mucho más amplio (cerca de 7 THz o 55 nm). En sistemas WDM, el efecto es una transferencia de potencia de canales con longitudes de onda más bajas a los que tienen longitudes de onda más grandes.

Dispersión estimulada de Brillouin (SBS)

El proceso no lineal de dispersión estimulada de Brillouin (SBS, stimulated Brillouin scattering) es similar al SRS, salvo que el SBS depende de ondas sonoras en lugar de vibraciones moleculares. En este aspecto, ambos procesos involucran tres ondas según las cuales la onda óptica incidente (bombeo) se convierte en una onda de Stokes de mayor longitud de onda por medio de la excitación de una vibración molecular (SRS) o de un fonón acústico (SBS).

Para fibras G.653 a 1525 nm, por ejemplo, la señal dispersa es desplazada en aproximadamente 10.7 GHz (+0.085 nm) con un ancho de banda de más o menos 60 MHz. Para fibras G.652 en la misma ventana, la señal dispersa es desplazada en aproximadamente 11 GHz (+0.088 nm) con un ancho de banda cercano a 30

MHz. Por regla general, SBS debe ser considerado como un problema potencial si la luz monocromática o más que aproximadamente 6 dBm es emitido en la fibra.

Automodulación de Fase (SPM)

Cuando la intensidad de la señal láser llega a ser muy alta, la señal puede modular su propia fase. Esta modulación amplía el espectro de la señal y amplía o comprime temporalmente la señal, dependiendo de la señal (positiva o negativa) de la dispersión cromática que vea. En sistemas WDM, la ampliación del espectro creado por la automodulación de fase en un canal puede interferir con señales adyacentes.

La automodulación de fase se incrementa con:

- Un incremento en la potencia entregada al canal en una fibra establecida con un área efectiva fija.
- Un incremento en la tasa de bits del canal (tasas de bits mas altas tienen subidas y caídas más rápidas en la pendiente de los bits)
- Dispersión cromática negativa

La automodulación de fase disminuye con:

- Dispersión cromática cero o un valor positivo pequeño
- Un aumento en el área efectiva de la fibra
- Compensación de la dispersión

La Modulación de Fase Cruzada (XPM)

En este caso, la señal en un canal modula la fase de un canal adyacente.

La modulación de Fase Cruzada es sensible a algunos factores como la automodulación de fase, así como también a un incremento en el número de canales. Esta no es significativamente influenciada por una disminución en el espacio de canal, como es el caso para la automodulación de fase, pero se reducirá con:

- Un aumento en el área efectiva de la fibra
- Compensación por dispersión

La modulación de fase cruzada es menos importante en sistemas WDM usando fibras con áreas efectivas grandes.

Mezclado de cuatro ondas (FWM)

El mezclado de cuatro ondas es uno de los efectos lineales más perjudiciales en sistemas WDM. Cuando la intensidad de la señal láser alcanza un nivel crítico, aparecen señales fantasmas (ghost), algunas de las cuales pueden caer dentro de los canales verdaderos. El número de estos canales fantasmas está dado por:

$$N^2 (N - 1) / 2$$

Donde N es el número de canales de señal. De modo que aparecen 24 canales fantasmas en un sistema de cuatro canales, 224 en un sistema de ocho canales, y 1920 en un sistema de 16 canales. Interferencia de este tipo puede ser catastrófica para el receptor final.

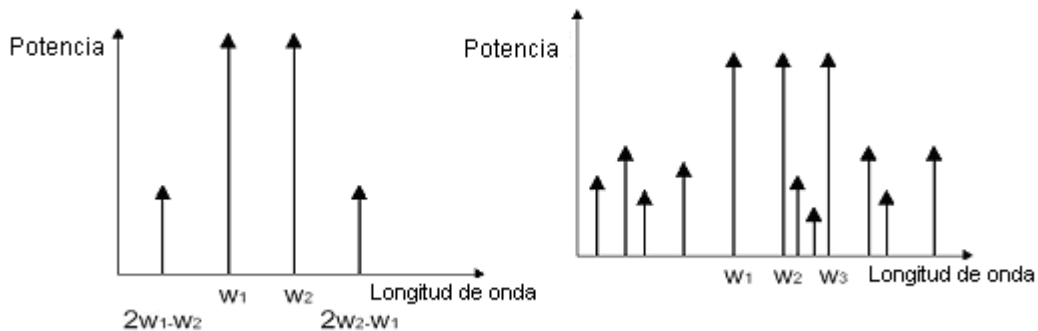


Figura 1.08 La mezcla de cuatro ondas crea señales indeseadas dentro del rango espectral de transmisión

La mezcla de cuatro ondas es sensible a:

- Un incremento en la potencia del canal
- Un decremento en el espacio entre canales
- Un aumento en el número de canales (aunque un valor de saturación puede ser alcanzado)

La mezcla de cuatro ondas es un asunto serio particularmente en sistemas que usen fibras de dispersión desplazada G.653. Este es menos importante con fibras de dispersión desplazada NZ G.655, especialmente aquellas con áreas efectivas grandes. No es influenciada significativamente por un aumento en la tasa de bits del canal.

La mezcla de cuatro ondas disminuye con:

- Un aumento en el área efectiva de la fibra
- Un incremento en el valor absoluto de la dispersión cromática

La mezcla de cuatro ondas es un problema menos grave para fibras de dispersión no desplazada (G.652) en sistemas WDM a 1550 nm porque la dispersión es relativamente baja comparada con la fibra de dispersión desplazada (G.653), donde la pendiente es mucho más pronunciada.

1.3 AMPLIFICADORES ÓPTICOS

Los amplificadores ópticos, generalmente Amplificadores de Fibra Dopados con Erblio o EDFAs (erbium-doped fiber amplifiers), son de crucial importancia para la operación económica de las redes DWDM. Esto es porque ellos proveen amplificación transparente de todos los canales, sin tener en cuenta los esquemas de modulación o protocolos usados en cada uno. Su uso significa que una señal óptica modulada puede ser transmitida sobre largas distancias, sin la necesidad de recuperar y regenerar la información transportada. Sin embargo, la ganancia de los EDFAs depende de la longitud de onda y ésta debe ser determinada y tratada durante el diseño de la red, especialmente cuando los canales individuales atravesaran múltiples amplificadores. Además, como las figuras de ruido de los EDFAs individuales usados, afectarán críticamente la integridad de la señal óptica, estas figuras determinarán el número de amplificadores que pueden ser puestos en cascada, y por ende, la distancia máxima del enlace.

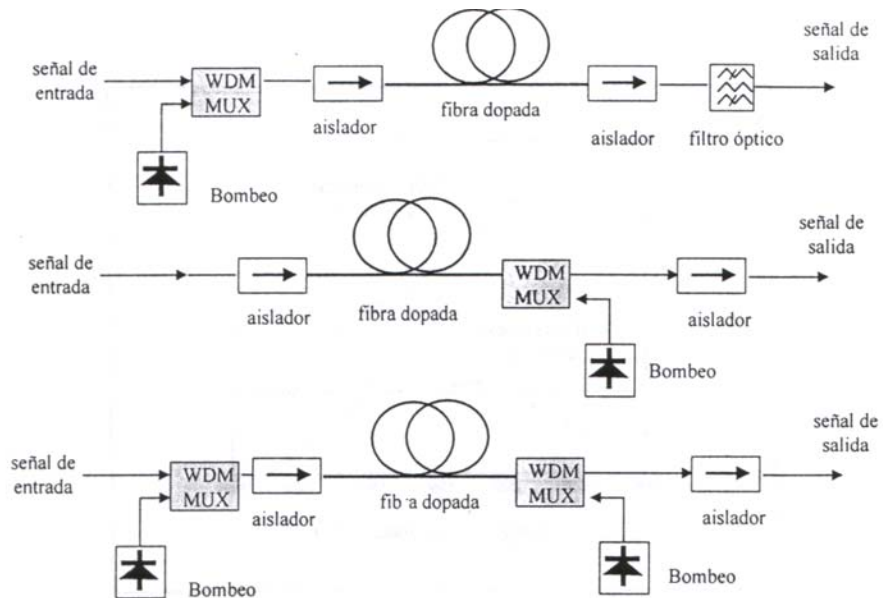


Figura 1.09 Posibles configuraciones para la implementación de un EDFA

Así que, la ganancia es la función esencial del amplificador, la amplificación óptica es uno de los parámetros más importantes a medir. La ganancia depende de muchos parámetros que, individual o grupalmente, pueden modificar el

rendimiento del dispositivo. La ganancia varía con la longitud de onda de la señal, el estado de la polarización de entrada y la potencia. La curva de ganancia, la cual caracteriza la ganancia a través del espectro del canal, cambiará dependiendo de la potencia relativa de entrada de cada canal. De este modo, el efecto de la redistribución temporal de la potencia de entrada, tal como, cuando un canal está siendo agregado o removido, debe ser caracterizada y controlada en aplicaciones con múltiples señales.

La ganancia es medida como la relación entre el promedio de las potencias de salida y entrada, omitiendo la contribución de las emisiones espontáneas amplificadas (ASE) del mismo amplificador.

$$G(\text{dB}) = 10 \log \left(\frac{P_{\text{out}}(\lambda_c) - P_{\text{ASE}}(\lambda_c)}{P_{\text{in}}(\lambda_c)} \right)$$

Donde G es la ganancia en dB; $P_{\text{out}}(\lambda_c)$ es la potencia de salida promedio en la longitud de onda del canal (en mW); $P_{\text{ASE}}(\lambda_c)$ es la potencia ASE en mW; y $P_{\text{in}}(\lambda_c)$ es la potencia de entrada promedio en mW.

La ganancia exhibida por un amplificador óptico depende básicamente del nivel de la señal de entrada. El amplificador presenta una ganancia para pequeña señal típicamente grande para señales de entrada débiles (por ejemplo, > 30 dB para un pre-amplificador EDFA con una señal de entrada de < -20 dBm). Para señales de entrada con potencia intermedia, la ganancia empieza a desviarse desde su valor de pequeña señal, y esta compresión de la ganancia es un parámetro importante. Para señales de entrada de alta potencia (típicamente > 3 dBm en el caso de un EDFA), el amplificador está en saturación, y la potencia de salida corresponde a un nivel de potencia de entrada donde la ganancia $\cong 1$ es llamada la potencia de salida saturada.

En general, los valores de estos tres parámetros de ganancia claves del amplificador, esto es, la ganancia de pequeña señal, compresión de la ganancia en 3 dB, y la potencia de salida saturada, varían con la longitud de onda de la señal de entrada. Consecuentemente, los usuarios que deseen un rendimiento total del amplificador requerirán un sistema de pruebas que realice mediciones a diferentes potencias de entrada ópticas para un número de longitudes de onda de interés.

Para medir la ganancia de saturación para aplicaciones DWDM, el amplificador es saturado a una longitud de onda de canal en particular y las medidas de ganancia son tomadas en otras longitudes de onda del canal, usando una señal de entrada. Probar con todas las longitudes de onda sobre el espectro de operación revelará la sensibilidad espectral de este parámetro. Las medidas pueden también ser bidireccionales, para proveer la ganancia llamada de pequeña señal saturada inversa.

Ganancia en saturación cruzada (Gain Cross Saturation)

Es el cambio en la ganancia de un canal específico cuando la potencia de entrada en otro canal (o varios canales) se cambia en una cantidad específica.

Planeidad de Ganancia

Es la cantidad máxima obtenida a partir de la diferencia entre las ganancias de los canales individuales cuando sus potencias de entrada son iguales.

Ganancia Dependiente de la Polarización (PDG)

Caracteriza la diferencia en ganancia para diferentes estados de polarización de entrada. Esta es usualmente determinada por escaneo o muestreo de todas las polarizaciones de entrada posibles y registrando los valores de ganancia más bajo y más alto.

La Ganancia de la Señal

Es la ganancia aplicable a una gran señal, tal como la señal de tráfico, la cual, normalmente conduce el amplificador a saturación en aplicaciones de amplificación de potencia. Este es el factor principal para determinar el punto de operación del amplificador. En contraste, la ganancia de ruido es la ganancia aplicable a una señal pequeña que tiene un pequeño impacto o no tiene impacto en el punto de operación del amplificador, mientras otra señal grande esta conduciendo el amplificador a saturación.

El Perfil (profile)

El término perfil es frecuentemente usado para referirse a la dependencia de la longitud de onda de una propiedad en particular. Por ejemplo, la ganancia de ruido puede ser un valor simple (expresado en dB) para una longitud de onda, mientras el perfil de la ganancia de ruido describe como varia el parámetro con la longitud de onda.

La Ganancia del Canal

La ganancia del canal es la ganancia de una señal en particular en un sistema DWDM. En general, ésta es diferente para diferentes longitudes de onda o canales.

1.3.1 Emisión Espontánea Amplificada

La principal fuente de ruido en un amplificador óptico es la emisión espontánea amplificada (ASE), la cual no es diferente al silbido de fondo que puede ser oído desde un amplificador de audio. Este ASE aparece como un nivel de fondo a través de espectro óptico, como se ve con un analizador de espectro. Éste introduce ruido en la banda base de RF (por ejemplo, en la señal eléctrica saliente del receptor) por mecanismos que serán discutidos con más detalle posteriormente.

Como un medio amplificador bombeado ópticamente, sílice dopada con erbio tiene lo que es conocido como una estructura de tercer nivel, donde el nivel más alto en la banda de transición de 1550 nm es metastable y puede producir emisiones espontáneas y estimuladas.

Un nivel metastable tiene un tiempo de decaimiento grande. Consecuentemente, un ion de erbio puede quedarse en este estado por largo tiempo, resultando en una inversión demográfica. En presencia de una inversión, átomos aislados, o iones, producen emisiones espontáneas de radiación, en un medio que produce ganancia, tal como en un EDFA, esta emisión espontánea tiene una probabilidad dada de ser capturada en cada trozo elemental de fibra dopada y por eso, es amplificada por elementos sucesivos, produciendo emisiones espontáneas amplificadas (ASE). La ASE es generada en ambas direcciones hacia adelante y hacia atrás.

La potencia de ASE en la señal puede ser deducida, midiendo el nivel de ruido de la señal de entrada ($N_{in}(\lambda)$) y el nivel de ruido total de la señal de salida ($N_{out}(\lambda)$) usando la siguiente ecuación:

$$N_{out}(\lambda) = (N_{in}(\lambda) \times G) + ASE$$

En saturación o compresión de la ganancia, la contribución de la ASE es pequeña. La ganancia es simplemente la razón de la potencia de entrada sobre la de salida, sin tener en cuenta la emisión espontánea amplificada.

1.3.2 Figura de Ruido

La figura de ruido (NF) es definida como la degradación de la razón señal a ruido (SNR) de la señal después de que ha pasado a través del amplificador óptico. Este SNR es definido en términos de la señal de banda base de Radio Frecuencia (RF) que transporta la información, y no directamente la razón de la portadora óptica a la potencia ASE circundante, como se ve en un analizador de espectro óptico, por ejemplo.

Esta degradación de la razón de SNR surge debido a varios procesos:

- Ruido de impacto ó impulsivo (shot noise)
- Spontaneous- Spontaneous beat noise
- Signal- Spontaneous beat noise
- Ruido por interferencia
- Ruido por exceso (ruido en la fuente)

La primera fuente de ruido –ruido de impacto- es una consecuencia ineludible de la naturaleza discreta de la luz. Esto es causado por fluctuaciones aleatorias en el tiempo de llegada de los fotones distorsionando la señal, o más precisamente, por fluctuaciones aleatorias en los electrones resultantes desde el fotodetector.

La segunda contribución proviene del ruido Spontaneous- Spontaneous beat noise entre señales ASE dentro del ancho de banda de frecuencia de la señal modulada en amplitud, también llamado ruido ASE-ASE beat noise. Ya que el ruido ASE disminuye con la potencia de salida o cuando se aproxima a las condiciones de saturación, este ruido es usualmente ignorado en los amplificadores de potencia. Sin embargo, el ruido Spontaneous- Spontaneous beat noise puede ser muy importante en pre-amplificadores a menos que se use el filtrado de banda estrecha.

Beat noise ocurre cuando dos señales no correlacionadas, pero espacialmente cercanas interfieren la una con la otra. En un EDFA, cada sección ASE espectral puede beat con secciones vecinas, aumentando la interferencia con las características espectrales. Esta forma de generación de ruido puede ser eliminada, para todos los propósitos prácticos, usando filtrado óptico de banda estrecha.

Generalmente el ruido ASE beat noise, crece desde la mezcla heterodina de señal con esencialmente ruido ASE blanco. Ya que la frecuencia de beat de la señal con el ruido ASE circundante esta dentro de la frecuencia del ancho de banda de la portadora de la información modulada, esta no puede ser removida por filtrado óptico o eléctrico de la señal. Medirlo es por lo tanto importante. La especificación de la figura de ruido (NF) de la mayoría de EDFAs es una medida de este efecto.

La figura de ruido que refleja el ruido Signal- Spontaneous beat noise puede ser determinado a partir de la potencia ASE que aparecen bajo la señal láser, P_{ASE} , en la longitud de onda de la señal λ_s , la ganancia G , y el ancho de banda medido B (en unidades de frecuencia) como sigue:

$$NF \text{ (dB)} = P_{ASE}(\lambda_s) / G(\lambda_s)^* b v^* B(\lambda_s)$$

Ya que, el ruido signal-spontaneous beat noise no puede ser filtrado como el ruido spontaneous-spontaneous beat noise, la figura de ruido del amplificador esta normalmente definida en términos de este mecanismo.

1.3.3 Ruido por Interferencia Multicamino (multipath interference noise)

La interferencia multicamino (MPI) es debida a pequeñas reflexiones internas dentro de un EDFA que pueden degradar el comportamiento del amplificador. Estas reflexiones pueden inducir serios e inestables efectos parásitos etalon, que conlleva a picos de ruido múltiples en el espectro de intensidad de ruido relativa (RIN) por la alta ganancia del amplificador. Durante la fabricación de los EDFA, a los amplificadores se les hacen pruebas de MPI después de la producción. Excepto por el método de substracción de RIN, los métodos para determinar la figura de ruido que se han discutido, no detectarían normalmente el ruido MPI. Para la mayoría de aplicaciones, casi cualquier grado de MPI es inaceptable en amplificadores. La figura de ruido MPI de un amplificador óptico es definido como:

$$NF_{MPI}(\lambda) = SNR_{out}(\lambda) - SNR_{in}(\lambda)$$

Todos expresados en dB, donde SNR_{in} es la razón señal a ruido de la entrada del amplificador y SNR_{out} es la razón señal a ruido en su salida. Asumiendo que un filtrado de banda estrecha es usado en la entrada del receptor.

1.4 TRANSMISORES

Los sistemas DWDM deben su ventaja de ancho de banda al uso de múltiples canales en diferentes longitudes de onda. Todas estas longitudes de onda deben estar dentro de la banda de operación de los EDFAs. Si hay muchos canales, cada uno debe ser controlado estrictamente. Las características de la fuente de luz por cada canal determinan el éxito de este control. En los siguientes párrafos se exponen los requerimientos más importantes.

El ancho de línea del láser debe ser suficientemente estrecho para permitir proximidad del espaciado entre canales DWDM. Un ancho de línea estrecho minimiza la distorsión de los pulsos causada por la dispersión de la fibra y permite usar filtros de banda estrecha frente al receptor para mejorar la razón señal a ruido. También, son requeridas bandas laterales residuales muy bajas para asegurar que la salida de la fuente no interfiere con cualquier otro canal.

La operación en mono-modo longitudinal es necesaria para minimizar la generación de ruido beat. La tendencia al ensachamiento de línea (chirp) de los láser directamente modulados por las corrientes de conducción los hace

inadecuados para sistemas DWDM. Se prefieren moduladores externos que son físicamente integrados con la fuente.

La potencia pico, la longitud de onda en el pico, el ancho espectral y la susceptibilidad a chirp puede mantenerse dentro de ambos límites aceptables en el corto y largo plazo, dependiendo de la edad del dispositivo. Derivaciones a corto plazo debidas a la temperatura y otras influencias ambientales, deben ser también suficientemente bajas. Si no, significa que debe ser provista para detectarlas y contrarrestarlas. Las fuentes láser deben ser protegidas adecuadamente si ellas están expuestas a la dispersión, las cuales pueden llegar a inestabilizarlas.

Los módulos láser son costosos, y sus repuestos pueden ser muy costosos y requerir desensamblaje mecánico complejo y realineamiento de componentes que es crítico para la operación efectiva de un enlace. El comportamiento estable es evidentemente un requerimiento primario.

La energía que no se convierte en luz resulta en calor que afecta las características (potencia y longitud de onda) del láser y crea inestabilidad. Enfriadores termoeléctricos son generalmente usados para mantener las fuentes láser a la temperatura deseada.

El transmisor debe quedar dentro del ancho de banda del canal y no debe cambiar la longitud de onda con el transcurso del tiempo. El cambio típico del espectro en láser DFB es menor que $0.1 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ y $0.01 \text{ nm}/\text{mA}$; la sensibilidad para el caso de la temperatura es típicamente $0.002 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ y el envejecimiento no debe ser mayor a $0.001 \text{ nm}/\text{año}$. La potencia de salida debe ser estable a través del tiempo y los modos laterales deben ser suprimidos a más de 40 dB por debajo de la salida pico. El láser es aislado ópticamente y no debe ser afectado por falsas reflexiones del medio de transmisión, especialmente aquellas que provienen del primer EDFA en línea.

1.4.1 Transmisores ópticos

La fuente óptica debe cumplir un número de requerimientos. Mecánicamente, por supuesto, sus dimensiones ópticas deben ser compatibles con el tamaño del cable de fibra óptica que se está usando, debe cumplir una relación apropiada de la potencia en el cable de fibra óptica con la alta eficiencia. Para evitar problemas de ensamble en sistemas DWDM, donde un número de módulos transmisores serán usados necesariamente uno cerca de otro, la fuente debe ser físicamente pequeña, liviana y extremadamente confiable.

La fuente debe poder generar suficiente potencia óptica para cumplir con el requerimiento de la tasa de error de bit (BER) de la aplicación en particular, y su

salida debe ser fácilmente modulada a la tasa requerida. La linealidad puede ser importante, si la potencia de salida debe variar o cuando la modulación análoga se realiza.

Tanto el diodo emisor de luz (LED) como el diodo láser (LD) cumplen estos requerimientos para un gran número de aplicaciones, las ventajas y el ancho de banda de los LD hacen que la fuente sea la elección en demanda.

Las fuentes usadas en un sistema de 2.5 Gb/s, en general, pueden ser moduladas directamente por su corriente. Las fuentes usadas con velocidades de transmisión mas altas requieren moduladores separados para minimizar el chirp. En otro caso, medios apropiados deben estar provistos para acoplar eficientemente la energía de salida al siguiente componente, al modulador, y a la línea de transmisión. Medidores de disipación de calor, por ejemplo termómetros se requieren usualmente.

1.4.2 Módulos Transmisores

La luz proveniente de la fuente óptica debe ser modulada con el contenido de bits de la información que transporta el canal. Esta modulación debe ser suficientemente lineal para evitar la generación de excesivos armónicos y distorsión entre modulaciones. Esto puede acarrear efectos de borrado en otras partes de la red, o interferencia con la extracción de la información (demodulación) en el receptor al final del enlace.

Aunque un número de técnicas de modulación están disponibles, modulación de intensidad es la más común. Para velocidades por encima de 2.5 Gb/s, en normal operación se usa la modulación por pulso directo. Para velocidades más altas, una compuerta óptica que se abre y cierra rápidamente provee una señal de luz on/off.

1.5 RECEPTORES

La función de los receptores es proveer el demodulador con la señal eléctrica más limpia que pueda extraer de la señal óptica recibida. El rendimiento del receptor es medido por la tasa de error de bit (BER) que entrega. El resultado, para una señal dada recibida depende de la sensibilidad del receptor, su ancho de banda y cualquier ruido que se suma a la señal antes de la demodulación.

El comportamiento total de un receptor es descrito por su curva de sensibilidad, la cual grafica el BER como una función de la potencia óptica recibida para una tasa de datos dada. Esta curva aplica para un conjunto particular de condiciones de

operación e incorpora los efectos del ancho de banda, detector de ruido, y técnicas de demodulación.

Factores mecánicos y ambientales deben también ser considerados, incluyendo el tamaño, peso, las necesidades de potencia, y la sensibilidad a la temperatura (especialmente para avalancha de fotodiodos), también como la facilidad de servicio y repuestos.

1.6 COMPENSADORES DE DISPERSIÓN

Ya hemos discutido como la dispersión cromática amplía los pulsos de la señal sobre el enlace de fibra y hemos mencionado la compensación de la dispersión como un posible remedio.

Un compensador de dispersión es frecuentemente una longitud de fibra óptica hecha de un material que muestra las anomalías respecto a la dispersión cromática en la longitud de onda de operación. Por lo tanto, su dispersión es negativa, mientras que la del medio de fibra principal es positiva. La magnitud de la dispersión por unidad de longitud en el compensador es usualmente mucho más grande que la de la fibra a ser compensada, por ende una longitud corta en la fibra a ser compensada, puede compensarse por medio de la dispersión cromática de una trama considerable de fibra ordinaria. La compensación por dispersión puede también ser realizada usando componentes discretos como rejillas de Bragg.

Para que las técnicas de compensación por dispersión sean efectivas, es necesario poder medir la dispersión total en la fibra para ser corregida, así como, el coeficiente de dispersión de la fibra corregido. También debe ser posible revisar que la longitud calculada insertada en la fibra compensada realmente elimina la dispersión.

1.7 SWITCHES

Los switches son usados en la red para reacomodar los enlaces. Ellos habilitan el re-enrutamiento de la señal y son usados para configurar un camino o restaurar un enlace. Son usados también en conjunto con multiplexores ópticos add/drop. Los parámetros claves que determinan el rendimiento de los switches y así, su conveniencia para aplicaciones particulares de red, son:

- Las pérdidas por inserción y acoplamiento
- Las pérdidas por retorno
- Las pérdidas dependientes de la polarización

- El aislamiento y la diafonía
- La integridad
- El tiempo de switcheo
- La estabilidad

1.8 ATENUADORES

La aplicación principal de los atenuadores en sistemas WDM es conservar la potencia en cada canal de manera que la potencia entregada al primer EDFA en línea sea espectralmente plana. Consecuentemente, La planeidad sobre el ancho del canal es un parámetro clave en el rendimiento. Otros parámetros, con relativa importancia dependen de las aplicaciones específicas, incluyen:

- Estabilidad
- Integridad
- ORL (Pérdidas ópticas por retorno)
- PDL (pérdidas dependientes de la polarización)
- PMD (dispersión por modo de polarización)
- Precisión
- Repetitividad
- Pérdidas por inserción

1.9 AISLADORES

Los aisladores son usados en situaciones donde la luz dispersada o la luz reflejada desde una interfase pueden degradar el rendimiento de un componente sensible tal como un láser DFB.

Los siguientes son los parámetros críticos que determinan el rendimiento de los aisladores:

- La dependencia de la longitud de onda, especialmente para aisladores de banda estrecha que son designados para operar en un rango del espectro más angosto que 20 nm. Los aisladores son descritos por una figura de atenuación y por el ancho de banda para el cual el aislamiento está dentro de 3 dB del valor pico.
- Pequeñas pérdidas por inserción < 1 dB en dirección directa, pero típicamente en exceso de 35 dB (mono estado) en dirección inversa, y baja dependencia de la polarización.

- La dispersión por modo de polarización (PMD). los aisladores son construidos usando elementos altamente birrefringentes, y son muy propensos a PMD (típicamente 50 a 100 fs), especialmente para diseños mono estado. Existen aisladores doble estado que pueden ser diseñados de manera que la PMD inducida por el primer estado es anulada en gran parte por el segundo estado.
- Las pérdidas dependientes de la polarización (PDL), las cuales degradan el rendimiento de los aisladores ópticos.
- La dispersión por interferencia multicamino PMD (un efecto adicional de la dispersión causado por reflexiones indeseadas en el dispositivo o en caminos ópticos desbalanceados)

2 COMPONENTES DE PRUEBA Y CERTIFICACIÓN

Una nueva familia completa de sub-sistemas y componentes es necesaria para permitir y facilitar el desarrollo, la fabricación y la evolución de sistemas usando la tecnología DWDM. Como es el caso de cualquier tecnología en evolución, necesita desarrollar nueva terminología, especificaciones y técnicas de medición para describir cada uno de estos elementos. Esta sección describe las medidas y técnicas de prueba usadas para caracterizar la mayoría de los elementos de la red de un sistema DWDM.

Los componentes de una red DWDM incluyen transmisores (incluyendo láser y moduladores), receptores (incluyendo filtros y detectores), transpondedores, amplificadores ópticos (boosters, in-lines y preamplificadores), multiplexores, demultiplexores, multiplexores ópticos add/drop, enrutadores y switches, fibras, cables compensadores. A medida que la tecnología DWDM disminuye el espacio entre longitudes de onda, los requerimientos y las especificaciones para los componentes selectores de longitudes de onda tienen mayor demanda y los procedimientos de prueba correspondientes más complejos.

Un dispositivo bajo prueba (DUT) debe ser alimentado con una señal óptica que tiene características conocidas, y su salida debe ser analizada para determinar en detalle, como difiere respecto de la entrada. Ambas, la fuente de medidas y el instrumento analizador deben ser seleccionados para probar y analizar el valor intrínseco de los parámetros que están siendo medidos sin introducir efectos externos.

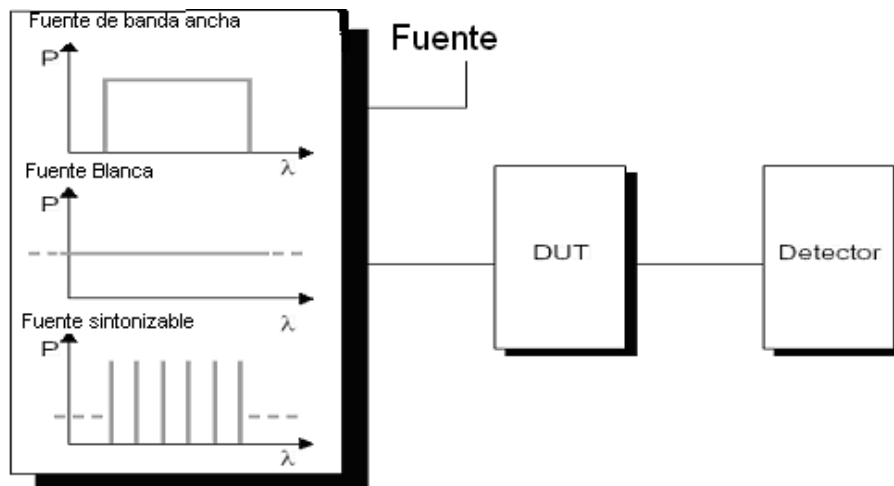


Figura 2.01 Prueba usando fuentes perfectas

En la vida real, tanto las fuentes ideales – longitud de onda variable infinitamente, capaces de producir espectralmente múltiples longitudes de onda puras, perfectamente estables- e instrumentos de medida – con alta resolución y precisión, calibración estable, sintonización infinita- no existen. El ingeniero de pruebas debe seleccionar los equipos cuidadosamente, para asegurar que los parámetros deseados están siendo medidos en realidad y que la técnica de medida, por si misma no introduce efectos indeseados.

2.1 PRUEBAS PARA FUENTES ÓPTICAS

Al elegir una fuente óptica que va a ser usada para probar componentes pasivos es importante tener en cuenta varias características. Debe ser proporcionada una potencia adecuada de manera que se puedan tomar medidas confiables en componentes de altas pérdidas, o en los límites de transmisión de dispositivos sensibles a la longitud de onda donde dos o más señales tienen que ser comparadas, cada una atenuada en al menos 40 dB.

Se requerirán fuentes de banda ancha, las cuales deben ser considerablemente planas sobre su rango espectral para minimizar correcciones. Las fuentes de banda ancha no-coherentes, como las lámparas incandescentes de alta intensidad, LEDs, y fuentes de emisión espontánea amplificada (ASE), están disponibles cubriendo todo el rango espectral de interés. Las medidas deben hacerse minimizando cualquier dependencia de la polarización debido a que las salidas de las fuentes son no polarizadas.

Las fuentes ASE proveen luz de alta intensidad sobre un extenso ancho de banda, pero ellas deben ser seleccionadas para desplegar una distribución de potencia espectral tan plana y tan uniforme como sea posible sobre el rango de longitudes de onda de interés.

Los requerimientos para fuentes de banda angosta se cumplen generalmente por láseres con cavidad externa (ECLs), quienes precisan la longitud de onda que puede ser ajustada por medios mecánicos con precisión de unos pocos picometros sobre un rango espectral excediendo 120 nm. En la medida que las fuentes son fuertemente polarizadas y casi monocromáticas, son convenientes en situaciones de medida que demanden sensibilidad a la longitud de onda. Las emisiones espontáneas pueden ser controladas con filtros apropiados, y su comportamiento de ruido puede adecuarse para medidas con bajas pérdidas por inserción.

La figura 4.02 indica las regiones del espectro en las que cada uno de los tipos de fuentes discutidas es particularmente aplicable.

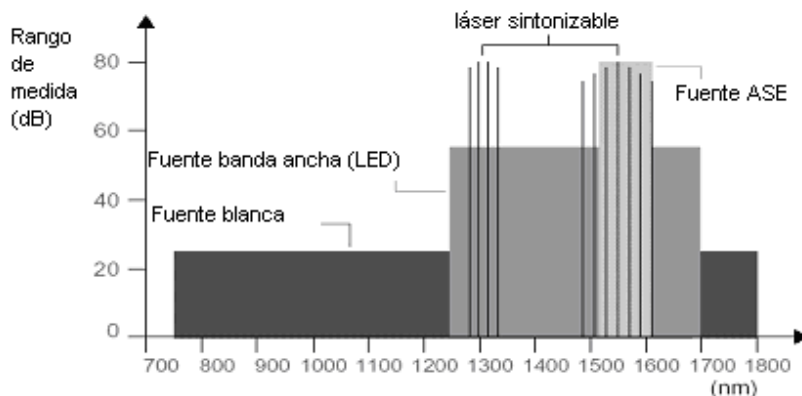


Figura 2.02 Región espectral de emisión y rango dinámico de diferentes tipos de fuentes

2.2 PRUEBA PARA RECEPTORES

Probar los componentes WDM involucra casi inevitablemente el direccionamiento de la longitud de onda y la sensibilidad de pérdidas del dispositivo, de manera que las técnicas de medida usualmente incluyen, un sistema de detección selector de longitud de onda con una fuente de banda ancha o un sistema de detección de banda ancha con una fuente de luz sintonizable.

Las características deseables de los receptores en prueba son análogas a las de las fuentes. Los receptores de banda ancha (o medidores de potencia) deben ser espectralmente planos. Estos deben responder linealmente sobre un rango dinámico tan grande como sea posible, y deben contribuir con tan poco ruido a la medida como sea posible. Su sensibilidad a la polarización debe ser tan baja como sea posible.

2.2.1 Medidas de Potencia

Las medidas de potencia óptica de banda ancha generalmente usan como detectores fotodiodos sensibles sobre el rango espectral apropiado para las bandas de longitud de onda en uso (se pueden usar módulos plug-in para switcheo de bandas). Su respuesta en longitud de onda es suave y casi siempre razonablemente plana (especialmente para detectores InGaAs), y ellos pueden ser calibrados para asegurar la precisión de las medidas en cualquier longitud de onda. Los medidores de potencia –especialmente modelos enfriados termoeléctricamente- son estables y generalmente ofrecen suficiente rango dinámico para la mayoría de las medidas de atenuación en demanda. Y tienen una sensibilidad de polarización pequeña.

2.2.2 Analizador de Espectros Ópticos

El analizador de espectros ópticos proporciona información del contenido espectral de una determinada fuente de luz. El esquema básico de funcionamiento se ve, en la figura 2.03, en la cual se representa el bloque fundamental del analizador de espectros, el monocromador.

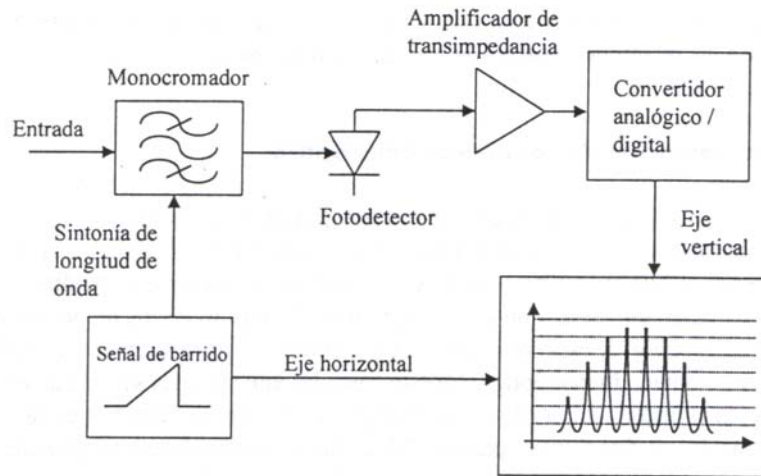


Figura 2.03 Esquema de bloques típico de un analizador de espectros ópticos

En la figura 2.04 se representan esquemáticamente dos configuraciones, las basadas en un elemento de difracción espacial como las redes de difracción de bloque o las basadas en estructuras de tipo interferométrico, como los filtros Fabry-Perot.

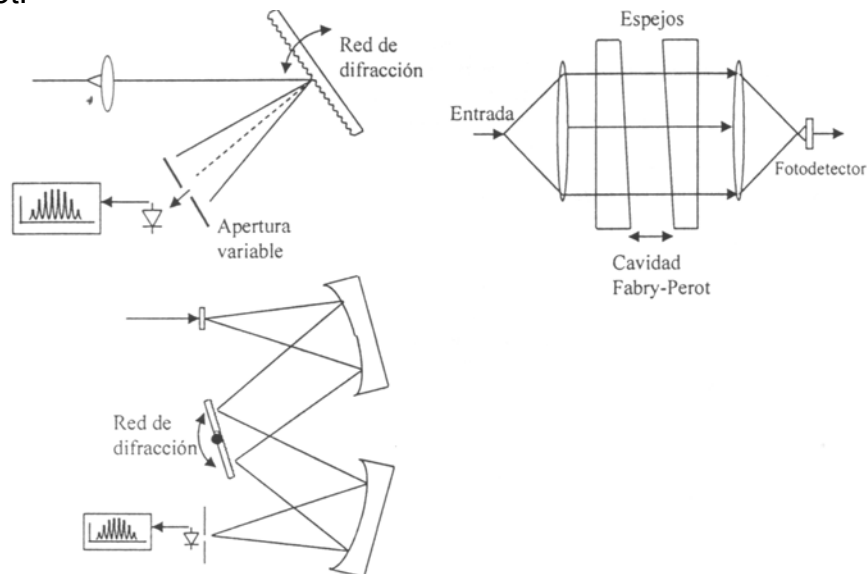


Figura 2.04 Representación esquemática de los monocromadores ópticos basados en redes de difracción de bloque y basados en cavidad Fabry-Perot.

Los criterios importantes a tener en cuenta con los OSA:

- El rango dinámico: la habilidad para medir un amplio rango de la señal, necesario. Por ejemplo, en la caracterización de la forma de la banda de un canal óptico.
- Sensibilidad: La habilidad para medir señales ópticas de muy baja intensidad.
- Resolución del ancho de banda (RBW): La habilidad para determinar las características en longitudes de onda estrechamente espaciadas, se necesita para investigar las propiedades detalladas de los canales DWDM.
- Precisión: La habilidad para indicar exacta y correctamente las longitudes de onda medidas y la potencia.

Los primeros dos criterios dependen esencialmente del detector usado, y por lo tanto, ellos pueden ser adaptados hasta cierto punto para encontrar medidas particulares que se necesiten. La resolución es el punto fuerte de un OSA estilo rejilla: las rejillas pueden ser producidas para encontrar la resolución necesaria. La calibración de la longitud de onda absoluta depende sobre todo de la posición de muchos componentes mecánicos –la posición rotacional de la rejilla, en particular- por ende, es difícil asegurar su constancia. Algunas formas de calibración outboard, son frecuentemente usadas para proveer la referencia que se necesita para convertir la precisión relativa intrínsecamente alta del OSA en un valor absoluto aceptable. Alternativamente, la longitud de onda de un láser sintonizable (en particular un ECL de ancho de línea angosto) puede primero ser adecuadamente determinado con un medidor de longitud de onda y luego usar el láser para calibrar el OSA.

Aunque los parámetros de diseño gobiernan el desempeño de un OSA pueden hasta cierto punto variar para ser adaptados a necesidades específicas de medida. Incrementar la resolución del espectro, por ejemplo, significa usar una rejilla de alta dispersión, o recoger la luz difractada a través de una apertura más angosta. Ambos pasos decrementan la cantidad de luz recogida en el caso de una señal de equivalente o mayor ancho de banda. Señales moduladas pueden también reducir la sensibilidad y en muchos casos, el rango dinámico.

2.2.3 Medidores de Longitud de Onda

El medidor de longitud de onda, es esencialmente un interferómetro Michelson. Así como el espejo móvil en el brazo de referencia del interferómetro es desplazado, la interferencia entre la luz de los dos brazos causará la señal capturada por el detector a variar: sinusoidalmente para entrada de luz monocromática y en una forma más compleja para una entrada con varias longitudes de onda. La señal eléctrica de salida es “deconvolucionada” – usualmente usando algoritmos para la transformada rápida de Fourier (FFT)- y así se establece el espectro de la entrada.

El medidor de longitud de onda puede ser definido por el mismo criterio que fue usado para el OSA, pero estas fortalezas y debilidades son un poco diferentes. Primero, porque toda la fuente de energía es usada todo el tiempo, las medidas a través de una región espectral o en diferentes longitudes de onda son efectuadas realmente en paralelo, a diferencia de los OSA, donde el detector únicamente busca una región espectral muy pequeña en cada momento. Esto es conveniente para las medidas de un canal ancho y rápido. La alta precisión en la información de las longitudes de onda relativas se extrae desde la señal por medios computacionales -La FFT- y una longitud de onda absoluta de referencia –un láser HeNe- está usualmente dentro de los instrumentos. Por lo tanto, la precisión absoluta total es alta, mejor que 0.005 nm; ciertamente adecuada para verificación detallada de la posición en sistemas WDM de 80 canales, por ejemplo.

2.3 COMPONENTES TÍPICOS EN PRUEBAS COMBINADAS

Para realizar las medidas dependientes de las longitudes de onda en la caracterización de los componentes DWDM pueden ser combinadas fuentes de banda ancha y sintonizables de muchas maneras. A continuación se presenta una discusión de algunas de las situaciones comunes, usando multiplexores (o demultiplexores) en prueba como un ejemplo.

Primero, necesitamos introducir unos principios generales. Si sólo uno de los pares fuente / receptor posee banda angosta, obviamente que el elemento determinará la resolución del espectro resultante. Si ambos son de banda angosta, no obstante, alguno puede ser el dominante, dependiendo de la técnica usada.

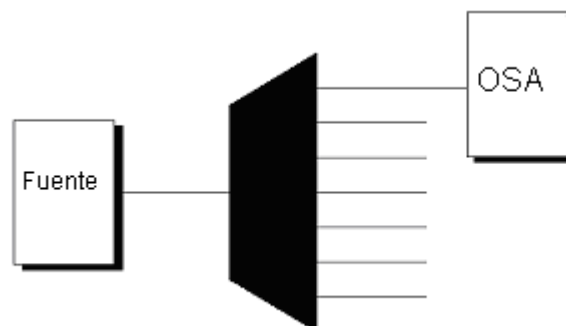


Figura 2.05 El OSA localizado después del mux caracteriza el dispositivo

2.3.1 Multiplexores / Demultiplexores

Los multiplexores y demultiplexores son componentes importantes de los sistemas DWDM, y su ancho de banda, diafonía, pérdidas por inserción, pérdidas de retorno, aislamiento y propiedades de polarización son críticas en el

funcionamiento de la red. Los atributos espectrales deseados de varios otros componentes DWDM son muy similares a los necesarios en multiplexores y demultiplexores (o, más particularmente, en canales individuales mux / demux), y los procedimientos de prueba para estos dispositivos son incluidos en esta sección.

Pérdidas por inserción

La figura 2.06 muestra un sistema típico para determinar las pérdidas por inserción de un mux / demux DWDM. Se usa una fuente plana ASE de banda ancha, cuya salida cubre la banda DWDM. La salida del OSA será, por lo tanto, indicada directamente por la forma de las pérdidas por inserción. Una medida de referencia apropiada, definida por medio de la conexión de la fuente directamente al OSA, puede ser usada para convertir esta curva de pérdidas relativas a una absoluta. En este caso, la resolución espectral de la medida es limitada por la RBW y su forma.

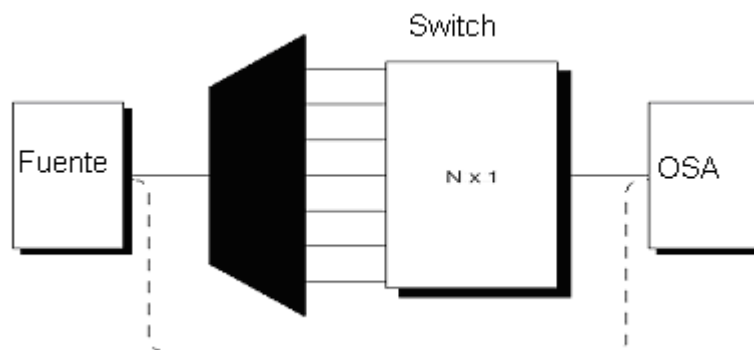


Figura 2.06 La fuente ASE dispara a través del mux mientras el OSA recibe la señal para cada puerto de salida

El switch 1 x N es incluido para facilitar o hasta automatizar la prueba de dispositivos multicanal. Todos los componentes medidos deben tener baja sensibilidad del estado de polarización.

Pérdidas dependientes de la polarización

El espectro de las pérdidas dependientes de la polarización (PDL) puede ser medido usando un sistema similar: Una fuente de banda ancha y un OSA. Debe hacerse un número de escaneos OSA en diferentes estados de polarización, aleatoriamente seleccionados. La diferencia entre las pérdidas máxima y mínima medidas es la PDL. El Software para realizar los cálculos usualmente se puede conseguir. La precisión de la medida final incrementa con el número de escaneos hechos.

Las PDL son también frecuentemente medidas usando una fuente de longitud de onda simple, un controlador de polarización y un OSA o medidor de potencia, como se muestra en la figura 2.07. El controlador de polarización varía el estado de la señal de polarización rápidamente y casi aleatoriamente, mientras el OSA o medidor de potencia compara el nivel de la señal óptica enviada al dispositivo bajo prueba con la transmitida a través de él. Ambas PDL e IL (pérdidas por inserción) pueden ser determinadas en una longitud de onda simple en 2 a 5 segundos dependiendo del nivel aceptable de incertidumbre.

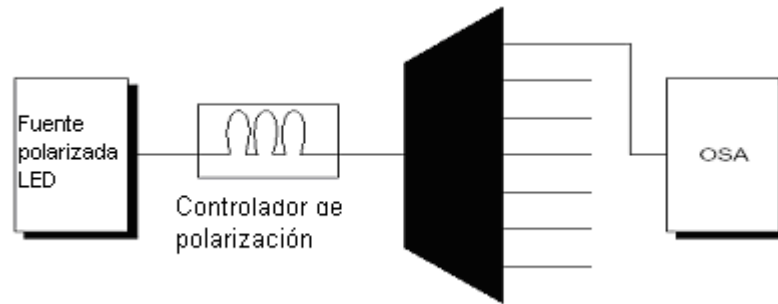


Figura 2.07 En este arreglo, un controlador polarizado es agregado para medir PDL

Para muchos componentes en DWDM –filtros y rejillas de Bragg, además de multiplexores y demultiplexores- las PDL deben ser medidas como una función de la longitud de onda. Para lograr esto, una fuente láser sintonizable puede ser substituida por la fuente fija en la configuración mostrada.

Los valores de PDL comunes para muchos componentes son muy bajos, por ende hay que tener mucho cuidado de compensar cualquier PDL introducido por la misma técnica de medida. Los módulos de medida de PDL disponibles generalmente incluyen un canal de referencia para eliminar las necesidades de cualquier compensación manual.

Método Mueller-Stokes de medida de PDL

Es posible representar una onda óptica como vectores matemáticos llamados vectores de Stokes (S). Los elementos que constituyen los vectores son medidas de potencia fácilmente obtenidas con una fuente, polarizador o detector. La señal de entrada (vector de entrada) será cambiada por el DUT y resultará un nuevo vector Stokes. El efecto completo DUT en la polarización de la luz puede representarse luego en una matriz. Esta matriz 4 x 4 representa la característica de transmisión del DUT.

Se necesitan cuatro entradas con estados de polarización diferentes para determinar los cuatro parámetros de la matriz Mueller. El controlador de polarización (Figura 2.07) genera estos cuatro estados de polarización. Después de la medida de referencia entre el polarizador y el detector, con respecto a cada

estado de polarización, y después que el elemento Mueller es calculado con el coeficiente de transmisión, la PDL es obtenida con:

$$\text{PDL (dB)} = 10 \log (T_{\min}/T_{\max})$$

Este método es rápido y requiere equipo de bajo costo. Las PDL podrían ser medidas también como una función de la longitud de onda usando un láser sintonizable en modo de barrido. Sin embargo, el método Mueller-Stoker es sensible a la manipulación de patchcords. Este método es ideal para sistemas de prueba automatizados, como se describe más adelante.

Un parámetro relacionado con la polarización dependiente del ancho de banda (PDBW), puede ser similarmente medido. Esta característica espectral de un dispositivo de filtrado óptico es la diferencia entre el mínimo y el máximo ancho de banda cuando el canal es medido bajo todos los estados de polarización:

$$\text{PDBW} = Bw_{\max} - Bw_{\min}$$

La precisión de las medidas incrementa con el número de estados de polarización examinados, pero hay obviamente un límite práctico para este número, varios minutos de medidas continuas son normalmente suficientes.

La polarización dependiente de la longitud de onda central (PDCW) –el cambio en la longitud de onda central de un filtro pasabanda bajo diferentes estados de polarización- puede ser medidas similarmente. Ciertos componentes muestran valores altos de PDCW (1 nm o más), los cuales pueden afectar seriamente el comportamiento de la red.

La diafonía (Crosstalk)

La diafonía entre canales DWDM se mide reemplazando la fuente ASE usada en los sistemas anteriores por una fuente láser sintonizable con un ancho de línea estrecho. Se deben realizar escaneos OSA repetidos en todos los canales de los multiplexores y demultiplexores mientras se escala la fuente sintonizable sobre la región de longitud de onda de interés a la resolución deseada. La resolución medida es determinada por los pasos del láser sintonizable, no por el OSA, pero las curvas de pérdidas con una resolución tan alta como 0.001 nm pueden ser obtenidas con un rango dinámico excelente. El procedimiento lleva tiempo, sin embargo, especialmente para DUTs multicanal. Un medidor de longitud de onda debe usarse para la calibración, a menos que un medidor de potencia multicanal este disponible.

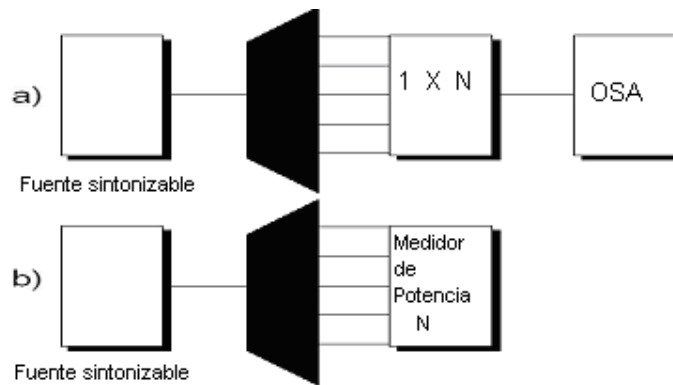


Figura 2.08 La diafonía puede ser medida usando a) Un láser sintonizable con un OSA o b) Un láser sintonizable con medidores de potencia

Pérdidas ópticas por retorno

Las pérdidas ópticas por retorno (ORL) son medidas usando la combinación de una fuente, un acoplador y un fotodetector, usualmente referido como un reflectómetro de onda óptica continua (OCWR). Después de un paso de calibración, en el cual un componente con una reflectancia conocida es substituido por el DUT, el DUT es insertado. El detector entonces mide la potencia que él refleja, un factor de corrección basado en los pasos de calibración es aplicado, y las ORL son mostradas. Con una potencia alta, una fuente óptica no-coherente y un sistema de detección de alta sensibilidad y alta resolución, las pérdidas por retorno de 70 dB o más bajas pueden ser detectadas y medidas con esta configuración.

Las ORL pueden depender de la longitud de onda. Si esta dependencia debe ser caracterizada, puede usarse una potencia alta, láser sintonizable de coherencia moderada o una fuente de banda ancha (un láser ASE) como la fuente en la configuración descrita, con un OSA usado como detector (Figura 2.09). Sin embargo, dependiendo del rango dinámico limitado de un OSA, será difícil obtener ORLs menores a -40 dB.

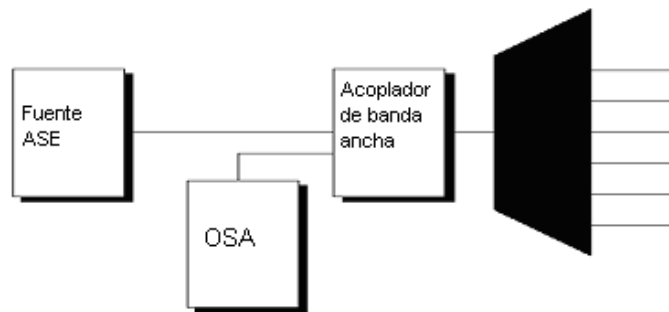


Figura 2.09 Medidas de ORL dependientes de la longitud de onda

Ancho de banda

El ancho de banda óptico se mide usando un procedimiento muy similar al usado para medir pérdidas por inserción. La característica espectral de un sistema medido puede obtenerse con una medida de referencia. Un sistema típico se muestra en la figura 2.10.

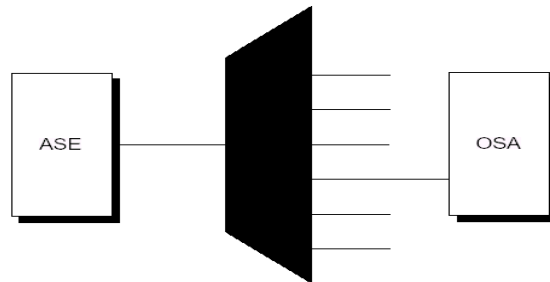


Figura 2.10 Este sistema tan simple provee las características de ancho de banda, usando una fuente ASE y un OSA

Si los límites de la banda deben ser caracterizados precisamente –a una resolución espectral menor que 0.1 nm, por ejemplo –una configuración alternativa debe ser usada, con una fuente sintonizable y un medidor de potencia o OSA (Figura 2.11). Aquí la resolución espectral es limitada por la resolución sintonizable de la fuente (probablemente cerca de 0.01 nm), y el rango dinámico de la banda lateral de rechazo de la fuente sintonizable. La sensibilidad se determina por la del medidor de potencia (probablemente –100 dBm).

Muchas de las medidas ya discutidas comparten los equipos de prueba en similares configuraciones, de manera que ellos pueden fácilmente ser combinados. Esta propuesta es particularmente atractiva cuando los métodos de prueba están siendo automatizados.

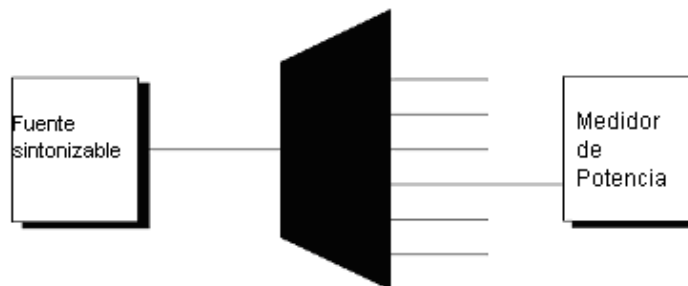


Figura 2.11 Una alternativa para las medidas de ancho de banda con una fuente sintonizable y un medidor de potencia

La configuración mostrada en la figura 2.12, por ejemplo, usa una fuente láser sintonizable de bajo ruido (TLS) que escanea a lo largo de las longitudes de onda de interés, mientras al mismo tiempo, medidores de potencia multicanal reciben datos transmitidos por cada canal del DUT. Con este tipo de sistema de instrumentación, el tiempo de medida es independiente del número de canales por dispositivo. Esto particularmente conviene a las pruebas automatizadas de los componentes multicanal. La parte alta de la figura indica como incorporar un interruptor en el sistema de medida que puede habilitar otros dispositivos para ser preparados para pruebas mientras una prueba en particular es ejecutada, usando mucho equipo en común.

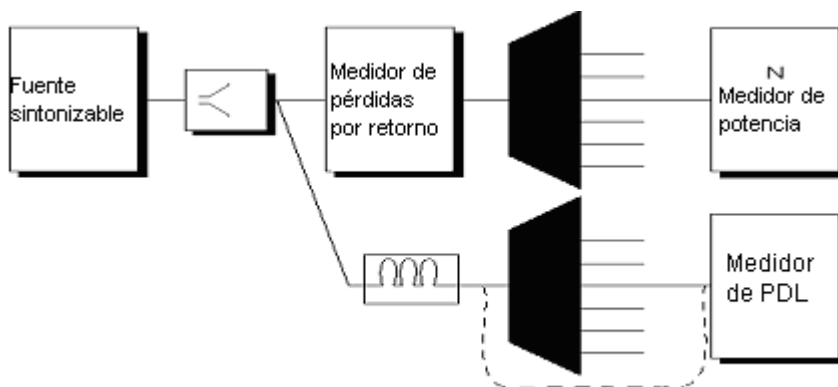


Figura 2.12 Sistema de prueba automatizado que mide PDL, pérdidas por inserción y ORL

La resolución de la medida es determinada por la TLS, y la medida del rango dinámico es determinada por la emisión espontánea (o ruido) de la fuente, el rango dinámico y la sensibilidad del medidor de potencia. Usando una TLS, como una fibra láser, un rango dinámico de más de 65 dB se alcanza fácilmente. El diagrama también muestra como las medidas de ORL y PDL son integradas en los procesos. Con esta disposición es fácil agregar medidores de potencia adicionales para apoyar los dispositivos que tengan muchos canales.

Dispersión por modo de polarización (PMD)

Se usa un conjunto de pruebas para medir la PMD. Existen cuatro métodos:

- Jones Matrix Eigenanalysis (JME)
- El método de análisis de la esfera de Poincaré (PSA)
- La técnica del escaneo de longitud de onda/analizador fijo (WSFA)
- El método interferométrico (IM)

JME y PSA son métodos polarimétricos que obtienen el retardo diferencial de grupo (DGD) como una función de la frecuencia óptica o longitud de onda, mientras IM y WSFA miden la PMD en el dominio del tiempo y son particularmente

apropiadas para la caracterización de dispositivos de banda ancha. Se han planteado otros métodos, por ejemplo la modulación por desplazamiento de fase.

2.3.2 Switches

Los switches ópticos se prueban, usando una fuente y un medidor de potencia multicanal (ver la configuración mostrada en la figura 2.13).

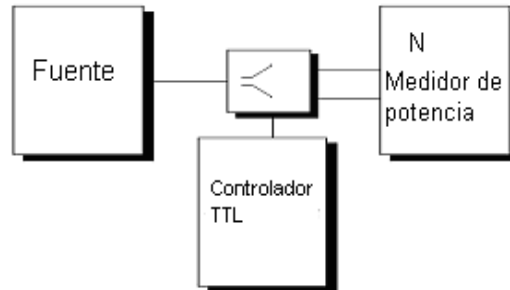


Figura 2.13 El medidor de potencia de alta velocidad hace posible probar los switches actuales

La velocidad de switcheo es usualmente una característica de considerable interés, de modo que una tasa alta de muestreo y rápida estabilización son cualidades esenciales en los medidores de potencia. Si las pruebas son para ser automatizadas a cualquier magnitud, los medidores de potencia deben ser capaces de reconocer, y ser accionados por señales eléctricas que manejen el switch. La facilidad en las lecturas adecuadas son también necesarias para ambas, velocidad de switcheo y diafonía intracanal.

Las pérdidas, la diafonía y el comportamiento transitorio de los elementos de switcheo pueden ser críticos en las aplicaciones de la red, por lo tanto la instrumentación usada para caracterizarlos debe ofrecer un rango dinámico muy alto a tasas de medida muy altas.

2.3.3 Fuentes Ópticas

La potencia de salida y la longitud de onda central de los diodos láser son parámetros críticos en aplicaciones WDM, y en la industria se necesitan métodos automáticos o al menos semiautomáticos para medirlos. Los medidores de longitud de onda y los medidores de potencia de rápida respuesta y muestreo rápido, se acoplan con switches ópticos apropiados para agilizar estas medidas.

La configuración de la prueba en la figura 2.14 realiza un barrido rápido de la potencia de salida contra la entrada láser actual para cuatro dispositivos al tiempo usando un medidor de potencia de cuatro canales. Una segunda medida de

longitud de onda en uno o más niveles específicos de potencia pueden realizarse después usando un switch óptico 1 x 4.

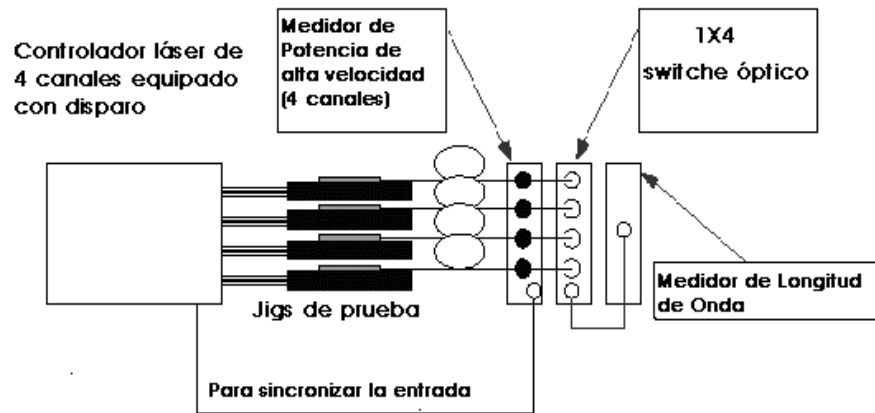


Figura 2.14 Caracterización de la fuente láser

La secuencia de medida es:

1. Un controlador provoca señales e inicia una rampa aplicada a todos los láser, que empieza justo debajo del umbral de emisión esperado.
2. El mismo disparo empieza el muestreo con el medidor de potencia en los canales de entrada. Si la tasa de cambio de la corriente de conducción es constante, la potencia de salida puede ser correlacionada exactamente con la entrada de corriente en todo el barrido. Con medidores de potencia de alta velocidad, muchos miles de datos pueden ser obtenidos en un segundo, suficiente para proveer una resolución adecuada en la región de umbral, incluso en un periodo corto de adquisición.
3. Después de obtener las características de corriente de salida contra la de conducción (también llamada curva L-I), el controlador puede fijar la corriente de cada dispositivo en un valor específico, ligeramente por encima del umbral, esto representa un nivel de potencia de operación típico. El medidor de longitud de onda puede luego ser usado para medir exactamente la longitud de onda.

2.3.4 Receptores

Se necesitan pruebas lineales para los fotodetectores de semiconductor, los cuales se saturan al aumentar la potencia de entrada. Este comportamiento mejora polarizando la unión p-i-n, pero se incrementa el ruido oscuro, el cual limita la medida de niveles de potencia muy bajos. Varias medidas tomadas para

incrementar un rango dinámico (pre-amplificadores de trans-impedancia, circuitos de control de ganancia automáticos, o pasos de amplificación fijos seleccionados automáticamente), tienden a incrementar el comportamiento no-lineal, especialmente en niveles muy bajos de señal o en el caso que se usen esquemas de amplificación mediante escalones discretos y que hayan sido calibrados inadecuadamente.

La configuración en la figura 2.15 muestra el sistema típico de una prueba lineal usando el método de superposición. Este método es fácilmente automatizado.

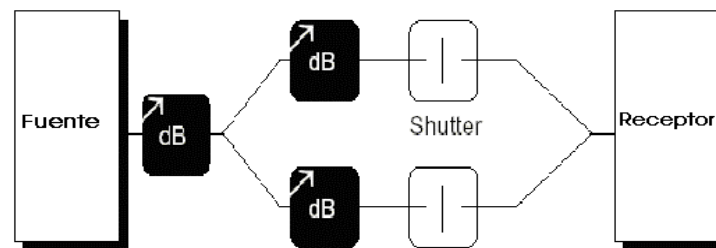


Figura 2.15 Sistema automatizado usado para caracterizar la sensibilidad del receptor y el tiempo de detección

2.3.5 Amplificadores de Fibra Óptica

Muchas características de un amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA) deben ser determinadas antes de que el dispositivo sea integrado dentro del diseño de una red efectiva. La ganancia es la más evidente, y esta debe ser medida usando la configuración del canal para el cual el dispositivo será usado. Para asegurar un tratamiento equitativo de todos los canales a través de la red completa, debe definirse la planeidad de la ganancia y tomarse pasos equitativos y apropiados. La ganancia también debe ser adecuadamente plana dentro de los canales individuales. La ganancia de pequeña señal debe también determinarse sobre toda la banda de longitudes de onda.

El ruido en un EDFA originado desde la misma emisión amplificada, debe ser medido a lo largo del espectro de operación para determinar la relación señal a ruido para el canal en operación. La sensibilidad de los dispositivos a la dispersión debe ser determinada y medida adecuadamente a partir del fenómeno de polarización común (PMD, PDL y la ganancia dependiente de la polarización o PDG).

Para determinar la dependencia espectral de un EDFA, una fuente láser sintonizable se conecta a su entrada a través de un atenuador variable. Un medidor de potencia se conecta al EDFA. Se usa generalmente un detector InGaAs o Ge dispuesto para medir los niveles de potencia por encima de +25 dBm, pero hay que tener cuidado cuando un detector Ge es usado en la ventana de los 1550 nm porque su respuesta espectral varía bruscamente en esta región.

La ganancia en pequeña señal se mide en cada longitud de onda, reduciendo la potencia de entrada a menos de -30 dBm, usando el atenuador variable. La potencia de entrada se incrementa después y se calcula la ganancia continuamente, buscando el punto, al cual la ganancia cae 3 dB. La medida descrita ofrece únicamente una aproximación de las características de ganancia espectral completa del dispositivo: este no toma en cuenta “la ganancia compartida” cuando todos los canales de señal están presentes. Esto, sin embargo, provee resultados adecuados para la estimación del presupuesto de pérdidas de la red.

Para obtener una descripción más completa de la balanza espectral, debe proveerse un número suficiente de fuentes para duplicar el número de canales esperados en la última aplicación. La señal de salida EDFA resultante puede ser examinada usando un medidor de potencia multicanal, OSA o medidor de longitud de onda. El procedimiento descrito para una fuente sencilla se sigue para cada canal en turno. Los otros canales diferentes al que se esta midiendo deben transportar potencia típica en condiciones de operación eventuales. Para algunas aplicaciones es importante conocer las pérdidas por inserción producidas por un EDFA pasivo, uno que no ha sido bombeado ópticamente. Este parámetro puede medirse como una función de la longitud de onda, usando una fuente de banda ancha, como un LED o un láser ASE, ambos con un detector OSA. La disposición física y el procedimiento de prueba son análogos para aquellos que solo describen las medidas de ganancia espectral y el resultado indica las pérdidas que se esperan al fallar el amplificador.

Las pérdidas por retorno de los EDFAs son usualmente dependientes de la longitud de onda, debido a los filtros, circuladores u otros componentes que son incluidos dentro del módulo amplificador. Una fuente láser sintonizable puede usarse, por un medidor de pérdidas por retorno, para caracterizar ésta dependencia espectral. Ambas son conectadas a la entrada del EDFA y no se bombea el dispositivo (figura 2.16 a).

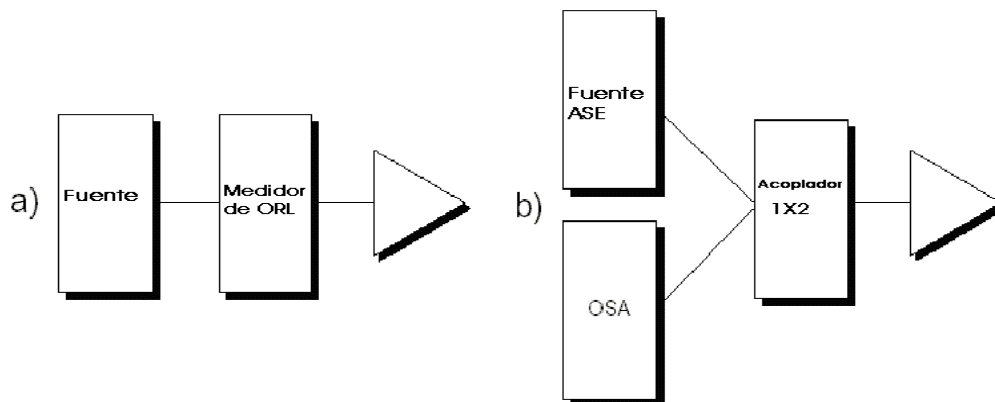


Figura 2.16 a y b Dos sistemas diferentes usados para medir ORL

Alternativamente, una fuente de banda ancha puede usarse –una fuente ASE, por ejemplo- y un OSA en una configuración similar, usando un acoplador 1 x 2 (Figura 2.16b).

Una descripción completa del comportamiento de un EDFA que está amplificando un número de canales debe tener en cuenta su propiedad de ganancia compartida y particularmente, las diferencias en sus propiedades a lo largo de la región espectral WDM. Un EDFA activo dividirá su ganancia entre el número de canales presentes en su entrada. La potencia de salida del EDFA es constante, de modo que si alguno de los canales de entrada es removido, la ganancia aplicada a las señales restantes debe cambiar para mantener la potencia de salida. Esta redistribución de ganancia será levemente diferente, dependiendo de los cambios en el contenido espectral de entrada, es decir, debido a los canales de entrada que fueron removidos. La figura 2.17 muestra un sistema de prueba para medir este efecto. Se representa cada canal de entrada por medio de fuentes adecuadas a la entrada del EDFA, probablemente a través de un atenuador variable espectralmente plano usado para ajustar la potencia total a un valor típico de la aplicación de la red. Un OSA analiza la salida del EDFA. Las características de redistribución de la ganancia espectral del EDFA y la estabilidad del espectro entregado son medidas donde las fuentes láser se van eliminando una por una, y se observa la distribución de la potencia de salida en los canales restantes.

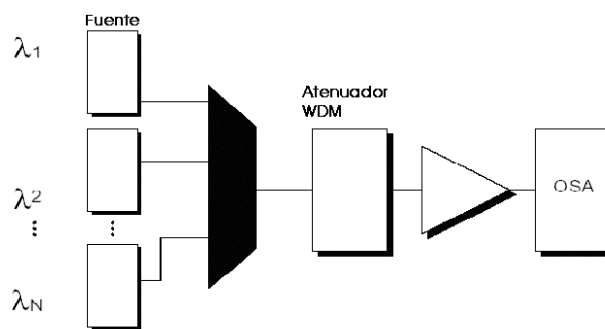


Figura 2.17 Las medidas del OSA en la redistribución de la ganancia espectral del EDFA como una función de las señales de entrada atenuadas

Este tipo de medidas se prestan para la automatización, y módulos de pruebas de configuración, están disponibles para realizar las medidas adecuadas y analizar sus resultados.

Cada dispositivo activo en una red está sujeto a reflexiones: potencia reflejada no deseada de componentes a lo largo del enlace. Esta energía reflejada puede afectar tanto los parámetros como la estabilidad de la potencia continua, la estabilidad de longitud de onda, el ancho del espectro, y la interferencia multicamino. Aunque las reflexiones afectan los EDFAs en particular, pueden

utilizarse ocasionalmente pruebas similares a las que se muestran a continuación para caracterizar otros dispositivos.

El sistema en la figura 2.18 prueba la sensibilidad de la potencia y las características de longitud de onda de dispositivos que presentan reflexión.

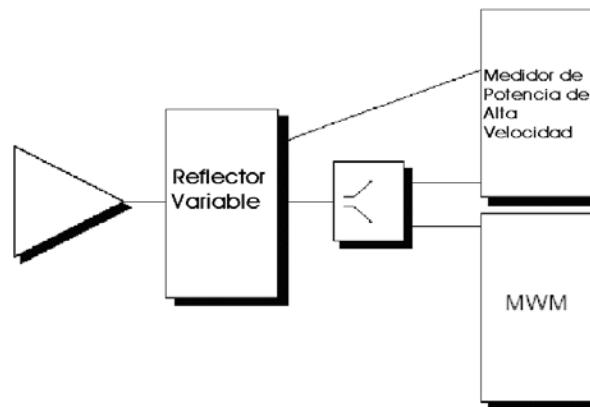


Figura 2.18 El medidor de potencia de alta velocidad detecta la luz reflejada de regreso al EDFA.

Configurando al nivel máximo la reflexión (la reflexión producida por una interface vidrio-aire: 4 % o -13.9 dB), uno puede revisar las fluctuaciones en las características de potencia y longitud de onda de los DUT, y así colocar límites confiables de aislamiento en el comportamiento actual. La relación señal a ruido óptico de un medidor de longitud de onda típico es adecuada para detectar la presencia de picos secundarios o cambios de longitud de onda de 1 pm.

La figura de ruido de un EDFA determina tanto las características de red costo-crítico como los requerimientos de la potencia de entrada y el espacio repetidor disponible. La precisión de las medidas de la figura de ruido es complicada por el hecho que el mayor contribuidor al ruido, la emisión espontánea amplificada (ASE), varía con el nivel de señal, de manera que no pueden ser usados métodos simples de medida de la figura de ruido que son adecuados en la mayoría de las aplicaciones electrónicas –medidas de salida en la ausencia de la señal de entrada-. Hay cuatro maneras comunes para superar esta dificultad: tres ópticas y una eléctrica.

Los métodos ópticos son interpolación, polarización nula, y extinción en el dominio del tiempo.

La interpolación involucra medidas a la salida del amplificador sobre un rango espectral amplio, con una señal presente. El ASE dentro del ancho de banda de la señal es estimado por los niveles de salida interpolados.

Pero si la fuente usada en las medidas tiene un ruido ASE considerable en la longitud de onda de la señal, éste será amplificado e irreconocible desde el amplificador ASE, incrementando la figura de ruido aparente. Este efecto es particularmente molesto para encontrar las potencias de entrada relativamente altas en aplicaciones de repetidores amplificados, especialmente si el amplificador no es operado en una región de ganancia saturada.

Las fuentes ASE, determinadas por otras medidas, pueden ser obtenidas mediante la siguiente expresión:

$$P_{\text{amp ASE}}(\lambda_s) = P_{\text{tot ASE}} - G \times P_{\text{SSE}}$$

Donde, $P_{\text{amp ASE}}$ es la verdadera amplificación ASE en la señal de longitud de onda λ_s , $P_{\text{tot ASE}}$ es la ASE total medida, G es la ganancia del amplificador, y P_{SSE} es la fuente ASE. Este método simple y barato es rápido y efectivo, pero es sensible a emisiones espontáneas en las fuentes usadas.

Un método óptico de medida un poco más complejo –la polarización nula- puede usarse para eliminar los efectos de las emisiones espontáneas de las fuentes (SSE). Este se basa en el hecho que la señal del láser es polarizada, mientras las ASE del EDFA no lo son. Esto también supone que las SSE son polarizadas en el mismo estado que la señal de la fuente. Un polarizador es usado para eliminar la señal de la fuente; la señal que queda en la banda de la longitud de onda medida es la mitad de la ASE.

El método de polarización nula generalmente no es sensible a SSE y es particularmente aplicable en estudios de ASE detallados. Sin embargo, es difícil de automatizar y puede ser afectado por PMD.

El tercer método óptico, extinción en el dominio del tiempo, es basado en el hecho que los mecanismos que gobiernan los cambios en portadoras populares en un EDFA son relativamente lentos, y hay un periodo de un milisegundo o un poco más, donde una señal desaparece antes de que la correspondiente generación ASE termine. Así, las ASE en el ancho de banda de un canal pueden ser observadas buscando en la potencia de salida de este canal inmediatamente después de que la señal de entrada del canal se retira.

La medida debe ser hecha rápidamente –en aproximadamente 10 ms- de manera que los requerimientos para sincronización exacta son altos. A pesar de su complicación y los costos, el método es muy utilizado en estudios detallados de otras características como la pendiente de ganancia de un amplificador.

El método de extinción en el dominio del tiempo de medidas de ruido es limitado para amplificadores EDFA; la ganancia dinámica de los amplificadores ópticos de semiconductor es demasiado rápida para usarse.

El método eléctrico de ruido medido, conocido como substracción de la intensidad de ruido relativo (RIN), se basa en medidas de variación de la intensidad de la portadora óptica como una función de la frecuencia.

La medida del RIN busca las variaciones de alta frecuencia en la intensidad de una portadora óptica nominalmente constante, evidenciada como variaciones de la señal eléctrica. Una fuente de ruido de impacto limitado alimenta el DUT, un detector de ruido bajo, rápido y calibrado y un amplificador RF alimenta su salida, como una señal para un analizador de espectro eléctrico (ESA), como se muestra en la figura 2.19.

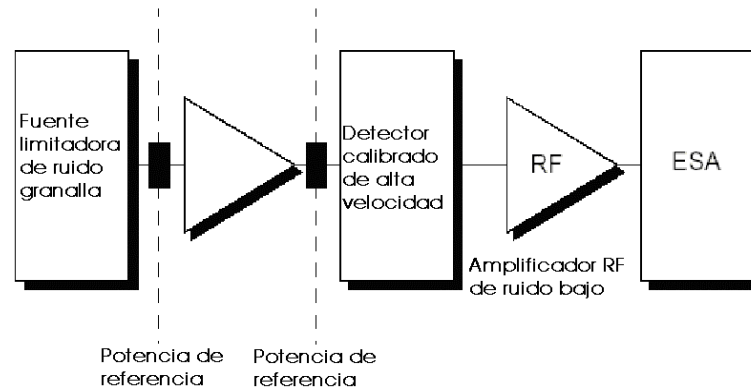


Figura 2.19 Método de substracción RIN para la determinación de la figura de ruido del EDFA.

La figura de ruido de los DUT, la cual puede provenir de un amplificador óptico o un sistema completo de extremo a extremo, puede ser determinada desde el “piso” de la señal graficada contra frecuencia (Figura 2.20)

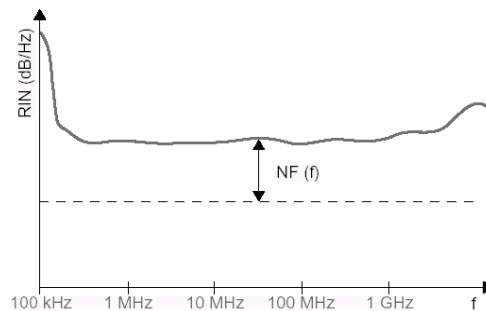


Figura 2.20 Medida de RIN típica de un EDFA

El método RIN es particularmente adecuado para detectar el efecto de la interferencia multicamino (MPI) producida por reflexiones hechas en discontinuidades o desalineamiento en los dispositivos; efectos que no son detectados por los métodos ópticos discutidos. Pero la substracción RIN es costosa para su desarrollo, en la medida que requiera instrumentación de ruido muy bajo y calibración precisa.

Efectos de la polarización

Un analizador PMD basado en una técnica interferométrica puede medir la PMD inherente de un módulo EDFA no-activo, mientras el dispositivo no contenga filtros de banda angosta. Una fuente LED polarizada es usada, en una longitud de onda muy por encima de la banda de absorción fuerte de 1531 nm del erbio (Figura 2.21). Así como los métodos interferométricos revelarán también los efectos de interferencia de ruido multicamino, incluyendo, aquel causado por resultados espúreos de componentes etalons Fabry-Perot o empalmes de fibra defectuosos.

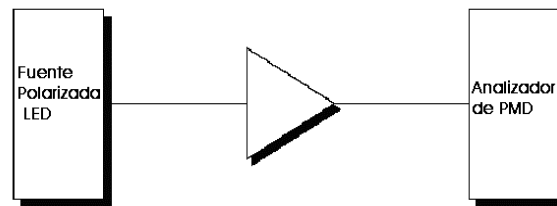


Figura 2.21 Sistema usado para medir PMD con un interferómetro basado en un analizador PMD

Los efectos fuertes de ruido MPI pueden ser detectados con una combinación simple de un detector tipo fotodiodo de alta velocidad y un osciloscopio. La MPI aparecerá como una señal senoidal (con armónicos) superpuesta en el ruido de fondo.

Los resultados pueden mejorarse reemplazando el osciloscopio por un analizador de espectro eléctrico, pero además, medidas válidas cuantitativas requieren una cuidadosa calibración del sistema completo de medida a lo largo del amplio rango de RF.

Aunque un EDFA no presente un ruido MPI considerable en uso normal, será diferente si es expuesto a niveles altos de potencia de la señal reflejada en su salida. Se usa un reflector variable para probar este efecto y un EDFA correctamente aislado debe permanecer estable en niveles de reflexión cercanos al 100 % (0 dB).

La ganancia dependiente de la polarización (PDG), dependiente de la longitud de onda es medida con una prueba PDL, una fuente adecuada –una selección de modelos fijos o un láser sintonizable- y un controlador de polarización (Figura 2.22). Un atenuador se requiere usualmente para mantener los niveles típicos de potencia de la red en operación.

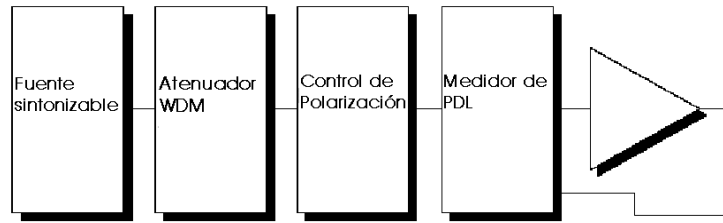


Figura 2.22 Medidas de la polarización dependiente de la longitud de onda dependiente de la ganancia del EDFA

Prueba bidireccional

Los EDFAs son usados con mucha frecuencia de manera bidireccional: para la amplificación de señales simultáneamente en ambas direcciones en un enlace. Todas las pruebas descritas pueden ser realizadas en ambas direcciones, usualmente en sucesión rápida usando un arreglo de interruptores como se muestra en la figura 2.23.

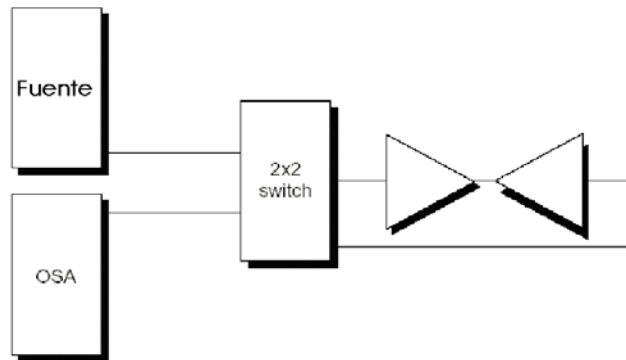


Figura 2.23 El switch 2 x 2 permite pruebas de forma bidireccional

2.3.6 Rejillas de Bragg

Los dispositivos que incorporan rejillas de Bragg (multiplexores, add/drop, filtros, etc) emplean reflexión espectral selectiva para cumplir con las tareas necesarias, así que su comportamiento espectral debe ser bien caracterizado. Un sistema de prueba similar al que se muestra en la figura 2.24 es usado frecuentemente para multiplexores. El sistema usa una fuente de banda ancha ASE y un medidor de longitud de onda.

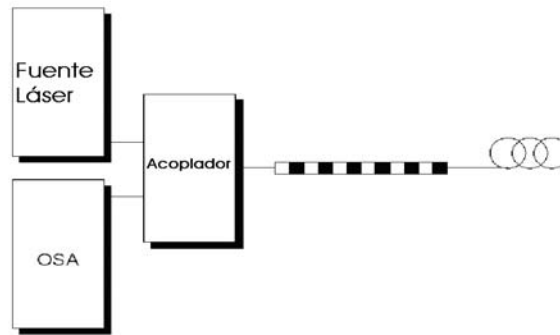


Figura 2.24 Sistema típico usado para medidas de reflectividad en rejillas de Bragg

El sistema de pérdida típico debe estar alrededor de 7-8 dB por canal. Las pérdidas por inserción medidas deben ser dos veces el valor de un paso.

2.3.7 Aisladores

Los aisladores ópticos son necesarios por toda la red de fibra para bloquear las reflexiones o ASE de retorno generadas, cualquiera de las cuales pueden romper la integridad de la señal. Las pérdidas por inserción y especialmente, pérdidas por retorno deben ser determinadas completamente en la banda de longitud de onda. Estas medidas pueden realizarse usando un láser sintonizable y un medidor de potencia, o en una fuente ASE de banda ancha y un OSA.

Las PDL pueden ser un factor significativo en el desempeño aislador, pero desde que no varíe respecto a la longitud de onda a lo largo de la ventana DWDM de 1550 nm, una sola medida es suficiente (Figura 2.25)



Figura 2.25 Sistema para medidas de PDL de un aislador

Los aisladores están sujetos a otros efectos que son generalmente dependientes de la longitud de onda. Están sujetos a PMD, debido al rompimiento del aislamiento común y recombinación secuencial de los caminos ópticos internamente. Su construcción mecánica también los hace susceptibles a defectos pequeños que permiten efectos de etalon internos, causando

interferencia multicamino en el enlace. Los analizadores PMD están disponibles para caracterizar ambos fenómenos (Figura 2.26).

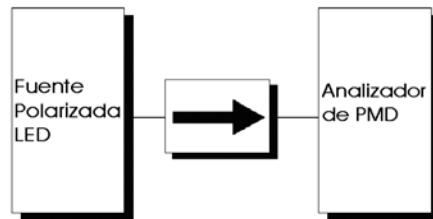


Figura 2.26 Medidas de PMD de un aislador

Muchas de las características dependientes de la longitud de onda de aisladores pueden ser medidas en un sistema de prueba simple usando un switch bidireccional (Figura 2.27).

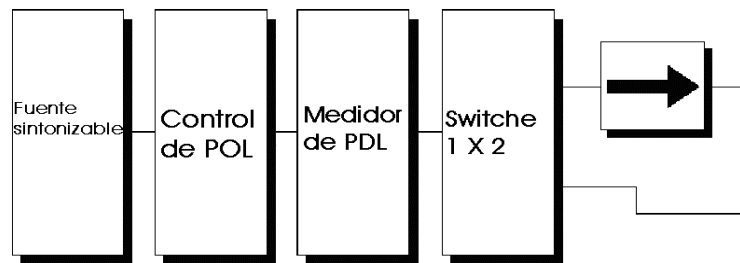


Figura 2.27 Las PDL son medidas como una función de la longitud de onda con este arreglo

2.3.8 Fibra

Dispersión Cromática

La dispersión cromática es una de las propiedades que más afectan el comportamiento de la fibra en enlaces de comunicación. Aunque, esta puede ser medida de diversas maneras, un método particularmente adecuado para la investigación del comportamiento en la banda de los 1550 nm es ilustrado en la figura 2.28.

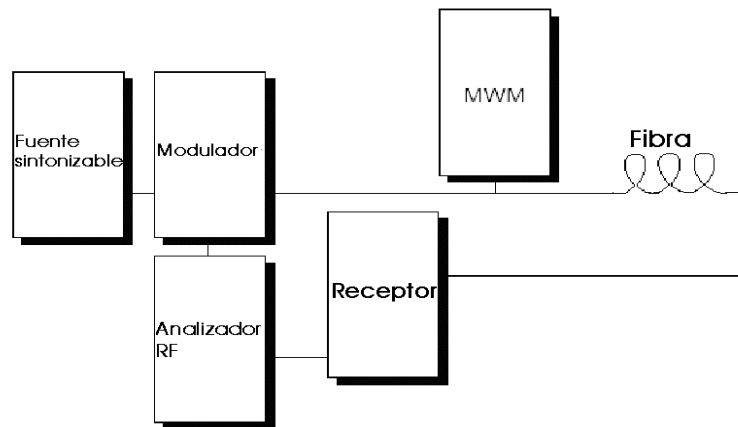


Figura 2.28 Sistema de medida típico para la dispersión cromática

Una señal proveniente de un láser sintonizable es modulada externamente por una señal de frecuencia tan alta como sea práctica. La longitud de onda de la fuente es monitoreada por una pequeña fracción de la señal en un medidor de longitud de onda. La señal transmitida por la fibra bajo prueba es recibida y la modulación RF es detectada. El retardo de grupo en esa longitud de onda de la señal puede luego ser derivada comparando la fase de la señal demodulada con ésta aplicada a la fuente. Escalonando la fuente a través del rango de longitudes de onda de interés se completa la gráfica de dispersión cromática.

Dispersión por Polarización Modal

No es práctico tratar de medir las PMD en tiempo real debido a las muy altas frecuencias involucradas. Hay cuatro métodos indirectos principales. Dos procedimientos de escaneo de longitudes de onda: conteo extremo y Transformada de Fourier. Los otros son los métodos interferométricos y muy cercanos a las técnicas polarimétricas: Análisis de valores propios de matrices de Jones (Jones Matrix Eigenanalysis, JME) y el análisis de la esfera de Poincaré (Poincaré Sphere Analysis PSA).

Hay dos formas comunes para expresar los resultados de una medición de PMD: la cantidad de desviación cuadrada del tiempo de vuelo y la cantidad de DGD. La primera aplica al método de escaneo de longitud de onda de la transformada de Fourier y el método interferométrico, la segunda a conteo extremo y JME.

Métodos de Escaneo de Longitud de Onda

Ambas técnicas de escaneo de longitud de onda –conteo extremo y transformada de Fourier- son ejecutados usando cualquiera de los dos sistemas mostrados en la figura 2.29.

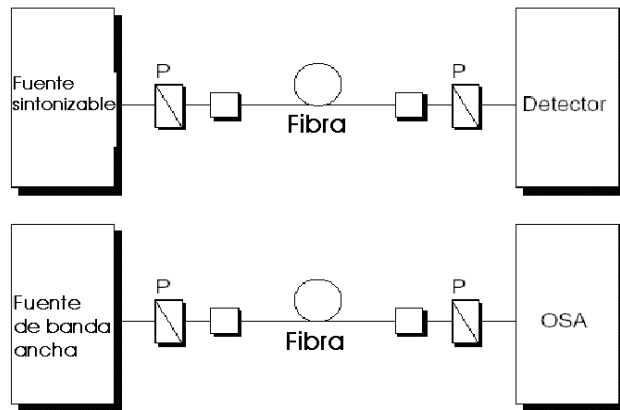


Figura 2.29 Sistema para escanear la longitud de onda

La transmisión contra la longitud de onda es graficada con la salida de ambas fuentes y un analizador polarizado fijo en la misma orientación. En la ausencia de birefringencia en la fibra, la luz polarizada de la fuente siempre alcanzará la polarización del analizador en el mismo ángulo, y la potencia de salida medida será constante. Pero si la fibra es birrefringente, la polarización de salida variará cíclicamente con la longitud de onda y su variación se mostrará a la salida.

Las dos medidas difieren en el tratamiento de la información de salida. En el primero, el extremo sobre un rango de longitudes de onda dado son contados y relacionados con la PMD matemáticamente. En el segundo, una transformada de Fourier (el cuadrado del segundo momento del arreglo Gaussiano) es aplicada al escaneo de longitudes de onda para extraer los parámetros PMD.

Algunas limitaciones que incluyen estas técnicas son:

- Medir valores grandes de PMD requieren pasos pequeños de longitud de onda y alta resolución.
- Incrementar la resolución de la longitud de onda reduce el rango dinámico.
- Para resultados precisos, el rango de longitudes de onda debe ser suficientemente grande para dar al menos una oscilación completa en la salida.
- La determinación del número de oscilaciones puede ser susceptible al ruido y es frecuentemente un asunto de interpretación.
- La coherencia de la fuente debe ser mucho más grande que el retardo de grupo del modo de polarización.
- La medida requiere mucho tiempo y además es sensible a la vibración en la fibra.
- Los métodos son sensibles a la polarización.

Métodos Interferométricos

La PMD puede ser medida usando un ancho de banda, fuente polarizada y analizando la radiación transmitida con un interferómetro Michelson, como se muestra en la figura 2.30.

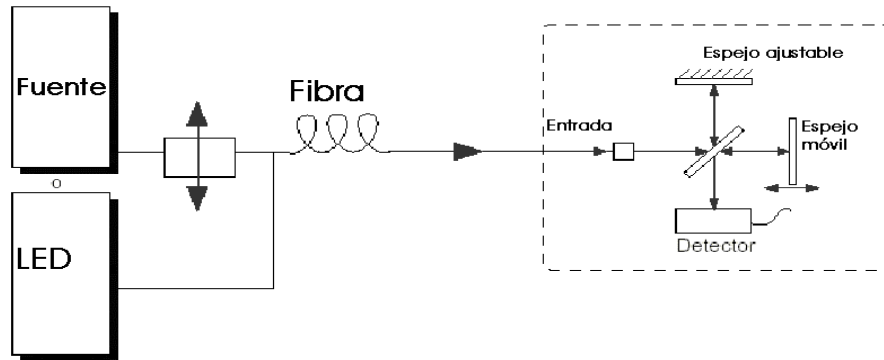


Figura 2.30 Medidas de PMD usando una señal polarizada y el interferómetro

La fuente es seleccionada para tener una longitud de onda central adecuada a la medida (1550 nm para sistemas modernos DWDM) y un tiempo de coherencia mucho más pequeño que la PMD de la fibra bajo prueba. El método interferométrico determina la autocorrelación del tiempo de ensanchamiento de esta fuente, dando la PMD directamente en la gráfica. El análisis asume que la forma espectral de la fuente es aproximadamente Gaussiano, sin rizo significativo, y esta condición debe ser verificada usando un OSA.

La fibra por si misma puede ser medida, generalmente para un número de estados de polarización de entrada diferentes (algunos de los cuales se acoplarán mejor en los ejes principales de la fibra de prueba). Si se necesita que los resultados estén sobre un rango de temperaturas, se recomiendan pasos de por lo menos 5°C para producir una variación significativa.

La PMD puede ser calculada a partir del resultado del interferograma de dos formas. La primera dependería del nivel de acoplamiento modal en la fibra en prueba. Si este acoplamiento es insignificante, como sería usual en el caso de fibra corta o un diseño para mantener la polarización, el interferograma mostrará un pico central fuerte que representa la autocorrelación de la fuente, y dos picos satélites simétricamente desplazados a partir del central junto al retardo de grupo de la fibra. Así, el valor de PMD es este desplazamiento (o la mitad del desplazamiento total entre los dos satélites) convertido al tiempo. La figura que se presenta generalmente es normalizada a una unidad de longitud de fibra dividida por la longitud de muestreo, dando unidades de ps/m o ps/Km.

En la traza de acoplamiento fuerte se eliminan los picos satélites, y la PMD debe determinarse por análisis, mediante:

$$\sqrt{\langle \Delta T^2 \rangle} = \sqrt{(3/4) \cdot \sigma}$$

Donde $\langle \Delta T \rangle$ es el retardo PMD y rms a la mitad del ancho de la función de autocorrelación, y σ es la desviación estándar Gaussiana. Debido a la contribución aleatoria del acoplamiento modal, el valor “normalizado” es referenciado a la raíz cuadrática de la unidad de longitud, resultando en unidades de ps/ \sqrt{m} o ps/ \sqrt{Km} .

La precisión de ambas medidas de análisis depende del número de puntos usados y, así, del tamaño y la precisión de los posibles desplazamientos del brazo móvil del interferómetro. La precisión del segundo método de análisis también depende de la habilidad para obtener una aproximación adecuada de la señal de ruido. Las experiencias basadas en muchas medidas repetidas indican que las precisiones de 5 a 10 % son posibles en la medida en que la razón señal a ruido de la salida sea aceptable y la PMD medida sea 1 ps o más, pero esa precisión puede fácilmente ser de 20 a 25 % para PMDs de 0.1 ps o menos.

El rango de desplazamiento total del brazo móvil del interferómetro determina el retardo PMD más grande medido. En la práctica, debe ser provisto suficiente desplazamiento para cubrir un valor PMD tres veces el esperado. La medida PMD mínima se determina por el tiempo de coherencia de la fuente (su ancho espectral) y en el número de picos observable en el interferograma.

La PMD de segundo orden, la cual es el cambio de PMD con la longitud de onda, está cercanamente relacionada con el fenómeno de primer orden y puede ser estimada a partir de:

$$PMD_2 = 2 \pi c (PMD_1)^2 / \lambda^2 \sqrt{3}$$

Donde PMD_1 es el coeficiente PMD de primer orden.

Así, por ejemplo, un coeficiente PMD de primer orden de 0.5 ps/ \sqrt{Km} estará acompañado por un efecto de segundo orden de cerca de 0.15 ps/nm.Km.

Requerimientos de las técnicas interferométricas:

- Mantener grandes valores de PMD requiere movimientos amplios del espejo interferómetro.
- La coherencia de la fuente debe ser mucho menor que el retardo a ser medido.

Características de las técnicas interferométricas:

- Medidas muy rápidas que las hacen insensibles a las vibraciones de la fibra.
- Adecuadas para uso de campo, porque el método no requiere acceso simultáneo para ambas fibras la de entrada y la de salida.
- Amplio rango dinámico.
- Sensible a las condiciones de sensibilidad a la polarización.

Métodos Polarimétricos

Las técnicas de medida PMD hasta ahora son suficientes para muchas aplicaciones prácticas, en particular para caracterizar fibras de exhibición fuerte, el acoplamiento modal aleatorio con al menos niveles moderados de PMD. El cubrimiento de todos los rangos de PMD en fibras con niveles arbitrariamente seleccionados de acoplamiento requieren mucho más detalle para buscar los parámetros polarimétricos bajo los cuales se describe el medio. Dos métodos son conocidos: Análisis de valores propios de matrices de Jones (JME) y el análisis de la esfera de Poincaré (PSA).

Ambos métodos involucran la inyección de una cantidad específica de señales polarizadas en la fibra u otro DUT y la caracterización completa del estado de polarización de las señales de salida para obtener los vectores Stokes correspondientes (normalizados) como una función de la frecuencia óptica.

El método JME comúnmente implantado para usar la configuración de fuente láser sintonizable es basado en una combinación de una fuente de banda ancha y un interferómetro. Un ajustador del estado de polarización lineal, la fibra o componente bajo prueba, y un polarímetro de cuatro puertos completo al sistema.

En el método PSA, Los retardos diferenciales de grupo (DGDs) son directamente obtenidos por medio de una combinación de las diferencias infinitas entre dos grupos de vectores Stokes de salida conseguidos en longitudes de onda vecinas.

Finalmente la PMD de una medida única es la característica de los DGDs sobre el rango de longitud de onda de interés.

Principales limitaciones de las técnicas polarimétricas

- Se requieren pequeños pasos de longitud de onda (aproximadamente 0.01 nm), o un recorrido interferométrico largo, cuando los valores de PMD medidos son grandes y/o medidas a través de dispositivos de banda angosta y/o cuando los DGDs muestran variaciones fuertes con respecto a la longitud de onda.
- Al Incrementar la resolución de la longitud de onda se reduce el rango dinámico.

- Se requiere un gran rango de longitudes de onda y pasos pequeños de longitudes de onda en el caso de fibras largas acopladas fuertemente para obtener salidas estáticas.

Limitaciones adicionales basados en una fuente láser sintonizable

- La coherencia de las fuentes tiene que ser mucho más grande que el retardo a ser medido para evitar la despolarización.
- La medida puede ser muy demorada (varios minutos) dependiendo del rango de longitudes de onda y el tamaño del paso.
- La medida es muy sensible a movimientos (efectos térmicos y vibratorios) cuando los dispositivos son probados con PMD pequeñas o cuando se usan pasos pequeños de longitud de onda.

Limitaciones adicionales basadas en una fuente de banda ancha e interferómetro

- Las PMD y PDL residuales del interferómetro.
- La coherencia de la fuente tiene que ser mucho más pequeña que el retardo a ser medido para evitar efectos coherentes indeseados en el interferómetro.

Tradicionalmente, el método JME ha sido comúnmente usado, porque este puede evitar las complicaciones de insertar señales de entrada polarizadas circularmente y esto es menos exigente en cuanto al tamaño del paso que se necesita en las longitudes de onda de entrada. Lo que no ocurre con el nuevo protocolo PMA. De hecho, el nuevo protocolo PMA, junto con una implementación usando una fuente de luz de banda ancha y un interferómetro en el receptor, reduce considerablemente la limitación principal de la aproximación de la fuente láser sintonizable. Debido a su muy rápida capacidad de medida, las distribuciones DGD obtenidas con el método PSA son mucho menos susceptibles a los cambios en las condiciones iniciales y ambientales. Esto abre la puerta para medidas PMD de alta precisión en las pruebas de producción tan buenas como las pruebas de campo.

2.4 SISTEMAS DE PRUEBA AUTOMATIZADOS PARA PROBAR COMPONENTES

Buscando acelerar las pruebas de componentes y aprovechar todas las ventajas de las posibilidades de automatización actuales, las compañías que realizan pruebas ópticas tienen que explotar todo el potencial de los sistemas de prueba. El sistema de prueba en componentes pasivos es una aproximación innovadora para la caracterización de los componentes DWDM. El sistema hace un barrido con muy bajo ruido, una fuente láser sintonizable, a lo largo de la banda espectral del DUT y, al mismo tiempo, mide la potencia en múltiples canales, de esta manera proporciona un tiempo corto de prueba que es prácticamente

independiente del número de puertos del dispositivo. Debido a las bajas SSEs de la fuente láser sintonizable, un rango dinámico de 60 dB se alcanza fácilmente. El módulo de referencia de longitud de onda asegura precisión suministrando una referencia de longitud de onda rápida y continua a lo largo del rango barrido.

El diseño del sistema ofrece la posibilidad de probar casi cada especificación: pérdidas por inserción, planeidad, rizo, diafonía, aislamiento, longitud de onda central, espacio del canal, potencia pico, ancho de banda y PDL. Las medidas PDL conforme al método de Matriz de Mueller son opcionales en sistemas diferentes y suministra PDL vs longitud de onda a lo largo del rango completo. Los barridos para la atenuación y las PDL se completan sin ninguna manipulación de la fibra.

La modularidad del sistema y la flexibilidad del software disponible para el usuario hacen que fácilmente se pueda ampliar para un número más alto de canales. El usuario puede empezar con un sistema de un sólo canal para medir filtros o rejillas y expandirlo a 32, 64 y más canales, simplemente adicionando los módulos plug-in necesarios.

En la mayoría de los sistemas, un software de alto nivel controlará todas las funciones de los instrumentos desde el inicio al final. Una aproximación paso a paso también ofrecerá un procedimiento de prueba sistemática que asegura resultados precisos con la posibilidad de ser repetidos. Numerosos aspectos – incluyendo detección automática Pass/Fail, máscaras de filtrado y una base de datos numérica- hacen de la caracterización de los componentes DWDM una tarea simple.

Los siguientes componentes pueden ser parte de los sistemas de prueba:

- **Plataforma:** Este es el controlador del sistema y se usa para controlar el proceso de medidas así como la interpretación y almacenamiento de los datos. El controlador será alimentado de manera que el sistema puede ser conectado a la red de área local (LAN).
- **Fuente:** Una fuente láser sintonizable puede ser usada como una fuente de luz de alta resolución para realizar la medida de la atenuación espectral. La fuente ASE es otra opción para aplicaciones de banda ancha dependiendo del DUT y las características de investigación.
- **Módulo de Referencia de Longitud de onda (WRM):** Éste módulo es usado para realizar numerosas funciones. Su principal propósito es asegurar la precisión en la longitud de onda. Sus funciones secundarias son proveer una potencia de referencia dinámica continua, proveer sincronización de todas las medidas de potencia, y tomar las medidas de las ORL.
- **Detector:** El medidor de potencia es la primera opción y es sincronizado con el WRM. El detector es usado para realizar la medida de potencia transmitida, la cual es comparada con la potencia de referencia WRM para calcular la

atenuación espectral del DUT. Las OSA pueden ser usadas para monitorear longitudes de onda y analizar el espectro.

- Calibrador del estado de polarización (PSA): El PSA es utilizado para producir cuatro estados de polarización conocidos (SOPs). Se realiza un barrido de la medida en cada estado y basado en los valores de atenuación para cada SOP, la PDL vs longitud de onda es calculada conforme a los algoritmos de la matriz de Mueller. El tiempo requerido para las medidas PDL es el tiempo necesario para realizar cuatro barridos.
- Unidad despolarizadora: Este componente se usa para determinar la señal láser sintonizable cuando las medidas PDL se están realizando. También puede ser usado para las medidas de atenuación donde se requieren las condiciones de una luz no polarizada.

El sistema software almacena los datos en una base de datos aparte para cada tipo de dispositivo usando una base de datos con software disponible comercialmente. Esta base de datos puede ser almacenada en cada equipo local o puede ser conectada a una LAN para almacenarse en cualquier unidad de la red. Los datos de prueba también pueden ser exportados en un formato .TXT delimitado, el cual es compatible con muchos programas de análisis y diferentes almacenadores. Este sistema de pruebas automatizado usa un software que ofrece la posibilidad de aumentar la confiabilidad, la repetitividad y la velocidad en sus procedimientos de prueba cuando las pruebas son realizadas en laboratorio, una oficina central o un cuarto ambiental.

2.5 CALIFICACIÓN AMBIENTAL

Afortunadamente, la naturaleza de las comunicaciones ópticas da a los componentes de fibra óptica una considerable inmunidad para muchos disturbios ambientales, en particular en los campos eléctrico y magnético. Y el empaquetado hermético los protege contra la humedad.

La temperatura es el principal factor ambiental de disturbio. Aunque en algunos casos la compensación de la temperatura se puede realizar en el dispositivo (por ejemplo, se dispone de acopladores bicónicos insensibles a la temperatura), en general la variación en el funcionamiento de los dispositivos con la temperatura debe ser medida y tomar estas medidas adecuadamente para compensar los efectos de la temperatura o para disponer cuartos de equipos a temperatura estable.

Muchas características de los EDFA son sensibles a la temperatura, incluyendo las variaciones en los tiempos. La dependencia de la temperatura en las variaciones de tiempo en la ganancia del espectro debe ser analizada sobre el rango de temperatura esperado y para todas –o al menos una muestra

representativa- de las longitudes de onda que se van a usar. Estas medidas son usualmente hechas por señales pequeñas y por otras en el punto de los 3 dB de compresión o en saturación, dependiendo de la última aplicación del amplificador (repetidor en línea o preamplificador).

Un grupo de fuentes fijas individuales, una por cada longitud de onda de canal, o una fuente ASE de banda ancha que cubra la banda completa puede usarse para permitir que todos los canales sean medidos simultáneamente. Un láser sintonizable se puede usar para medidas secuenciales. La elección determina el receptor apropiado para las medidas: un medidor múltiple de longitud de onda, un medidor de longitud de onda único, o un OSA.

Usualmente cada EDFA se prueba en una cámara ambiental, con temperatura y humedad controlada adecuadamente.

Afortunadamente, existen propuestas modulares para el diseño de equipo de prueba que simplifican la tarea. Los módulos que comparten comandos de lenguaje y estructuras pueden ser interconectados de muchas formas para resolver más necesidades en las mediciones, y el software de control conocido permite que los procedimientos de prueba sean programados en lenguajes de alto nivel. Los criterios de prueba pueden ser evaluados automáticamente y los detalles de las características espectrales pueden ser extraídos sin la intervención de un operador.

2.6 PRUEBA DE CAMPO

Una de las complicaciones que diferencian la producción en línea o los procedimientos de las pruebas de laboratorio es la necesidad de un lugar adecuado. Algunas medidas no pueden ser realizadas confiablemente en cualquier lugar, de manera que necesitan un ambiente controlado y estable. También, algunas medidas requieren capacidades de los equipos que, hasta hace poco, no estaban disponibles. Aunque la instalación del lugar convencional y el equipo de prueba es aún necesaria para trabajar muchos de los atributos básicos de enlaces que son independientes del modo de transmisión usado, ahora existen nuevos requerimientos de los instrumentos de prueba de la fibra óptica para trabajar con componentes DWDM y fenómenos ópticos complejos que los afectan.

2.6.1 Grupo de Pruebas de Pérdidas Ópticas

El grupo de pruebas de pérdidas ópticas (OLTS) usado en sistemas DWDM debe ser calibrado en exactamente longitudes de onda de canal definidas en la banda

de los 1525 a 1565 nm. Esto significa que las medidas de potencia adecuadas de canales individuales pueden ser tomadas a la salida de los demultiplexores.

Este grupo de pruebas será también utilizado en las longitudes de onda usadas para canales de supervisión óptica (OSCs): 1480 nm, 1510 nm y 1625 nm, dependiendo del diseño del sistema. Las fuentes de luz DFB dedicadas serán necesarias para revisar las pérdidas presupuestadas cuando la fibra es instalada. La mayor longitud de onda OSC, 1625 nm, requiere atención especial ya que ella se encuentra fuera del rango en el cual el fabricante del cable o la fibra garantiza el funcionamiento del producto. Las pruebas de pérdidas ópticas que incluyen capacidades en estas longitudes de onda se consiguen ahora comercialmente.

2.6.2 Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo

Durante la instalación se debe caracterizar la calidad del enlace en términos de pérdidas totales, atenuación de las distintas secciones, posición y pérdidas de inserción y retorno de los empalmes y conectores, además de la localización de posibles roturas. Estas tareas de medida se extienden al mantenimiento del enlace una vez instalado, debiéndose realizar de forma periódica para detectar posibles deterioros de la red. El reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR), es un equipo que permite realizar todo este tipo de medidas.

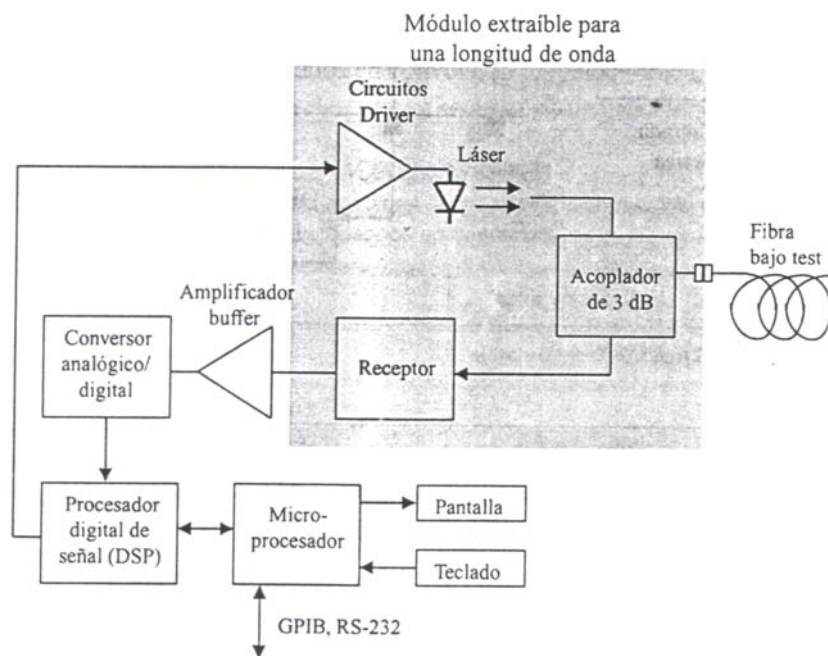


Figura 2.31 Esquema de bloques de un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR)

2.6.3 Medidor de Reflexión

En una red convencional WDM no densa, las pérdidas ópticas por retorno (ORL) pueden ser determinadas con una sola medida usando un medidor de reflexión en la longitud de onda de operación. Esta sola medida puede no ser suficiente para sistemas DWDM. Hay dos posibilidades: un conjunto de medidas que cubran la banda entera de longitudes de onda en uso o un reporte de resultados detallado para cada longitud de onda del canal. Aunque la primera es obviamente más rápida y puede proveer suficiente información para satisfacer una prueba de aceptación, las ORL pueden variar considerablemente de canal a canal. Esta variación con la longitud de onda puede ser causada por rejillas Bragg defectuosas o más frecuentemente, por malas conexiones en los puertos de salida de un multiplexor o demultiplexor. La excesiva reflexión puede causar inestabilidad en las fuentes láser DFB, las cuales afectan el funcionamiento global del sistema. Por lo tanto, la capacidad para realizar las medidas dependientes de la longitud de onda más complejas serán frecuentemente necesaria.

El valor de las ORL como una función de la longitud de onda es usualmente un parámetro intrínsecamente más útil, y éste puede ser esencial para determinar si la más simple prueba adicional fallará en un enlace particular. El valor es determinado usando una fuente de banda ancha, usualmente una fuente ASE. Se necesita alta potencia para proveer suficiente potencia en cada banda medida (la cual puede ser tan angosta como 0.1 nm) para dar una razón señal a ruido adecuada en el detector para el más bajo ORL de interés. El receptor es un OSA de sensibilidad y resolución espectral adecuada. El resultado es una lectura ORL individual para cada canal DWDM.

2.6.4 Prueba PMD

Las medidas de campo indican que no es poco común que la PMD en fibra cableada instalada es mucho más alta que en las fibras no cableadas. Teniendo la prueba del fabricante, la fibra puede proveer algunos grados de confianza, pero no hay garantía que la red provea las especificaciones requeridas.

La PMD instantánea para una longitud de onda específica puede variar a través del tiempo. Sin embargo, pruebas de funcionamiento con la técnica interferométrica en el campo muestra que el valor promedio de PMD es relativamente estable. Esto sugiere que el segundo momento calculado por la técnica interferométrica, la cual proporciona el valor promedio de PMD, es el mejor parámetro para caracterizar la PMD en fibras. Un parámetro estable permite comparar las fibras del mismo cable y esto permite el uso de un criterio Pass/Fail, el cual depende de la velocidad de la red y la tasa de error de bit (BER) que puede ser tolerado.

Esto es particularmente importante para medir PMD en condiciones que están conforme a la operación real de la red. Por ejemplo, algunos métodos de medida de PMD requieren que la fuente y el analizador estén en la misma ubicación no en lados opuestos de un enlace. Para determinar estos requerimientos para un solo enlace, uno debe ponerse a prueba para proveer una vía de retorno por un enlace paralelo que retorne al lado en prueba. Esta práctica presenta dos dificultades. Primero, una de las pruebas es necesariamente hecha en una dirección que no corresponde con su uso real. La segunda, porque los resultados de los dos enlaces separados son combinados en una sola medida, resultados Pass/Fail deducidos para cualquiera pueden ser incorrectos. Un simple ejemplo numérico explica este fenómeno:

Con acoplamiento modal fuerte, la PMD total para dos enlaces en cascada es:

$$PMD_{1+2} = ((PMD_1)^2 + (PMD_2)^2)^{1/2}$$

Donde PMD_{1+2} es la PMD total del enlace óptico, el cual esta compuesto por los enlaces 1 y 2.

Si el máximo PMD permitido para un enlace d longitud de 40 Km, es 2.5 ps ($0.4 \text{ ps/Km}^{1/2}$); y si dos enlaces de 40 Km se prueban, uno con PMD de 1,5 ps ($0.24 \text{ ps/Km}^{1/2}$) y el otro con 3 ps ($0.47 \text{ ps/Km}^{1/2}$), el resultado para 80 Km sería 3.35 ps ($0.37 \text{ ps/Km}^{1/2}$). Ambos enlaces serán declarados “buenos”, aunque uno de ellos obviamente, no lo es.

Similarmente, si un enlace tiene una PMD de 2 ps ($0.32 \text{ ps/Km}^{1/2}$) y el otro, 4 ps ($0.63 \text{ ps/Km}^{1/2}$), uno de 80 Km como 4.47 ps ($0.5 \text{ ps/Km}^{1/2}$) se obtendrá, indicando que ambos enlaces son malos; otra conclusión incorrecta. Se debe tener mucho cuidado cuando se prueban los enlaces en la configuración en la que ellos son utilizados.

No hay duda que la PMD llegará a ser crítica en redes de comunicación de alta velocidad como SONET. Aunque, el cable fabricado pueda ser medido por PMD en la planta, el cableado y la instalación frecuentemente introducirán curvas mecánicas y puntos de presión que alteraran su valor. Con el incremento en el uso de EDFAs para incrementar el tramo de fibra, todas las fuentes de dispersión deben ser controladas y minimizadas, de otra manera, las ganancias que estos dispositivos ofrecen se verán comprometidas por los efectos de la PMD.

La técnica interferométrica es la más conveniente para medidas de PMD en el campo. Esta es rápida, no requiere comunicación hardware o lazo cerrado, su gran rango dinámico permite valores grandes de PMD medidos sobre grandes distancias, y es insensible a la vibración de la fibra.

3 SISTEMA DE INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

La rápida evolución de la tecnología WDM y la necesidad de aplicarla rápidamente en el campo ha requerido procedimientos de prueba nuevos y avanzados. La tecnología WDM tiene el potencial para incrementar significativamente la capacidad de redes existentes, reducir el costo de la ampliación de redes incrementando el ancho de banda de enlaces existentes, y ofrecer nuevas opciones para el diseño de redes totalmente ópticas. Estos objetivos se logran únicamente asegurando la correcta operación de todos los componentes de la red por medio de extensas pruebas durante la instalación, y revisando el funcionamiento en marcha mediante procedimientos adecuados de mantenimiento.

Medir los parámetros ópticos y electrónicos del enlace es vital para asegurar que cada canal esta operando en la longitud de onda especificada y que todos los elementos de la red están alineados espectralmente de acuerdo a las especificaciones del diseño. Obviamente, una vez todos los componentes críticos son instalados, ellos deben ser probados nuevamente para asegurar que todavía proporcionan los requerimientos del sistema. Ellos deben ser probados antes de que el sistema sea puesto en operación y después debe hacerse un mantenimiento regular básico.

3.1 PARÁMETROS CRÍTICOS DE LOS SISTEMAS

Los parámetros críticos del sistema son diferentes para cada uno de los componentes individuales, de manera que después de que todos los componentes son ensamblados e instalados en una fibra, los parámetros deben ser caracterizados para cada fin de la red. Los efectos inducidos por los diferentes componentes son difíciles de prever porque en algunos casos ellos son añadidos, en otros casos aumentados y algunas veces removidos. Además, las condiciones ambientales externas, las distancias físicas y las ópticas, también como conectores y patchcords pueden crear problemas imprevistos en un solo componente. El funcionamiento total de un sistema de red WDM es basado en los siguientes factores principales:

1. El nivel de potencia de salida del transmisor, el cual debe ser tan grande y estable como sea posible para incrementar la longitud del tramo de transmisión, pero no para perjudicar los efectos no lineales.
2. El número de canales (el número de canales regula la tasa de modulación que define el ancho de banda del sistema total; por ejemplo: 40 longitudes de onda a 2.5 Gbps (STM-16 o OC-48) da un ancho de banda total del sistema de 100 Gbps).
3. La capacidad del espacio del canal en GHz (ITU-T ha definido un espacio de canal estándar de 100 GHz –cerca de 0.8 nm- en la rejilla ITU; 50 GHz

también se propone en la rejilla –cerca de 0.4 nm- y eventualmente se agregan valores mas bajos).

4. La tasa de modulación de transmisión láser en Gbps (comunicaciones long-haul estan presentes en tasas de STM-16 o OC-48 2.5 Gbps y STM-64 o OC-192 10 Gbps; las comunicaciones metropolitanas frecuentemente usan tasas mucho más bajas).
5. La ganancia de las EDFA (El ancho espectral y la amplitud; las ganancias de pequeña señal de 30 a 40 dB son típicas, mientras anchos espectrales de 40 nm son típicos en los EDFA de rango no extendido).
6. Ganancia del receptor (tan alta y estable como sea posible).
7. Tipo de fibra y especificaciones (parámetro crítico en el momento de definir la tasa de datos, la dispersión y las posibilidades máximas del canal).

3.1.1 Tasa de Error de Bit (BER)

Suponga que el instalador tiene un diseño tentativo para un enlace de datos en fibra óptica como se muestra en la figura 3.01. ¿Qué hace el instalador para analizarlo y encontrar sus requerimientos?



Figura 3.01 Típico enlace punto a punto desde la fuente al usuario.

Las condiciones de funcionamiento se caracterizan usualmente en términos de la tasa de error de bit (BER) aceptable, cuyo valor depende generalmente de la aplicación específica fuente-usuario. Esta puede ser tan alta como 10^{-3} para aplicaciones de voz digitalizada o tan baja como 10^{-12} para datos científicos. La tendencia es hacia requerimientos más y más bajos del BER. ¿El diseño tentativo del enlace proveerá el BER requerido? Para responder esta pregunta, debemos mirar la sensibilidad del receptor. Esta especificación indica cuanta potencia óptica debe recibir el enlace si ésta entrega el BER requerido.



Figura 3.02 Sistema BER usando un generador patrón tradicional.

Para determinar si el diseño tentativo del enlace puede entregar esta potencia, el instalador debe analizarlo, es decir, ir a los componentes del enlace para determinar exactamente cuanta potencia alcanzará el receptor. Esto se hace con un presupuesto de potencia del enlace de datos de fibra óptica.

Un presupuesto de potencia para un ejemplo en particular se presenta en la tabla. El enlace de fibra-óptica en cuestión tiene las siguientes características:

ENLACE	VALOR DEL ELEMENTO	COMENTARIO
Potencia de salida del LED transmisor	3 dBm	Valor especificado por vendor
Pérdidas por acoplamiento de la fuente	-5 dB	Provocadas por reflexiones, áreas mal acopladas, etc.
Pérdidas en conectores transmisor a cable	-1 dB	Transmisores en cable de fibra óptica con conector ST. Valores debidos a desalineamiento.
Pérdidas por empalme	-0.25 dB	Empalme mecánico
Atenuación en el cable de fibra óptica	-20 dB	De otras especificaciones o medidas.
Pérdidas en conectores cable receptor	-1 dB	Se asume un conector ST e incluye desalineamiento.
Pérdidas totales	-27.25 dB	La suma de las cinco figuras de pérdida.
Potencia óptica entregada al receptor	-24.25 dBm	Potencia de la fuente reducida por las pérdidas totales.
Sensibilidad del receptor	-40 dBm	Específico en el diseño del enlace.
Margen de pérdidas	15.75 dB	

Tabla 3.01 Presupuesto de Potencia

Obviamente, la potencia óptica en el receptor es más grande que la requerida para cumplir con el BER necesario. El valor de margen de pérdidas es significativo desde que especifique la cantidad de potencia óptica en que el receptor excede a la requerida. En este ejemplo, esto es 15.75 dB. Un buen diseño práctico requiere que este valor sea por lo menos 10 dB, porque no importa con que cuidado el presupuesto de potencia sea estimado, ya que algunos valores se olvidan y algunos son tomados de forma optimista. En otros casos las

especificaciones vendor arrojan valores incorrectos y se debe asignar un valor apropiado para el futuro mantenimiento.

3.1.2 Prueba de Pérdidas

Las pérdidas dependen de los componentes y son una función de la distancia de la señal óptica. Éstas deben ser determinadas en cada componente o subsistema, aún con productos de alta calidad. Las pérdidas son inevitables en conectores, multiplexores, demultiplexores y la misma fibra. La prueba de pérdidas es la principal evaluación del funcionamiento de un sistema o enlace. Las pérdidas individuales pueden ser medidas o interpretadas de acuerdo a la variedad de procedimientos y criterios, pero el resultado principal de la prueba de pérdidas es para proveer una figura del funcionamiento global del enlace en cuestión.

3.1.3 Pérdidas Ópticas por Retorno

Cuando la luz es inyectada en un componente de fibra-óptica, parte de la energía es reflejada. Las pérdidas ópticas por retorno están directamente asociadas con empalmes o conectores malos y componentes defectuosos. También podemos atribuir las pérdidas a las reflexiones que ocurren en interfases discretas como un resultado de burbujas de aire, desalineamiento e índices refractivos mal acoplados. La señal perderá potencia, la integridad del dato será alterada por interferencia multicamino, y la estabilidad de la fuente tenderá a bajar.

La pérdida es una función de la calidad y precisión de los componentes. Ésta fluctúa de un canal a otro y ésta es la razón principal para que muchas pruebas deban ser realizadas sobre el rango espectral completo. Los láseres de alto rendimiento usados en sistemas DWDM son muy sensibles a la luz reflejada, la cual puede degradar la estabilidad del láser y la razón señal a ruido, e incluso dañar la fuente. Las reflexiones pueden aparecer en los EDFAs y causar incrementos significativos en la figura de ruido. Todos estos problemas deben ser medidos antes y después de que la señal definitiva sea puesta en la red.

Pérdidas ópticas por retorno vs reflectancia

Los términos pérdidas ópticas por retorno y reflectancia son comúnmente usados para cuantificar la potencia reflejada. Las pérdidas ópticas por retorno o ORL son generalmente usadas para describir la reflexión total en un sistema o subsistema de una red de fibra óptica, medidas en una localidad específica.

$$\text{ORL (dB)} = 10 \log_{10} (\text{potencia incidente} / \text{potencia reflejada})$$

Las ORL, medidas en dB, son siempre positivas (la potencia incidente siempre es más grande que la potencia reflejada). Por ejemplo, si en un sistema interfase, hay 1 mW de potencia incidente y 1 μ W de potencia reflejada, las pérdidas por retorno son 30 dB. Un valor más alto significa una potencia reflejada mejor, por lo tanto, mejor funcionamiento.

La reflectancia se utiliza generalmente para describir la reflexión en una sola interfase o de otra manera el nivel de reflexión de un componente, por ejemplo un conector.

Aunque las ORL y la reflectancia son definidas de diferente manera, cada una representa una razón entre la potencia incidente y reflejada. Ambas son comúnmente expresadas en decibeles. La conversión de una a otra es simplemente cuestión de cambiar el signo.

Reflectancia (dB) = $10 \log_{10} \left(\frac{\text{potencia reflejada de la interfase específica}}{\text{potencia incidente}} \right)$.

La reflectancia, medida en dB, es siempre negativa (la potencia reflejada siempre es mayor que la potencia incidente). Por ejemplo, si en un conector, hay 1 mW de potencia incidente y 1 μ W de potencia reflejada, la reflectancia es -30 dB. Un valor más grande negativo significa menos potencia reflejada y por lo tanto, mejor rendimiento.

3.1.4 Relación Señal a Ruido Óptico

Aunque el BER es el mejor parámetro para caracterizar el funcionamiento de un enlace, éste se determina principalmente por la razón señal a ruido óptico (OSNR). Por lo tanto, cada vez que un sistema DWDM se instala, se determina la OSNR. Éste parámetro caracteriza la relación que existe entre la potencia pico y el ruido en el receptor para cada canal. Es un indicador de la facilidad de recuperar la señal recibida.

La OSNR se grafica como la relación entre la potencia señal a ruido en función de la longitud de onda. El valor medido a la salida del primer multiplexor, debe ser mayor a 40 dB para todos los canales. Éste valor se verá muy afectado con cualquier amplificador óptico en el enlace y caerá aproximadamente 20 dB al final del enlace dependiendo de su longitud, el número de EDFAs en cascada y la tasa de bits. Un EDFA no degradará la OSNR por más de 3 a 7 dB.

El ruido óptico, que es importante en sistema de transmisión a partir de la introducción de amplificadores ópticos, se debe principalmente a emisiones espontáneas amplificadas (ASE) en los EDFAs. Aunque los fabricantes siempre prueban los EDFAs individualmente, es importante revisar su funcionamiento con

todos los canales ópticos en operación y todos los amplificadores ópticos en cascada presentes, para confirmar que el funcionamiento global esperado se obtenga. La variación en la ganancia amerita especial atención en sistemas con múltiples amplificadores, en la medida que la planeidad de la potencia del sistema es directamente afectada. Las figuras de ruido ASE pueden ser particularmente significativas en algunas configuraciones, en la medida que este fenómeno degrada la relación señal a ruido en todos los canales ópticos.

La ganancia del sistema variará con el tiempo por los cambios de temperatura, la tensión local, la degradación de los componentes y las modificaciones en la red.

La OSNR debe ser determinada para cada canal en un sistema WDM. Se define a partir de la gráfica como:

$$\text{OSNR} = \text{valor en el peor de los casos de } (10 \text{ Log } (P_i / N_i) + 10 \text{ Log } (B_m / B_r)) \text{ dB}$$

Donde P_i es la potencia de la señal óptica en el i -ésimo canal. B_r es el ancho de banda óptico de referencia. (B_m y B_r pueden ser frecuencias o longitudes de onda); B_r es típicamente 0.1 nm. N_i es el valor interpolado de potencia de ruido medida en el ancho de banda equivalente de ruido, para el i -ésimo canal:

$$N_i = \frac{N(\lambda_i - \Delta\lambda) + N(\lambda_i + \Delta\lambda)}{2}$$

Donde $\Delta\lambda$ es el offset de interpolación igual o menor que la mitad del espacio del canal.

Las deficiencias en la OSNR deben ser distribuidas realizando algunos cambios, generalmente agregando amplificación óptica en puntos apropiados del enlace. La OSNR es obviamente un parámetro particularmente significativo a determinarse en enlaces entre operadores conectados como una medida de la calidad de la señal entregada.

3.1.5 La Ganancia

Las señales ópticas son modificadas muchas veces, al pasar desde la fuente hasta el último receptor en una red. En una red óptica que usa EDFAs, la ganancia de los canales individuales depende de la cantidad de canales en ese punto en particular, esto significa que se debe poder controlar la razón señal a ruido de cada canal para que permanezca adecuada en el receptor; las medidas en conjunto no son suficientes. Y por supuesto, significa que se debe estar dispuesto para determinar la causa de cualquier discrepancia. Aunque la totalidad de criterios deben estar basados en la potencia total y la potencia de cada canal, encontrar la causa de canales débiles puede requerir la capacidad para establecer la planeidad de la ganancia en amplificadores individuales, también como

investigar una variedad de efectos no lineales y de polarización. Todos requieren información espectral precisa acerca de la señal.

3.1.6 Longitud de Onda Central

La longitud de onda central de cada canal en la señal es probablemente la característica singular más importante, de acuerdo a su precisión se determina la capacidad de la fuente para comunicarse con el receptor.

El valor preciso de la longitud de onda central de cada canal debe medirse cuando la red es inicialmente instalada para asegurar que se cumple con las especificaciones del diseño. Estos valores también se deben monitorear durante programas de mantenimiento para detectar variaciones inaceptables. La precisión de la medida de la longitud de onda central incrementa en importancia a medida que los espacios y los anchos de banda del canal se reducen.

En una red óptica DWDM conmutada, se necesita una política planeada cuidadosamente y comprensiva para regir el uso de la longitud de onda, eliminar conflictos en la asignación de longitudes de onda y minimizar las posibles interacciones entre longitudes de onda. El estándar internacional para espacio de los canales ahora define múltiples integrados de 100 GHz (cerca de 0.8 nm). Este espacio fue seleccionado porque ofrece un buen compromiso entre alta capacidad y especificaciones exigentes de los componentes, pero éste todavía representa una tolerancia demandante para todo el equipo en la vía de transmisión. Un espaciado de 50 GHz se usa comúnmente para nuevas instalaciones.

Una separación de los canales de 100 GHz implica un ancho de banda muy estrecho, las variaciones espectrales en los láseres de realimentación distribuidos usados como fuentes de transmisión pueden tener efectos devastadores en los niveles de la señal en el receptor final. Por lo tanto, la estabilidad de las fuentes y la pureza espectral son de gran importancia. Los lóbulos laterales son también de particular interés, ya que ellos pueden aportar ruido a canales DWDM adyacentes. Aunque más viejos, los láser no estabilizados usados en redes SONET no tienen estos requerimientos, el equipo de transmisión existente puede ser mejorado para el uso de DWDM remplazando estas fuentes con modelos DFB estabilizados espectralmente. En algunos casos, el equipo instalado puede ser convertido a DWDM insertando señales láser OC-48 por DFB estabilizados.

3.1.7 Variaciones Indeseadas (Drift)

Las fuentes ópticas reales no son absolutamente estables ya que puede esperarse que varíen sus potencias de salida y sus longitudes de onda central. Las variaciones de potencia y la longitud de onda en el tiempo, por ejemplo, son

causadas por muchos factores como los cambios en la temperatura, las reflexiones y el fenómeno de chirp en el láser.

El principal interés respecto a las posibles variaciones es que la señal permanezca todo el tiempo dentro de los límites aceptables del canal en las condiciones de operación. Los cambios excesivos pueden causar la pérdida de la señal en el canal afectado. La fuente de variación puede afectar un canal adyacente e interferir desastrosamente la información que se transfiere. La variación debe ser medida y controlada para evitar la pérdida de los datos.

3.1.8 Diafonía (Crosstalk)

La diafonía –la contribución indeseada de energía de un canal a otros- es otro efecto al cual es difícil predecirle exactamente su magnitud antes de su instalación; este debe ser observado en la vida real, con señales reales presentes (o al menos simuladas).

Los cálculos de la diafonía fueron expuestos en la anterior sección. Éstos involucran un examen detallado de la forma de las bandas pasantes de los dos canales adyacentes para revisar que la cantidad de señal filtrada de una a la otra es insignificante. Normalmente, un mínimo de 25 dB se requiere entre canales, (pero 13 dB puede ser suficiente para un enlace submarino, y valores de 17 dB han sido tolerados en aplicaciones de transporte muy largas).

Los cálculos basados en medidas antes de la instalación no pueden proporcionar valores precisos; La diafonía debe ser revisada cuando todos los componentes de una red son ensamblados. Y también debe revisarse periódicamente durante el mantenimiento para asegurar la calidad de la señal transmitida.

3.1.9 Efectos No Lineales

Los efectos no lineales que no aparecen cuando se prueba la fibra pueden llegar a ser importantes una vez que la red es puesta en operación. Los cambios producidos una vez se interconectan los equipos y se instalan en el campo pueden traer cualquiera de los efectos analizados en la primera parte, y hay que tener cuidado –especialmente durante la instalación y también periódicamente en el mantenimiento- de controlar las perturbaciones no lineales.

3.1.10 Mezcla de Cuatro Ondas

Aunque la mezcla de cuatro ondas es también un efecto no lineal, éste requiere especial atención debido a la gravedad de sus consecuencias en la red. Cuando

dos señales ópticas interactúan de esta manera, la energía extraída de ellas puede aparecer en otras longitudes de onda en uso por otros canales, así la operación de la red sufre serios disturbios. Aunque el efecto es similar al de diafonía, sus efectos no son limitados a dos canales en conflicto. Su magnitud depende de la polarización relativa de las dos señales que interactúan, y también de su magnitud y el espaciado del canal.

La mezcla de cuatro ondas puede ser reducida incrementando el espaciado del canal o usando un espaciado de canal diferente; cualquiera de los dos es difícil de alcanzar después de que el diseño de la red es finalizado. Para redes aun no instaladas, se puede reducir el efecto usando una fibra con una cantidad adecuada de dispersión cromática. Desde que la mezcla de cuatro ondas pueda ser al menos potencialmente compensada, esto es importante para conocer su magnitud exacta.

3.1.11 Dispersión por Modo de Polarización

En tramos largos de fibra, la dispersión por modo de polarización surgirá debido a causas tales como la falta de homogeneidad inherente en la fibra, perturbaciones mecánicas en las curvas, soportes productores de tensión, y una variedad de efectos de temperatura. Debido a la naturaleza casi aleatoria de todos estos efectos, la caracterización más útil del fenómeno es el valor esperado de la variación del retardo de grupo (DGD), el valor rms del pulso ampliado. Aunque la DGD es una función de la temperatura y la longitud de onda, en muchos casos un solo valor de la mitad del rango será suficiente para predecir el punto en el cual sus efectos degradarán el funcionamiento de la red.

Se dijo que la característica de PMD –y así las unidades más utilizadas para expresarla- depende sobre todo del grado de acoplamiento modal en la fibra óptica. En términos prácticos, la transición entre dos estados ocurre en distancias con longitud de acoplamiento iguales de la fibra l_c , esto es, la longitud de la fibra a la cual la energía transferida entre los estados de polarización llega a ser considerable. Esta longitud l_c rara vez excede un Kilómetro, y son comunes valores de 300 metros y menores, de manera que la mayoría de redes en la vida real operan bajo condiciones de acoplamiento modal fuertemente aleatorias, en las cuales la PMD se expresa como un retardo de tiempo esperado por la raíz cuadrada de la unidad de longitud (ej. ps/ $\sqrt{\text{Km}}$).

La PMD es de particular significado en cables viejos tendidos a finales de los 80s cuando las técnicas de fabricación y los procesos no eran tan exigentes como los que existen ahora y los fenómenos y sus causas no eran bien reconocidos o entendidos. Ahora, los fabricantes de fibra son conscientes de la importancia de mantener la geometría del núcleo cerca a la ideal en toda la longitud de la fibra, y

los fabricantes de cable tienen cuidado de no colocar tensión excesiva en la fibra cuando el cable es arrollado.

3.1.12 Dispersión cromática

Cuando se selecciona y se controla adecuadamente, la dispersión cromática puede minimizar considerablemente los efectos no lineales en la fibra óptica o hasta tomar ventaja de ellos (como en la dispersión agregada o fibra manejada). En algunas situaciones no puede solo ser controlada la dispersión total, sino también se puede minimizar varios efectos no lineales, hasta los que se encuentran dentro y a lo largo de una sola fibra. Las medidas de campo de la dispersión cromática serán más y más importantes en el futuro, considerando, que las redes existentes e infraestructuras son investigadas buscando establecer las posibilidades de ser mejoradas.

3.1.13 Otros fenómenos

Existen otros fenómenos importantes en la caracterización y el funcionamiento de los componentes de un enlace de fibra óptica. Ellos incluyen:

- Degradación de la razón señal a ruido óptico (dB)
- Parámetros ópticos relacionados con la diafonía
 - Relación de la diafonía en la banda (dB)
 - Relación de la diafonía fuera de la banda (dB)
- Parámetros relacionados con la respuesta en frecuencia
 - Rizado (dB)
 - Pérdidas por inserción (dB)
 - Ancho del canal (GHz)
- Parámetros relacionados con la polarización
 - Retardo diferencial de grupo (ps)
 - Pérdidas dependientes de la polarización (dB)
 - Medida de la PDL de extremo a extremo (dB)

3.2 INSTALACIÓN Y PRECOMMISSIONING

Antes de la instalación y de iniciar el sistema, ciertas pruebas pueden realizarse en el enlace óptico. Si el nuevo sistema WDM va a usar equipo ya instalado en el lugar es esencial revisar que el nuevo sistema sea compatible con este equipo. Varios tipos de prueba permiten al operador asegurar que el sistema trabaje apropiadamente.

Desde la perspectiva del operador de la red, se desea mantener un número mínimo de pruebas del sistema necesarias para demostrar el funcionamiento global del sistema y la integridad de la señal transmitida. Aunque algunos

procesos para probar y desarrollar sistemas de transmisión óptica de canal único SONET/SDH están bien documentados, tecnologías emergentes como WDM carecen de soporte detallado. Las propiedades de los componentes ópticos y las características del cable que no serían confiables en sistemas usando técnicas de transmisión más simples deben ser consideradas. Recientes avances como los multiplexores ópticos add/drop permiten enrutar longitudes de onda sobre redes complejas, procedimientos complicados de instalación y pruebas de mantenimiento y aceptación. Los conectores cruzados ópticos, aunque ya estén instalados, cambiarán radicalmente la configuración de las redes de telecomunicaciones en el futuro y probablemente requerirán pruebas más intrincadas.

Un esfuerzo se ha empezado a dar para definir un grupo de pruebas de nivel del sistema para caracterizar la funcionalidad de la red de extremo a extremo en sistemas DWDM, con la estimación debida para la transmisión de la señal óptica, multiplexación, supervisión, monitoreo del funcionamiento y subsistencia.

Estas pruebas se puede clasificar en cinco categorías:

1. Compatibilidad de la red
2. Commissioning
3. Monitoreo y mantenimiento
4. Operabilidad inter-vendor
5. Interconexiones en la arquitectura

3.2.1 Compatibilidad de la red

La prueba de compatibilidad de la red asegura que las señales de redes existentes no WDM son compatibles con las interfaces de fibra en los elementos de la red WDM y que las especificaciones de potencia eléctrica de los componentes WDM son equivalentes a aquellas existentes en la red. Pruebas de campo esenciales incluyen aquellas que miden la atenuación extremo a extremo, las reflexiones ópticas en las interfaces de la red y la dispersión cuando los sistemas están siendo mejorados.

Las pruebas de atenuación de extremo a extremo en 1310 nm y 1550 nm examinan el camino de la fibra para discontinuidades ópticas y determinan si la fibra cumple con los requerimientos del sistema. Las pruebas para la potencia reflejada en componentes individuales así como conectores y uniones en la fibra, determinan si los efectos de las reflexiones únicas y múltiples están dentro de las tolerancias especificadas.

Las pruebas de dispersión por modo de polarización y cromática no se hacen rutinariamente en fibra nueva durante la instalación (a menos que en el sistema hayan compensadores de dispersión), estos parámetros generalmente se especifican por los fabricantes de cable. Sin embargo, estas pruebas deben ser

realizadas en fibra instalada más vieja bajo consideración del uso para tasa de bits altas (OC-192/STM-64), o cuando las distancias de la fibra se aproximen suficiente a los límites de dispersión del sistema.

3.2.2 Commissioning

Las pruebas de funcionamiento en la transmisión miden el funcionamiento del transmisor y del receptor, el comportamiento del error y los efectos relacionados al acumulado a través de los elementos de la red WDM. Las longitudes de onda del láser pueden variar debido a las variaciones de fabricación, cambios térmicos y la ampliación de la frecuencia. Cuando la señal ampliada del espectro se propaga a través de un medio dispersivo, como una fibra convencional, crece la tasa de error.

Las pruebas ópticas de extremo a extremo deben ser realizadas a nivel del sistema, con todos los bloques de componentes trabajando juntos en el enlace óptico. La dispersión de la red entre el transmisor y el receptor para todas las longitudes de onda, incluyendo aquellas agregadas y retiradas en puntos intermedios, deben ser revisadas para asegurar que se encuentran dentro de los niveles específicos. La potencia óptica y la OSNR en el receptor deben ser medidas. Para alcanzar niveles de OSNR balanceados entre todos los canales en sistemas DWDM, un OSA puede ser usado para monitorear los cambios en la OSNR a medida que cambian los niveles del transmisor. El número de longitudes de onda disponibles para un sistema WDM es limitado por el amplificador, la banda pasante, la diafonía, la variación, la no linealidad de la fibra y las tolerancias de alineamiento en los filtros en cascada. Los amplificadores ópticos son ampliamente usados para compensar las pérdidas en la transmisión y en los componentes, y el impacto de la acumulación de ruido y la saturación de la ganancia cruzada, necesitan ser cuidadosamente considerados para minimizar las variaciones de la potencia de la señal. Los parámetros críticos a ser medidos son: la longitud de onda del canal, las variaciones indeseadas del canal, la razón señal a ruido óptico, el espacio en el canal, el aislamiento del canal, las pérdidas por inserción, el ruido amplificado, la ganancia de planeidad, la tasa de error de bit y el retardo en la transmisión.

3.2.3 Mantenimiento y monitoreo

Pruebas de operación, administración y mantenimiento confirman la capacidad para realizar las funciones de manejo y operación de la red, para comunicarse con sistemas administrados y otros elementos de la red, para monitorear el funcionamiento de extremo a extremo del enlace y para aislar las fallas en componentes reemplazables o reparables.

Mantener un sistema WDM significa asegurar que las portadoras ópticas permanecen dentro de las especificaciones, que las longitudes de onda son estables, y que el nivel de potencia óptica no fluctúa más de lo que el sistema puede tolerar. Probar estos parámetros requiere el uso de canales de servicio óptico que se comuniquen entre los elementos de la red WDM (NE/NE), los sistemas de operación y los elementos de la red (OS/NE) por el canal de comunicaciones de datos (DCC), una red de área local (LAN), o un canal óptico de supervisión (OSC).

La supervisión de la alarma y monitoreo del funcionamiento están incluidos en esta categoría. Las características y los parámetros claves – incluyendo las funciones de los sistemas de administración y seguridad - deben ser revisados, local y remotamente de acuerdo a las especificaciones. Estas pruebas deben ser suficientemente comprendidas para asegurar que el operador de la red es capaz de controlar y monitorear el estado de la red. Esto es posible usando un canal dedicado para realizar supervisión o transmitir información sobre el estatus del sistema.

3.2.4 Operabilidad Entre Vendedores (Inter-Vendor)

Las pruebas de operabilidad inter-vendor demuestran la habilidad del sistema para interoperar con equipos de otros vendedores. Usualmente, transpondedores ópticos se deben incorporar a interfaces entre equipos diferentes. Para evitar esta adición molesta y costosa, se deben estandarizar en las interfases de la red las propiedades físicas de la señal óptica y su contenido (e.g. longitudes de onda, tasa de línea, formato de código). La ITU y otras organizaciones de estándares definen estándares para interfaces ópticas, arquitecturas, administración y pruebas requeridas para asegurar que se trabaja con los estándares aplicables a cada interfase.

3.2.5 Arquitectura de las Interconexiones

Las pruebas de arquitectura de las conexiones corroboran la funcionalidad y subsistencia de las conexiones de la red. Recientes sistemas WDM han sido diseñados principalmente con conectividad punto a punto sobre largas distancias, y la subsistencia de las redes ópticas están provistas casi exclusivamente por la capa electrónica para SONET. Pero en sistemas presentes hoy día, los cuales permiten longitudes de onda estáticas, add/drop y recientemente capacidades OADM, tienen que llegar a ser dinámicamente reconfigurables. Switches y enrutadores de alto rendimiento, enrutarán las longitudes de onda sobre redes complejas. Los conectores ópticos cruzados y otras tecnologías ópticas avanzadas soportarán topologías que son mas flexibles. La restauración de arquitecturas basadas en anillos self-healing, diversos enrutadores o algoritmos

distribuidos mesh-based reciben considerable atención. A la luz de todos estos avances tecnológicos, llega a ser muy difícil la investigación exhaustiva para la protección del servicio. No obstante, este es un aspecto esencial de la arquitectura que debe ser probado para asegurar la confiabilidad de la red, la subsistencia y la consistencia del servicio.

3.3 COMMISSIONING

Una cantidad de parámetros críticos deben ser medidos y registrados cuando una red es por primera vez commissioning para revisar el funcionamiento de puesta en marcha y para proveer una línea base para futuras resoluciones de problemas o en la planeación de mejoras. Este periodo de prueba es tan crucial que los sistemas de vendedores proporcionan sus propias secuencias de pruebas. Las pruebas serán llevadas a cabo en componentes individuales y también en el sistema en operación. El objetivo de las pruebas de commissioning es para demostrar el funcionamiento general y la integridad del sistema. Básicamente, hay tres clases de pruebas. El primer paso consiste en probar cada componente del sistema para revisar su funcionamiento y optimizar los datos. El segundo paso se enfoca en el sistema completo. Nosotros aseguramos su funcionamiento conforme a los requerimientos. El último paso es usualmente olvidado, pero es, sin embargo, una función muy importante. Esto involucra pruebas disruptivas. Una vez todas estas pruebas han sido realizadas y cuando podemos confirmar que el sistema completo y sus componentes cumplen con los estándares, estamos listos para empezar a operar el sistema y aprovechar las ventajas de la tecnología WDM.

3.3.1 Transmisores

La potencia de salida del transmisor debe ser medida, usando un medidor de potencia o un OSA y posiblemente un atenuador variable calibrado. A partir del error probable debe hacerse un estimado y el resultado debe establecerse adecuadamente; es decir, $X \pm Y$ dBm.

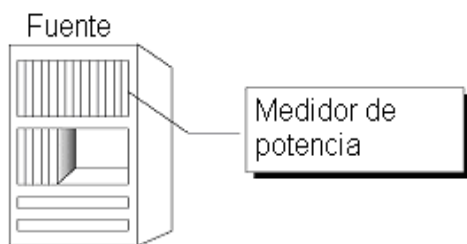


Figura 3.03 El medidor de potencia provee niveles de potencia fuente con gran precisión

La frecuencia central debe ser medida usando un medidor de longitud de onda calibrado y el resultado debe estar de acuerdo con la rejilla ITU.

3.3.2 Receptores

El parámetro de sensibilidad del receptor de mayor valor es la potencia de entrada para un BER específico. Este es medido usando un grupo de pruebas de BER, un atenuador variable y un medidor de potencia. Éste se debe medir para todos los canales ITU posibles a ser usados en la aplicación.

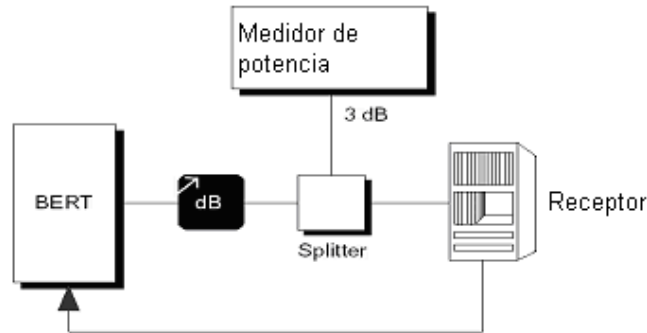


Figura 3.04 El probador BER (BERT) provee la sensibilidad límite del receptor

La diafonía en receptores es usualmente descrita en términos de los niveles espurios de salida presente en cada canal en turno, en la ausencia de una señal de entrada en este canal, mientras las señales son presentes en todos los otros canales. Muchos OSAs modernos incluyen la capacidad de medir este valor integrado de diafonía directamente.

3.3.3 Amplificadores Ópticos

La potencia de salida de un EDFA es medida en saturación; es decir, cuando un incremento en la potencia de entrada no produce incremento en la potencia de salida. La medida es tomada en 1550 nm usando un láser sintonizable y un medidor de potencia calibrado.

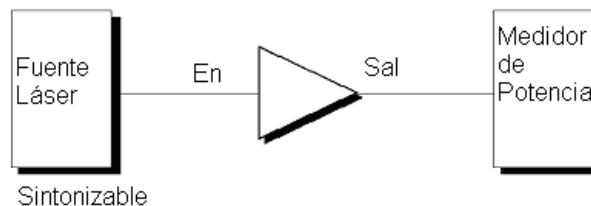


Figura 3.05 El láser sintonizable realiza un barrido sobre el ancho de banda del EDFA

La ganancia de planeidad para grandes señales pueden medirse con el mismo sistema, variando la longitud de onda de entrada a lo largo de la ventana de 1550 nm en pasos de 1 nm y observando la potencia de salida en cada longitud de onda.

El ancho de banda de un EDFA es el rango entre las longitudes de onda en las cuales su ganancia cae en 3 dB, medidas usando un OSA. Esto debe exceder normalmente 32 nm (es decir, 1530 a 1562 nm).

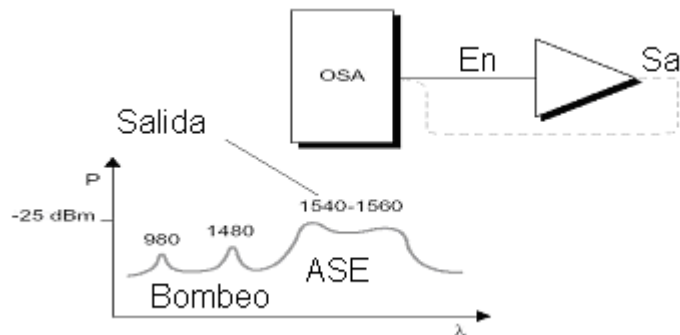


Figura 3.06 Ancho de banda medido con un OSA

La potencia bombeada remanente es una medida de la energía bombeada que escapa del EDFA. Esta es medida separadamente a la entrada y salida de la unidad, usando un OSA. La medida a la entrada se hace a 980 nm y a la salida a 1480 nm.

La emisión espontánea amplificada (ASE) es medida similarmente, en la entrada y la salida, usando un OSA y barriendo sobre la ganancia de la banda completa. El resultado es generalmente dado como una densidad de potencia espectral, es decir en dBm/nm (o, frecuentemente, en dBm/0.1 nm).

3.3.4 Multiplexores Y Demultiplexores

La correcta operación de multiplexores y demultiplexores es obviamente clave para aprovechar al máximo la capacidad de las redes y para lo cual algunos parámetros son significantivos. Todo debe ser medido en un ambiente estable, en combinación con otros componentes a los cuales se les ha revisado su comportamiento. En general, las pruebas deben ser hechas en cada longitud de onda de canal usado –o probablemente a ser usado- en el enlace.

Las capacidades de manejo de la potencia de entrada de los multiplexores deben ser probadas para confirmar que el BER de salida es aceptable cuando ellos están alimentados directamente con un EDFA. En una red instalada, esta medida es realizada por un grupo de pruebas de BER en un extremo del enlace.

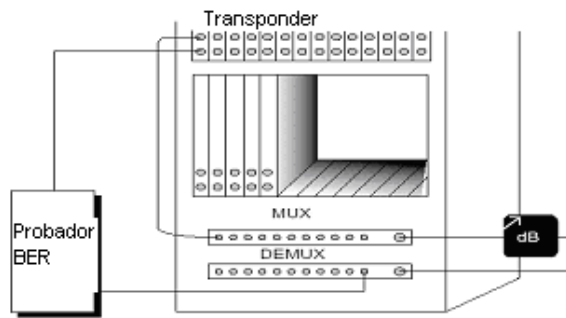


Figura 3.07 Probando el BER en un solo rack WDM con un atenuador para simular las pérdidas del enlace

La uniformidad de la potencia de salida de un multiplexor es la variación pico a pico de la potencia en los canales, con todos los transmisores activos, medida con un OSA. La máxima variación debe ser menor de 3 dB, para evitar introducir serias inconsistencias entre las características de las señales de los diferentes canales.

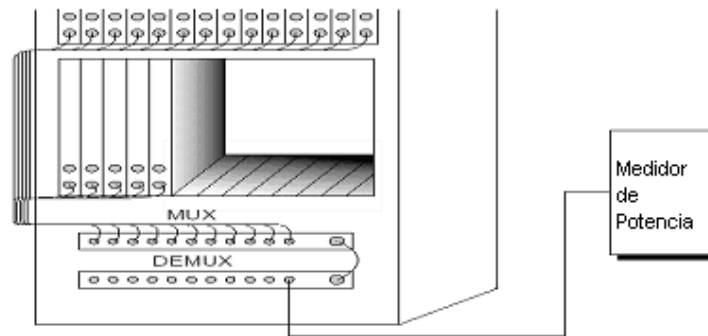


Figura 3.08 El medidor de potencia provee la uniformidad de la potencia de todos los puertos de salida

El parámetro correspondiente en un demultiplexor es el nivel de potencia de salida para cada canal medido usando un medidor de potencia calibrado. El nivel aceptable es -20 dBm.

Las pérdidas por inserción están estrechamente relacionadas con la uniformidad de la potencia. Para un multiplexor, estas pueden ser medidas usando una fuente sintonizable o un OSA y un grupo de transmisores individuales por canal, mirando alternativamente en los puertos de entrada y el puerto de salida, para obtener una figura de pérdidas por inserción para cada canal. Una técnica alternativa usa transmisores individuales por canal, activando una por una, y midiendo la potencia a la salida.

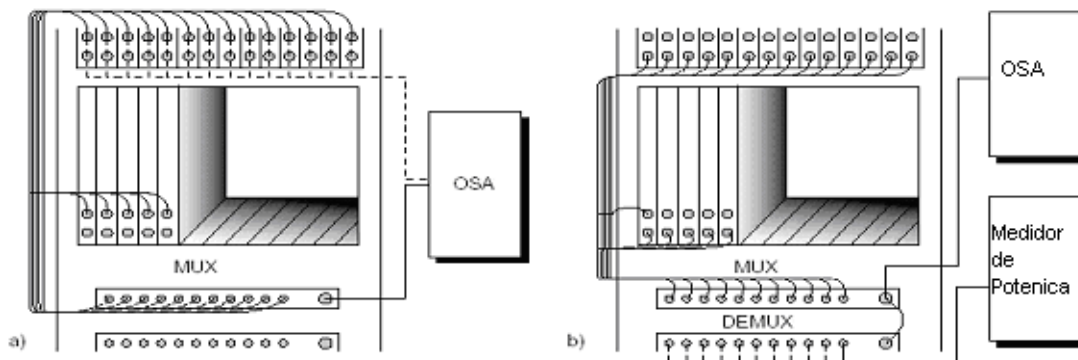


Figura 3.09 Las pérdidas por inserción se miden usando a) un OSA al nivel del mux y b) un medidor de potencia al nivel del demux.

Las longitudes de onda centrales y los anchos de banda de los canales individuales de los multiplexores y demultiplexores son características importantes, y la diafonía puede ser estimada a partir de ellos. Estas cualidades espectrales son medidas usando un OSA, con un medidor de longitud de onda para calibración. En la mayoría de las aplicaciones, las longitudes de onda centrales deben corresponder con los valores de la rejilla ITU. El ancho de banda de cada canal (-3 dB de ancho) debe ser menor que 0.2 nm.

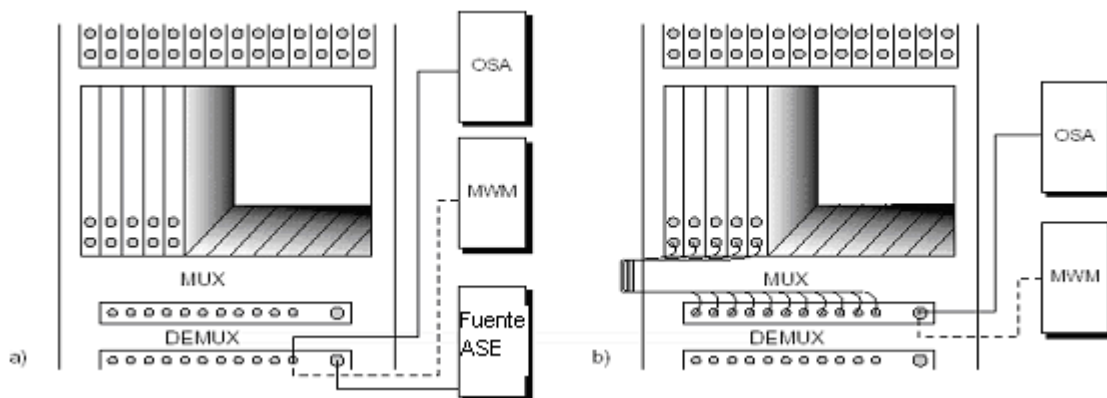


Figura 3.10 Las longitudes de onda centrales de los canales son medidas usando a) una fuente ASE y un OSA para el demux y b) el OSA con el sistema de fuentes para el mux.

La directividad es de particular importancia en multiplexores, y ésta es usualmente revisada durante la commissioning conectando un láser a una entrada del multiplexor y conectando un OSA en cada uno de los otros puertos de entrada.

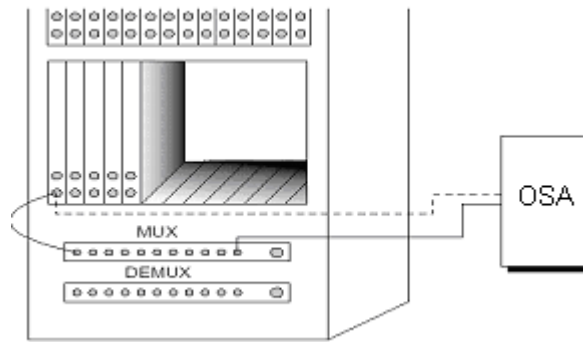


Figura 3.11 La directividad del mux se analiza con el OSA

3.3.5 Prueba de Nivel del Sistema

Además de las pruebas en los diferentes componentes y en los subsistemas ensamblados ya descritos, una prueba del nivel de funcionamiento del sistema global es obviamente una parte esencial de la commissioning en una red. Su propósito es demostrar la funcionalidad global y la integridad en la transmisión de los datos de todos los canales probados.

Una señal típica DWDM compuesta por múltiples longitudes de onda pasa a través de uno o más amplificadores ópticos antes de llegar a su destino, donde este es demultiplexado y la información original de los canales recuperada.

El parámetro individual más útil en la caracterización de un sistema es la relación señal a ruido (OSNR), y se sugieren dos puntos diferentes de medida. Primero, se toma una medida individual del tiempo promedio a la entrada del demultiplexor. Un OSA se usa para examinar la señal en este punto y se determina la OSNR a diferente espacio dependiendo del sistema vendedor requerido (comparando el pico de la señal del canal con el ruido a la salida del canal). Un valor promedio que exceda 18 dB es aceptable generalmente.

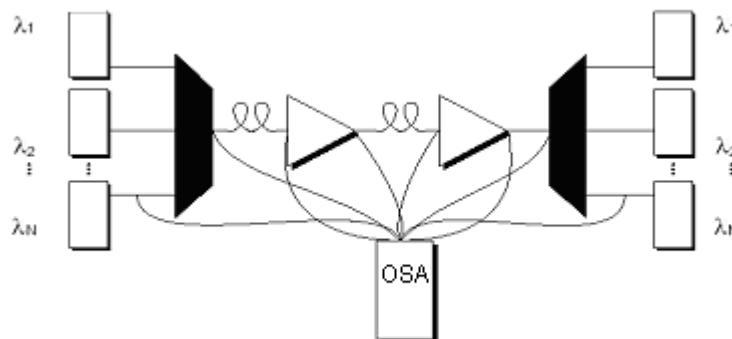


Figura 3.12 El OSA se usa en cualquier punto a lo largo del enlace para caracterizar el sistema

Segundo, se mide la SNR en las entradas y salidas de cada uno de los amplificadores ópticos en el enlace, y se usan los valores para describir el funcionamiento global del enlace. Una figura que excede 21 dB se requiere generalmente para un sistema a de 2.5 Gb/s.

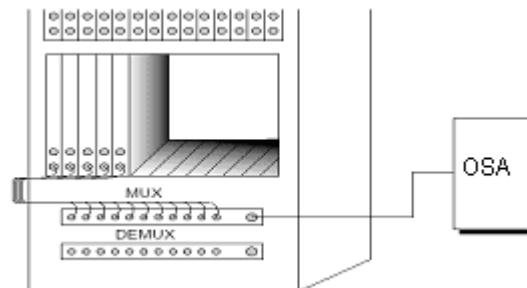


Figura 3.13 El OSA es el mejor instrumento para medir OSNR.

También es de interés, la uniformidad de la potencia del transmisor. Ésta es generalmente definida como la diferencia de potencia entre el canal más débil y el más fuerte, medida con un OSA a la salida del primer amplificador óptico (alimentado con el multiplexor). La OSNR debe ser alta en este punto (>28 dB para un ancho de banda de 0.1 nm) y la variación de potencia entre canales no debe exceder a 2 dB.

Usando un grupo de pruebas de BER, el usuario puede confirmar que la tasa de error de bits en cada canal es aceptable (por debajo de 10⁻¹² para unas pérdidas de span de 25 dB).

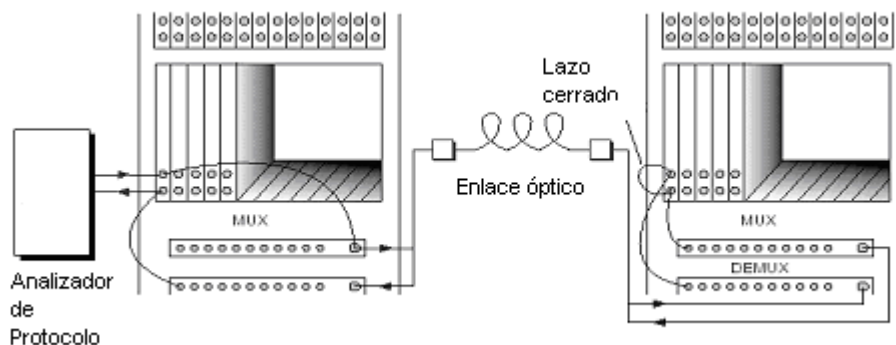


Figura 3.14 Un analizador de protocolo muestra el rendimiento de cada canal sobre un lazo cerrado del enlace óptico.

También es revisado el funcionamiento del error en un periodo de tiempo largo con un grupo de pruebas del BER, en un nivel de señal real (-15 dB). La prueba debe realizarse por un periodo de 24 horas, pero esto no es usualmente práctico para revisar cada canal individualmente. Dos buenos candidatos son el canal que presenta la menor OSNR y el que presenta la mayor potencia.

Una idea de la fragilidad del enlace puede ser obtenida mediante pruebas de perturbaciones: removiendo y reinsertando módulos de canales al azar mientras

se observan las señales en los canales remanentes. Únicamente la señal en el canal que sufra el disturbio debe ser afectada.

La estabilidad de la longitud de onda o de la frecuencia de los canales debe revisarse usando un medidor de longitud de onda. La frecuencia de cada canal debe estar entre ± 5 dB de la frecuencia nominal para sistemas que usen una separación de los canales de 50 GHz.

También debe ser realizada una prueba de nivel del sistema en frío al inicializarlo. Con equipo, monitoreando el BER en un número apropiado de canales, toda la potencia debe ser eliminada. Después de un periodo apropiado (el cual dependerá de las constantes de tiempo de la potencia de suministro y los retardos máximos posibles en las vías de control, pero la cual debe ser al menos un minuto) la potencia debe ser restaurada. Esto es importante para conocer el tiempo que gastan las vías de la señal en ser restauradas y para un adecuado manejo de la normalización de las funciones. No deben existir alarmas espurias.

3.3.6 Proceso de Alarma

La mayoría de los módulos usados en redes ópticas –transmisores, amplificadores, etc.- incluyen una o más alarmas, las cuales son disparadas por variaciones de algunos parámetros de acuerdo a las condiciones de operación específicas. En algunos casos, las alarmas clasificadas por niveles, son provistas para dar una indicación de la urgencia de reparación.

Las pruebas de alarmas en general implican la modificación deliberada de uno o más parámetros de operación en un sistema que trabaja adecuadamente para verificar que las señales de alarma correspondientes son generadas.

Para un transmisor, los parámetros monitoreados incluyen la potencia de salida, las temperaturas, el láser mismo y la rejilla, si está presente, también como el enfriamiento del láser y el enfriamiento termo eléctrico (TEC).

Los mismos parámetros pueden disparar alarmas en el módulo de bombeo del láser de un EDFA. Además, las pérdidas en la señal de entrada o salida deben generar una alarma.

En un receptor, se monitorea la presencia de una señal de salida (eléctrica), como lo es la temperatura de la rejilla, si existe.

El monitoreo análogo debe ser realizado en el canal de supervisión, incluyendo todos los niveles de señal relevantes, corrientes de conducción y temperaturas.

Otro grupo (o nivel) de alarmas trata con fallas disruptivas: la pérdida completa de una señal, por ejemplo, más que un valor, es una situación que no está definido en las especificaciones. El sistema de alarma debe responder apropiadamente para desconectar por ejemplo la entrada a un transmisor, la entrada y salida de un amplificador, todos los canales que entran al demultiplexor o un solo canal en un receptor. Por supuesto, estas deben reaccionar adecuadamente con las pérdidas de potencia en cualquier punto del enlace.

El paro seguro de los EDFAs es un caso especial de fallas disruptivas. Cuando la señal de entrada se pierde, no solamente la alarma correspondiente debe ser disparada, sino que también los láseres de bombeo deben ser parados dentro de un periodo de tiempo permitido por las especificaciones técnicas de la unidad.

3.4 MANTENIMIENTO

Los sistemas DWDM han aparecido solo desde mediados de lo 90s, de manera que todavía es difícil identificar con certeza los nuevos requerimientos de mantenimiento que van apareciendo. Cualquiera que sea el grado de la pérdida, las pruebas de campo en equipos y procedimientos deben permitir identificar la parte o subsistema alterado rápida y claramente.

Todos los parámetros encontrados en las fases de fabricación, calificación e instalación del manejo de la red son de gran importancia durante el mantenimiento, pero muchos de ellos en particular son buenos candidatos para monitoreo frecuente, en la medida que ellos son indicadores directos de la posible degradación del funcionamiento.

3.4.1 Relación Señal a Ruido Óptico

La mayoría de las degradaciones en la calidad de la transmisión estarán acompañadas por una caída en la relación señal a ruido observada, de manera que las medidas de este parámetro, en cada canal de transmisión, están ciertamente entre las más importantes a ser tomadas durante las operaciones de mantenimiento y solución de problemas de rutina.

3.4.2 Pérdidas

Las pérdidas en sistemas WDM deben ser examinadas canal por canal, y el mejor instrumento para este propósito es el OSA, posiblemente respaldado por un medidor de longitud de onda para calibración y verificación espectral.

Los métodos estándar de caracterización de las pérdidas ópticas por retorno han sido discutidos, usando una fuente, un acoplador y un fotodetector para medir la potencia reflejada por el enlace, la cual no sería útil durante la prueba. Un OSA puede ser usado como un detector para establecer la dependencia con la longitud de onda. Sin embargo, en el campo, se pueden obtener resultados útiles de forma más simple, usando un medidor de reflexión portátil, pequeño o en el nivel del sistema con el sistema de prueba de fibra remota (RFTS) trabajando con el tráfico de señal actual de la red tanto como sea posible.

3.4.3 Dispersión por Modo de Polarización

De los tres métodos para medir la dispersión por modo de polarización –Jones Matrix eigenanalysis, escaneo de longitudes de onda e interferometro- únicamente el tercero se adapta correctamente al uso de campo. Este es rápido, no requiere acceso simultáneo de ambos fines de un enlace, y puede medir valores grandes de PMD sobre largas distancias.

3.4.4 Dispersión Cromática

Aunque se han descrito varios métodos para medir la dispersión cromática, todos ellos requieren equipo especializado y cuidado en la interpretación de los datos, así la medida de rutina de estos parámetros durante operaciones de mantenimiento no es probable. El impacto a largo plazo de la dispersión cromática en sistemas DWDM no es todavía bien entendido, se necesitarán mayores desarrollos en los equipos de campo para manejarla en fibra instalada.

Usando un atenuador óptico variable programable y un grupo de pruebas de BER, pueden revisarse parámetros como la sensibilidad del receptor, el rango de la potencia de entrada, la degradación de la señal y los umbrales de pérdidas de la señal.

3.4.5 La Ganancia Óptica

El amplificador óptico – casi siempre un EDFA en un sistema DWDM- es un componente clave de cualquier enlace óptico, y mantenimiento personal debe ser permitido para revisar su funcionamiento en el campo.

La ganancia y la redistribución de la ganancia pueden ser medidos usando un OSA, preferiblemente uno con memoria. La potencia de entrada es medida para cada canal y los datos son almacenados. La salida del EDFA es entonces examinada y los niveles del canal comparados con los valores almacenados, estos nos determinan la ganancia y la distribución de la ganancia entre canales.

Usualmente los niveles de ruido (OSNR) pueden ser revisados al tiempo. La potencia total puede ser calculada por integración de las contribuciones de los canales individuales, o puede ser usado un medidor de potencia aparte.

3.4.6 Longitud De Onda

Para su uso en campo en sistemas DWDM, la longitud de onda precisa absoluta debe ser mejor que 0.005 nm. Las señales pueden ser débiles, así que se necesita un amplio rango dinámico, de 30 a 40 dB. Para encontrar este requerimiento puede ser necesario un OSA y un medidor de longitud de onda.

También puede ser necesario un medidor de longitud de onda para monitorear los canales y detectar las variaciones indeseadas de las longitudes de onda y la potencia.

3.4.7 Diafonía

Las medidas de la diafonía en el campo se facilitan por la capacidad de almacenamiento de los datos de los OSAs modernos. Usando un switch óptico, el operador puede probar cada canal en secuencia sin cambiar conexiones entre medidas. La potencia en cada canal es almacenada y usada para calcular la diafonía después de que todos los canales se han probado.

3.5 MONITOREO

El monitoreo no es una prueba por sí misma, pero más que eso es la verificación continua de los canales en vivo por medio de cualquier prueba individual que sea adecuada y factible. Se usa para detectar variaciones en cualquier característica óptica de la red que pueda afectar el funcionamiento del sistema y para deducir información estadística. Las funciones de monitoreo van desde el establecimiento y manejo de pruebas hasta el análisis de los datos adquiridos.

El monitoreo es particularmente importante en sistemas DWDM, los cuales son muy sensibles a los fenómenos ópticos como la dispersión, la diafonía, las variaciones indeseadas de la longitud de onda central y demás. La capacidad para realizar pruebas repetitivas de los parámetros críticos es esencial si el usuario permite reconocer y responder rápidamente a las indicaciones de inestabilidad. Un buen sistema de monitoreo de canales en vivo provee información constante acerca del funcionamiento del sistema, específica y estadística.

3.5.1 Canal Óptico de Supervisión

Un canal óptico de supervisión (OSC) puede ser utilizado, más que para monitorear un canal en vivo, para probar un sistema. Un OSC es un canal dedicado para la observación continua de las operaciones y la eficiencia de la transmisión. Se usa para detectar fallas, pérdidas de potencia o cualquier cambio significativo en la integridad de la señal. En vez de pruebas específicas – posiblemente disruptivas- en tiempos fijos, el OSC es usado para transmitir continuamente pruebas adecuadas y señales de control. Ya que este puede transportar información de control, debe ser continuamente asegurado, para esto generalmente se usa una longitud de onda por fuera de la banda de operación del EDFA.

El monitoreo del OSC normalmente no consiste en reportes rutinarios o estadísticas: si el sistema está operando correctamente, no se necesita ningún reporte. El OSC es simplemente un recurso para estar pendiente del comportamiento global de la red, no para realizar pruebas individuales de los componentes. Una prueba funcional y confiable de OSC ayuda a controlar el sistema para mantener la potencia óptica constante y garantizar la calidad de transmisión de la red para el uso más eficiente de los recursos de la red. Si el OSC detecta una variación en la integridad de la señal, una bandera se activa para notificar al operador.

Aunque estándares obligatorios para el OSC no existen, y un número de aproximaciones posibles están bajo estudio y en actual uso, un consenso en la industria favorece una longitud de onda de 1510 nm o 1625 nm. Esto es porque ellas están por fuera de la banda de operación del EDFA, y suficientemente cerca para proveer monitoreo útil. Ya que los componentes para uso en 1510 nm no están todavía disponibles, otras longitudes de onda tienen que ser consideradas, como 1480 nm y 1310 nm, para funciones del OSC, dependiendo del sistema vendor.

En él mismo, un OSC no demanda equipo de prueba específico; el equipo adicional que requiere depende completamente de los parámetros elegidos para monitorear. Si las pérdidas en conectores o empalmes son considerables, se necesita un medidor de potencia o –mucho mejor- un OTDR. Un OTDR puede también revisar ciertos problemas potenciales de la fibra. Ciertos defectos por tensión en la fibra pueden ser más fácilmente detectados en la longitud de onda del OCR que en la banda del EDFA. Y las pérdidas ópticas presupuestadas pueden ser monitoreadas con un atenuador variable y un grupo de pruebas de pérdidas ópticas.

Otra actividad de supervisión dedica uno de los canales DWDM a la función de monitoreo. Aunque esta técnica carece de invulnerabilidad a las fallas del EDFA

de un OSC separado, esto permite usar protocolos estándar SONET/SDH usados para detectar errores de rutina y defectos en la transmisión.

Una solución al problema de la invulnerabilidad a las fallas del EDFA es monitorear las características espectrales de uno o varios canales en paralelo. La adición de instrumentos de medida espectral a la unidad de prueba remota (RTU) de un RFTS permitiría monitoreo fácil y adecuado de los sistemas de transmisión.

3.5.2 Sistema Remoto De Prueba De La Fibra

Una variedad de instrumentos pueden ser usados para monitorear las redes. Los más usados son los medidores de múltiples longitudes de onda y el OSA, pero en muchas circunstancias, pueden ser necesarios un analizador PMD, un reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR), o herramientas de prueba más pequeñas como un medidor de potencia, un reflectómetro o un medidor de reflexión. Muchas de estas capacidades son combinadas en el RFTS: probablemente la mejor solución para un monitoreo completo del sistema en vivo.

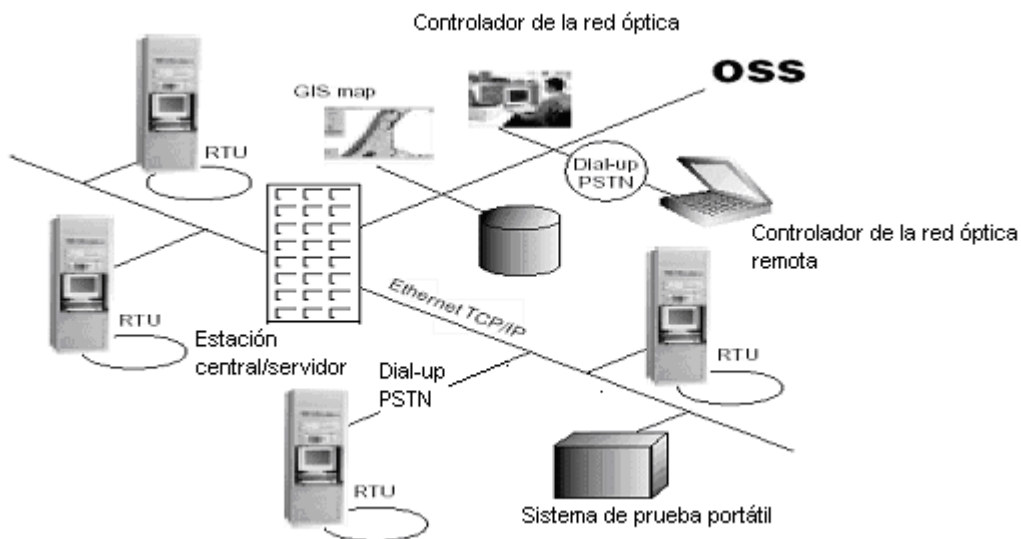


Figura 3.15 Utilización completa de un sistema RFTS

Las unidades RFTS son vistas como elementos claves para proveer muchas de las funciones de mantenimiento y supervisión que se necesitan en las redes de fibra. Su uso generalizado puede ser atribuido a muchas ventajas costo-beneficio:

- Una fuerte demanda en la calidad del servicio (QoS) – el monitoreo continuo de una red es una ventaja estratégica importante para proveedores de servicios.

- Un incremento significativo en los ingresos por fibra – las ventajas de velocidad de redes DWDM (OC-48/STM-16 y OC-192/STM-64) pueden ser realizadas en términos de la información transportada únicamente si el funcionamiento en el nivel del canal puede ser garantizado.
- El alto costo de mantenimiento – un sistema de prueba que provea supervisión automática de la red física facilita el trabajo de mantenimiento de equipo y dirige su atención donde más se necesita.

Sin embargo, pocos, si ninguno de los RFTSs ahora en uso en redes DWDM son actualmente utilizados para identificar las fallas en la transmisión. En vez de ello, protocolos de transmisión estándar como SONET o SDH realizan esta función, reaccionando rápidamente a las interrupciones (es decir, en menos de 120 ms). El switching SONET y los protocolos de topología de la red pueden ser usados para curar la red sin interrumpir el servicio a sus usuarios.

Pero DWDM no está completamente cubierto por las medidas de nivel de los protocolos. Esta nueva tecnología trae una nueva capa – el espectro óptico – en la jerarquía de las fuentes, y no hay disponibilidad de protecciones para los canales WDM en el nivel físico. En respuesta, los sistemas proveedores están intentando proveer supervisión espectral limitada de sistemas de transmisión DWDM.

Varias técnicas de monitoreo de los diferentes sistemas de transmisión, incorporados en unidades RFTS, brindan una nueva dimensión para supervisión de la fibra.

- Monitoreo espectral – en el caso de una falla en el canal
Así como un OTDR detecta una imperfección de la fibra, un OSA puede detectar e identificar una falla del canal en un sistema DWDM. Un diagnóstico puede ser hecho rápidamente a la causa probable del problema – la OSNR, la potencia pico o la longitud de onda del canal- y la acción correctiva puede ser tomada. Hasta en el caso de una pérdida completa de un canal, la vista global de un OSA dada a los otros canales DWDM puede proveer información crucial acerca de los problemas potenciales que pueden estar pendientes debido a la redistribución automática de la ganancia de los EDFA.
- Monitoreo espectral – mantenimiento preventivo
El mantenimiento preventivo de los sistemas de transmisión pueden también beneficiarse de un sistema de monitoreo espectral. Aunque los DFBs son muy estables en periodos cortos, ellos son generalmente considerados la clave determinando el funcionamiento a mediano plazo (un año más o menos). Considerando el ancho de banda del canal muy estrecho (0.1 a 0.2 nm) en los sistemas más avanzados actualmente, es un reto mantener la estabilidad espectral adecuada sobre toda la vida del

sistema: las variaciones en la longitud de onda tan pequeñas como 0.02 nm pueden causar pérdidas de un canal de señal. Con su excelente precisión de longitud de onda (0.003 nm), un medidor de múltiples longitudes de onda integrado es por lo tanto una herramienta valiosa para realizar medidas de variaciones a largo plazo en DFBs y los problemas potenciales más notables.

- Monitoreo PMD – evaluación del enlace óptico para tasas de bits OC-192/STM-64

La dispersión por modo de polarización es también cada vez más una limitación mayor para el funcionamiento de la red, y su naturaleza impredecible ha llevado a la necesidad de monitorear continuamente el comportamiento de la PMD de algunos enlaces usados en tasas de bits OC-192/STM-64. Uno puede monitorear el valor promedio PMD sobre el enlace o monitorear la variación DGD como una función de la longitud de onda. El último método ofrece una gran calificación del máximo y mínimo DGD respecto a cada canal.

Hay gran interés en la industria para monitorear sistemas instalados recientemente, para reconocer los síntomas del problema antes que ellos afecten el canal o el sistema. El canal óptico de supervisión es ahora ampliamente considerado inadecuado para proveer la calidad necesaria del servicio en el mundo competente de las telecomunicaciones. Un acercamiento evolucionario que incorpora herramientas de medida necesarias en un RFTS contenida en si mismo promete proveer una solución para conseguir cada uno de los objetivos de construcción y mantenimiento eficiente, redes de transmisión confiable.

CONCLUSIONES

El incremento en la capacidad de transporte de las redes esta siendo soportado por los avances en la tecnología WDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda) y a medida que esta demanda crece se hace necesario el uso de DWDM (Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa), eligiendo como medio de transporte de la información la fibra óptica, por su eficiencia y confiabilidad, además de la flexibilidad en cuanto al incremento de la capacidad de redes existentes sin la necesidad de tender nuevo cable, o de adquirir nuevos equipos que requieran inversiones exorbitantes.

Esto genera un concepto de flexibilidad en el mercado en cuanto al alquiler no solamente de fibra o cable sino de longitudes de onda; utilizándose cada una de las longitudes para diferentes aplicaciones, por ejemplo: televisión por cable, telefonía, trafico de Internet, video por demanda o cualquier otra aplicación y muchas más por una sola fibra.

Todos estos avances tecnológicos en un sistema DWDM genera nuevos métodos de prueba para asegurar que cada componente y grupos de componentes trabajan adecuadamente para cumplir con los requerimientos. De manera que existe la necesidad de conocer qué probar, cómo realizar las pruebas y dónde probar.

Para saber que probar, hay que analizar los factores críticos que limitan el desempeño de cada uno de los componentes. Estos parámetros están directamente relacionados con la fibra, los componentes ópticos, los efectos no lineales, los efectos por dispersión de la fibra y los componentes activos en el sistema.

Un dispositivo bajo prueba debe alimentarse con una señal óptica de características conocidas y su salida debe analizarse para determinar en detalle cómo difiere respecto a la entrada. Tanto la fuente como el instrumento de medida debe seleccionarse para probar y analizar el valor intrínseco de los parámetros que necesitan medirse sin introducir efectos propios. A medida que la tecnología WDM utiliza un espacio entre longitudes de onda más pequeño, los requerimientos y las especificaciones de los componentes seleccionados y los procedimientos de prueba se hacen más complejos. Los componentes de una red DWDM incluyen transmisores, receptores, transponders, amplificadores ópticos, multiplexores, demultiplexores, routers y switches, fibra, cable y compensadores. Estas técnicas y equipos especializados evolucionan rápidamente y hasta algunas de las mediciones llegarán a ser menos relevantes ha medida que la tecnología evoluciona.

Los sistemas de verificación antes de que el sistema empiece a trabajar completamente son fundamentales para un buen comienzo y un buen funcionamiento. Esto se puede lograr confirmando la correcta operación de todos los componentes de la red a través de los procedimientos de pruebas durante la instalación y la revisión del desempeño por medio de procedimientos adecuados de mantenimiento.

Las medidas de los parámetros ópticos y electrónicos del enlace es vital para asegurar que cada canal está operando en la longitud de onda especificada y que todos los elementos de la red están alineados espectralmente de acuerdo a las especificaciones del diseño. Obviamente una vez, todos los componentes son instalados, deben ser probados nuevamente para asegurar que todavía cumplen con los requerimientos. Ellos tendrán que probarse antes de que el sistema sea puesto en operación (commissioning) y regularmente después de puesto en operación (mantenimiento). Estos parámetros del sistema son particulares del sistema usado y depende de muchos factores, incluyendo la longitud del enlace óptico, la velocidad de transmisión, el número de longitudes de onda y el espaciamiento entre canales.

INDICE DE ACRÓNIMOS

ADM:	Multiplexor Add/Drop
ASE:	Emisión Espontánea Amplificada
BER:	Tasa de Error de Bit
DBFA:	Amplificador de Fibra Doblebanda
DGD:	Retardo Diferencial de Grupo
DSF:	Fibra de Dispersión Desplazada
DUT:	Dispositivo Bajo Prueba
DWDM:	Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa
ECL:	Láser con Cavidad Externa
EDFA:	Amplificador de Fibra Dopado con Erblio
ESA:	Analizador de Espectro Eléctrico
FWM:	Mezclado de Cuatro Ondas
GIS:	Sistema de Información Geográfica
IL:	Pérdidas de inserción
LAN:	Red de Área Local
MAC:	Control de Acceso Medio
MFD:	Diámetro del campo modal
MPI:	Interferencia Multicamino
NDSF:	Fibra de dispersión no desplazada
NE:	Elemento de la Red

NRZ:	No retorno a Cero
OADM:	Multiplexor Óptico Add/Drop
OC:	Portadora Óptica
OC-3:	155 Mb/S (Tasa de transmisión SONET)
OC-12:	622 Mb/S (Tasa de transmisión SONET)
OC-48:	2.5 Gb/S (Tasa de transmisión SONET)
OC-192:	10 Gb/S (Tasa de transmisión SONET)
OC-768:	40 Gb/S (Tasa de transmisión SONET)
OCH:	Canal Óptico
OCWR:	Reflectómetro de Onda Óptica Continua
OLT:	Prueba de pérdidas ópticas
OPS:	Protección Óptica de conmutación
ORL:	Pérdidas Ópticas por Retorno
OSA:	Analizador de Espectros Ópticos
OSC:	Canal Óptico de Supervisión
OSNR:	Relación Óptica Señal a Ruido
OTDR:	Reflectómetro Óptico en el Dominio del Tiempo
PDBW:	Polarización Dependiente del Ancho de Banda
PDCW:	Polarización Dependiente de la longitud de onda central
PDG:	Ganancia Dependiente de la Polarización
PDL:	Pérdidas Dependientes de la polarización
PMD:	Dispersión por modo de polarización

PSA:	Calibrador del Estado de Polarización
PSTN:	Red Telefónica Pública de Conmutación
QoS:	Calidad del Servicio
RBW:	Resolución del Ancho de Banda
RFTS:	Sistema de Prueba de Fibra Remota
RIN:	Intensidad de Ruido Relativo
RTU:	Unidad Remota de Prueba
SBS:	Dispersión estimulada de Brillouin
SONET:	Red Óptica Sincronía
SOP:	Estados de Polarización Conocidos
SPM:	Automodulación de Fase
SRS:	Dispersión estimulada de Raman
SSE:	Emisiones Espontáneas de las Fuentes
STM-1:	155 Mb/S (tasa de transmisión SDH)
STM-4	622 Mb/S (tasa de transmisión SDH)
STM-16	2.5 Gb/S (tasa de transmisión SDH)
STM-64:	10 Gb/S (tasa de transmisión SDH)
TEC:	Enfriamiento Termo-eléctrico
TLS:	Láser Sintonizable de Bajo Ruido
WAN:	Red de Área Local
WDM:	Multiplexación por División de la Longitud de Onda
WRM:	Módulo de referencia de Longitud de Onda
XPM:	Modulación de fase Cruzada

BIBLIOGRAFÍA

GIRARD, André. Guide to WDM Technology Testing, Canada: Exfo, 2000.

CAPMANY, Jose. Fundamentos de Comunicaciones Ópticas, Madrid: Síntesis, 1998.

CAPMANY, Jose. Dispositivos de Comunicación Ópticas, Madrid: Síntesis, 1999.

JARDON AGUILAR, Hidelberto. Sistemas de Comunicaciones por Fibras Ópticas, México: Alfaomega, 1995

MILLER, Gary. Modern Electronic Communication, New Jersey: Pearson Education, 2002.

BISWANATH, Mukherjee. Optical Communication Networks, United States of America: Mc Graw Hill, 1997.

UNIVERSIDAD DE LAS AMÉRICAS. Puebla Departamento de Ingeniería electrónica y comunicación.

http://mailweb.udlap.mx/~lgojeda/telecom3/fibra_optica/

<http://orbita.starmedia.com/~fortiz/ConceptosBasicos/Tema07-DispersionDesplazada.htm>

http://www.andinalink.com/es/educational/work_shops_bb/fibra_optica/propiedades_sfo.asp

<http://www.conelectronica.com/articulos/fibra61.htm>

http://ttt.upv.es/~framos/Fibra/efectos_nl.htm

[http://www.sea.siemens.com/motorsbu/
product/Technical%20Documents/TS002.pdf](http://www.sea.siemens.com/motorsbu/product/Technical%20Documents/TS002.pdf)