
1. Introducción

It is better to die on your feet than to live on your knees!.

Emiliano Zapata

Como capítulo de introducción, se presentará el concepto de multiplexación por división en longitud de onda, fundamental para la compresión de todo el trabajo desarrollado en este proyecto.

1.1 Multiplexación por división en longitud de onda

1.1.1 Principios básicos

El estudio de la multiplexación por división en longitud de onda, también conocida como multiplexación óptica o WDM¹ es un concepto muy antiguo, aunque hasta 1977 no se consiguieron las primeras soluciones prácticas [1].

Actualmente y gracias a la aparición de amplificadores de fibra óptica y láseres de múltiples longitudes de onda, es uno de los temas que más atención suscita dentro del campo de las comunicaciones ópticas, pues estos dispositivos permiten incrementar enormemente la capacidad de los sistemas de transmisión actuales sin requerir de desarrollos tecnológicos significativos y sin alterar las arquitecturas de red implantadas. Es

¹ Acrónimo de la expresión inglesa *Wavelength Division Multiplexing*, que se podría traducir como

decir, permiten una evolución flexible y económica de las presentes redes, respondiendo a la demanda de mayor ancho de banda por parte de los nuevos servicios de telecomunicaciones avanzadas que a tan vertiginoso ritmo están apareciendo.

La multiplexación por división en longitud de onda tiene su origen, en la posibilidad de acoplar las salidas de diferentes fuentes emisoras de luz, cada una a una longitud de onda diferente, sobre una misma fibra óptica. Después de la transmisión a través de la fibra, las señales a cada longitud de onda diferente, pueden ser separadas entre sí hacia diferentes detectores en su extremo final. Este concepto queda reflejado en la Figura 1.1, donde se trabaja en el rango visible de la luz y los dispositivos acopladores son componentes ópticos de volumen, en concreto dos prismas.

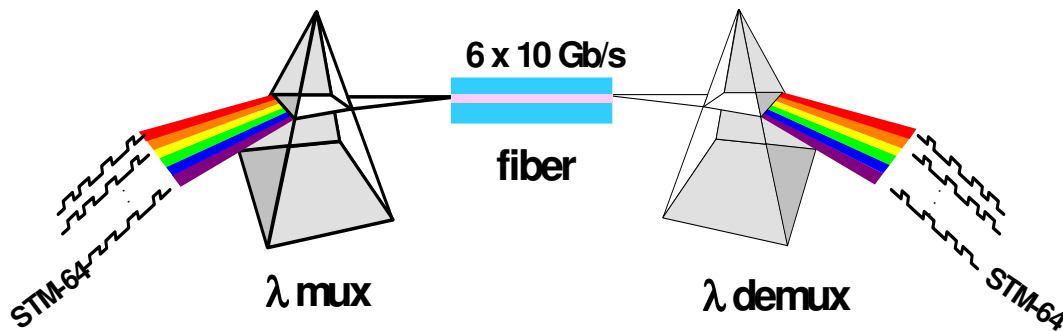


Figura 1.1: Concepto de multiplexación por división en longitud de onda.

El componente a la entrada, o multiplexor, ha de inyectar la salida de las distintas fuentes en la misma fibra, con unas pérdidas mínimas. Por supuesto, el multiplexor podría ser sustituido por un mero acoplador óptico [2], pero las pérdidas por división se verían sensiblemente incrementadas.

Es evidente, que cuando el sentido de propagación es el inverso, el multiplexor se convierte en el demultiplexor y viceversa, aunque la eficiencia en el acoplamiento no queda necesariamente preservada en esta operación. Por ejemplo, si el multiplexor utilizase fibras monomodo a la entrada y una fibra multimodo a la salida, las pérdidas de acoplamiento

serían excesivas en su uso inverso [2]. La simultánea multiplexación y demultiplexación de canales de entrada y salida respectivamente, puede realizarse mediante el mismo dispositivo: el multi/demultiplexor. Cuando un multiplexor tiene sólo dos canales, se le denomina diplexor.

Otros dos importantes tipos de multiplexación son la TDM², y la FDM³. En TDM se segregan muestras de cada señal en ranuras temporales que el receptor puede seleccionar mediante un reloj correctamente sincronizado con el transmisor; y en FDM, cada señal se transporta en una frecuencia subportadora que puede ser filtrada electrónicamente por el receptor [3].

Si bien la FDM y la TDM son sistemas de multiplexación incompatibles, la WDM puede hacer uso de señales previamente multiplexadas mediante las técnicas FDM y TDM en el dominio eléctrico. Por ello la WDM es, actualmente, la mejor solución a los límites de capacidad alcanzados recientemente con la TDM en el dominio eléctrico.

La historia de las técnicas de multiplexación ha demostrado una evolución en espiral sobre el espacio, la frecuencia y el tiempo, tal y como se muestra en la Figura 1.2. En efecto, la primera técnica de multiplexación óptica ha sido la SDM⁴, consistente en la mera disposición en paralelo, con el fin de incrementar la capacidad del enlace, de fibras ópticas transportando la misma longitud de onda entre el origen y el destino. En estos momentos la WDM, que también puede verse como una FDM óptica, es la técnica idónea para aprovechar el gran ancho de banda ofrecido por la fibra óptica. Cabe esperar por lo tanto, que la técnica de multiplexación óptica del futuro, cuando se resuelvan las limitaciones impuestas por la dispersión en la fibra, sea la TDM óptica [4].

² Acrónimo de la expresión inglesa *Time Division Multiplexing*, que se podría traducir como multiplexación por división en el tiempo.

³ Acrónimo de la expresión inglesa *Frequency Division Multiplexing*, que se podría traducir como multiplexación por división en frecuencia.

⁴ Acrónimo de la expresión inglesa *Space Division Multiplexing*, que se podría traducir como multiplexación por división en el espacio.

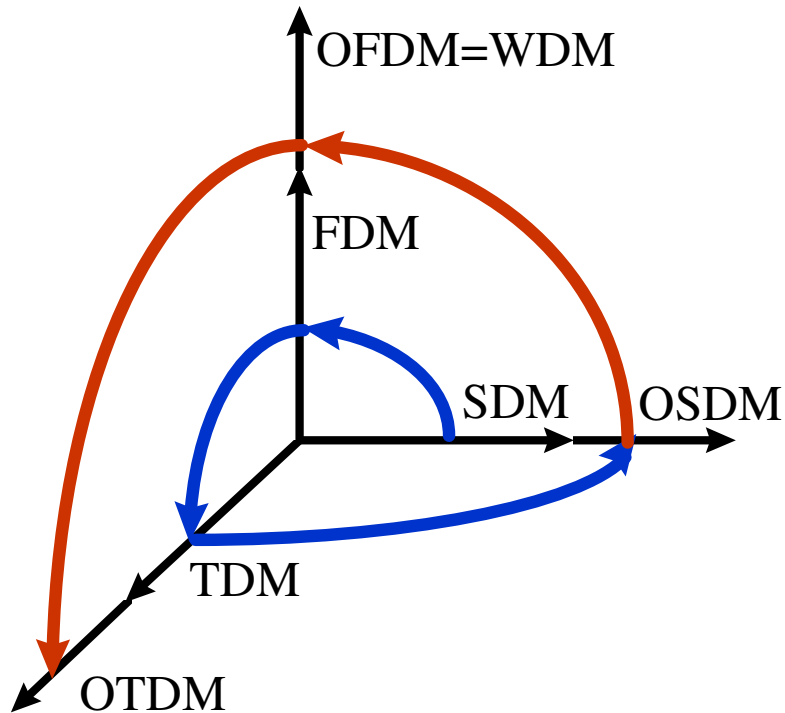


Figura 1.2: Evolución de las técnicas de multiplexación.

1.1.2 Principales características de los multi/demultiplexores

Un multiplexor ha de combinar las señales con unas pérdidas mínimas. Las pérdidas P_j , se expresan en decibelios (dB) a cada longitud de onda λ_j , mediante

$$P_j = 10 \log_{10} \left(\frac{\Phi_j}{\Phi_0} \right) \quad (1.1)$$

donde Φ_j es la potencia óptica inyectada en la línea de transmisión y Φ_0 la potencia incidente a λ_j .

En el otro extremo de la fibra, las señales a diferente longitud de onda son separadas mediante un demultiplexor, el cual, al igual que el multiplexor, debe tener unas pérdidas mínimas. Las pérdidas por diafonía óptica D_{ij} del canal i en el canal j son

$$D_{ij} = 10 \log_{10} \left(\frac{\Phi_{ij}}{\Phi_{jj}} \right) \quad (1.2)$$

Las pérdidas totales por diafonía óptica en un canal j son

$$D_j = 10 \log_{10} \left(\frac{\sum_{i \neq j} \Phi_{ij}}{\Phi_{jj}} \right) \quad (1.3)$$

Este efecto se debe principalmente al multiplexor cuando se utilizan fuentes de luz con anchuras espectrales mucho más pequeñas que las bandas de paso espectrales del demultiplexor. Por lo tanto, depende de las fuentes, los multiplexores y demultiplexores.

La diafonía eléctrica depende también de los receptores. A una sensibilidad del receptor equivalente, en general, la diafonía eléctrica es el doble en dB que la diafonía óptica [2]. La diafonía eléctrica de un sistema depende también de la potencia relativa y anchura espectral de los emisores, de la transmisión espectral en la fibra y de la variación de la sensibilidad del receptor con la longitud de onda.

1.2 Estructura del proyecto

Este trabajo tiene una estructura lineal, y parte del presente capítulo de introducción donde se presenta el concepto de multiplexación por división en longitud de onda.

En el segundo capítulo se hace un breve repaso a las redes WDM actualmente en desarrollo y a los proyectos relacionados con la WDM más relevantes a corto plazo. Así mismo, se aprovecha para estudiar el estado del arte de la tecnología óptica, centrándose en los cambios que han tenido que soportar los diferentes componentes para adecuarse a las características de las señales multiplexadas en longitud de onda.

En el tercer capítulo se presentan los multiplexores más relevantes, en estado de investigación o disponibles comercialmente. Todos ellos tienen en común que no se basan en la teoría de interferencia multimodal, pues este tipo de multiplexores constituyen el centro de estudio del presente proyecto y serán tratados con más profundidad en el sexto capítulo.

El cuarto capítulo trata detalladamente los mecanismos físicos más interesantes para desfasar, con control electrónico, una señal óptica. Se estudian en concreto los efectos electroóptico, termoóptico y acustoóptico.

En el quinto capítulo se aplican los conceptos presentados en el cuarto capítulo, para seleccionar el efecto más interesante para producir el desfasaje en las guías de onda que conformarán el *phasar* del multiplexor por división en longitud de onda a diseñar. En el resto del capítulo se tratan diversos métodos para simular el efecto seleccionado, en concreto el termoóptico, y su integración con los métodos de propagación de haz, mediante los que se estudian los distintos modos que viajan en una estructura de óptica integrada.

En el sexto capítulo se esboza el diseño teórico de un multiplexor activo y el de un conmutador basados en la teoría de la interferencia multimodal o MMI. Se demuestra que es posible conseguir un multiplexor MMI 1×2 activo, más grande pero con mayores tolerancias de fabricación y mayor funcionalidad que la de un multiplexor MMI 1×2 pasivo. Este multiplexor tiene tres etapas claramente diferenciadas: la primera y la última son dispositivos MMI, de interferencia multimodal, y la segunda es, una etapa desfasadora. Dicha etapa desfasadora la conforman una serie de guías con tramos curvos y rectos, y de calentadores controlados electrónicamente, a través de los cuales se induce el cambio de fase requerido a la entrada del tercer dispositivo MMI, en las señales que salen del primer dispositivo MMI. Se diseña también un conmutador termoóptico MMI 1×2, un dispositivo muy interesante para la conmutación en redes ópticas a tasas de transmisión moderadas.

En el séptimo capítulo, se muestran los mecanismos derivados para simular los

dispositivos en el sexto, utilizando el software comercial disponible. Por ciertas limitaciones del mismo, resultó finalmente imposible comprobar el diseño teórico del conmutador y del multiplexor.

El octavo capítulo es la enumeración de las conclusiones obtenidas tras el trabajo realizado, así como posibles futuras líneas de investigación.

1.3 Referencias

- [1] W. Tomlinson and G. Aumiller. “*Optical multiplexer for multimode fiber transmission systems*”. Applied Physic Letters, vol. 31, pp. 169, 1977.
- [2] J. P. Laude. “*Wavelength division multiplexing*”. Prentice Hall, 1993.
- [3] Paul E. Green, Jr. “*Fiber optic networks*”. Prentice Hall, 1993.
- [4] Govind P. Agrawal. “*Fiber-optic communications systems*”. John Wiley & Sons, 1992.