



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA

TÍTULO DEL TFC: Optimización de técnicas de medida de dispersión cromática a frecuencias ópticas

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicación especialidad en Sistemas de Telecomunicación

AUTORES: Marina Moreno Ramos
Marta Vázquez Núñez

DIRECTOR: Concepción Santos Blanco

FECHA: 13 de julio de 2010

Título: Optimización de técnicas de medida de dispersión cromática a frecuencias ópticas

Autores: Marina Moreno Ramos
Marta Vázquez Núñez

Director: Concepción Santos Blanco

Fecha: 13 de julio de 2010

Resumen

En los últimos años la fibra óptica se ha convertido en el medio de transmisión principal para los sistemas de comunicación. Su capacidad de manejo de grandes cantidades de datos así como su inmunidad frente al ruido y el aislamiento eléctrico son algunas de las características que hacen que esta tecnología sea ideal para usarse en los sistemas de comunicación.

Al objeto de explotar al máximo todo el potencial que ofrece la fibra, nos encontramos con que la dispersión cromática es el mayor limitante de la velocidad y distancia de transmisión de datos. En el departamento TSC se estudian nuevos métodos de caracterización de la dispersión cromática y se dispone de las herramientas de laboratorio necesarias para calcular su impacto.

El objetivo principal del proyecto es estudiar las técnicas de medida de dispersión cromática ya existentes para analizar sus limitaciones y proponer así nuevos métodos que optimicen sus prestaciones. En concreto se presentarán tres métodos, el MPSM, el ABCM y el RF Scan. Realizaremos sus estudios teóricos que posteriormente nos permitirán contrastar sus resultados en el laboratorio.

Los procesos de medida de la dispersión cromática en el laboratorio son controlados mediante ordenador. Se dispone de un primer prototipo de una interfaz gráfica denominada Fiber Test orientada a guiar al usuario durante el proceso de medida y a realizar los controles de instrumentos necesarios para llevar a cabo las medidas. Se propone como objetivo elaborar una nueva versión de la interfaz que racionalice la distribución de menús y que presente al usuario un entorno más amigable y visual, con nuevas opciones de interés y que permita que la interfaz vaya creciendo de manera modular para ir incorporando los nuevos métodos de medida que se van desarrollando. Hasta el momento la interfaz incorpora únicamente un método de medida. La idea es ampliar y mejorar la interfaz para que nos permita llevar a cabo las medidas correspondientes a los tres métodos mencionados anteriormente.

Title: Optimization of techniques for chromatic dispersion measurement at optical frequencies.

Authors: Marina Moreno Ramos
Marta Vázquez Núñez

Director: Concepción Santos Blanco

Date: July, 13th 2010

Overview

Over the last years optical fiber has become the main transmission medium for communication systems. Its ability to handle great amounts of data and its noise immunity and electrical isolation are some of the features that make this technology ideal for use in communication systems.

In the pursue to exploit all the fiber's potential, the chromatic dispersion is the main hurdle to fight with The TSC department studies new methods for characterizing the chromatic dispersion and it is had the tools of laboratory necessary to calculate his effects.

The project's main objective is to study existing chromatic dispersion measurement techniques and to analyze their limitations, and thus to propose new methods to optimize their performance. More specifically, we will present three methods, the MPSM, the ABCM and the RF Scan. We will analyze them from a mathematical point of view to subsequently compare their results in the laboratory.

Measurements in the laboratory require computer automation and therefore a graphical interface under the name Fiber Test has been built in order to guide the users through the measurement process. The goal in this TFC is to improve the design of Fiber Test for a more friendly environment and a more flexible and modular organization of the menus that allows for a better understanding of the measurement techniques and that makes present and future upgrades easy and direct.

To date Fiber Test includes only one method of measurement. The idea is to expand and improve the interface so that it allowsfor carrying out the measures for the three methods mentioned.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS	3
1.1 Fibra óptica	3
1.2 Dispersión	3
1.2.1 Dispersión cromática	3
1.2.2 Velocidad de fase, retardo de grupo y dispersión	4
1.3 Modulador Mach Zehnder	8
1.3.1 Tipos de moduladores	9
1.3.2 Modos de funcionamiento	9
1.4 Función de transferencia	10
1.4.1 Parámetros	10
1.5 Polarización de entrada	11
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE LABORATORIO	13
2.1 Instrumentos	13
2.1.1 Telecom Test Laser New Focus 6427	13
2.1.2 Fuente de alimentación programable Promax FA-851	13
2.1.3 Multímetro HP 8153A	13
2.1.4 Analizador de redes HP 8753D	14
2.1.5 Controlador de polarización	14
2.1.6 Bias-Tee	15
2.1.7 Modulador Lucent 2623NA	15
2.1.8 Modulador Fujitsu FTM7921ER/951	15
2.1.9 Detector óptico Agere	16
2.1.10 Conectores ópticos	16
2.1.11 Kit de limpieza de fibras	17
2.1.12 DUT (Device Under Test)	18
CAPÍTULO 3. INTERFAZ GRÁFICA FIBER TEST	20
3.1 Optimización de la interfaz gráfica Fiber Test	20
3.2 MENÚ Measure	21
3.2.3.1 Función de transferencia	22
3.2.3.2 MPSM	25
3.2.3.3 ABCM	29
3.2.3.4 RF Scan	33
3.2.4 MENÚ Plot	36
3.2.4.1 Función de transferencia	37
3.2.4.2 MPSM	38
3.2.4.3 ABCM	39
3.2.4.4 RF SCAN	40
3.3 Mejoras del Fiber Test	41
CAPÍTULO 4. MÉTODOS BÁSICOS DE MEDIDA DE DISPERSIÓN	42
4.1 Desarrollo matemático del modulador en modo genérico	42
4.2 Análisis matemático de la respuesta a la señal de test	43
4.3 Modulation Phase Shift Method (MPSM)	46

4.4	Limitaciones del MPSM	48
4.5	Método de Peucheret	48
4.6	Limitaciones del método de Peucheret	50
4.7	Análisis experimental del MPSM	50
4.7.3	Caracterización del montaje	52
4.7.4	Recorrido de potencias	52
4.7.5	Resultados obtenidos con la DCF	53
CAPÍTULO 5. ASYMMETRIC BIAS CONTROLLED METHOD		57
5.1	Desarrollo matemático del modulador en modo <i>asimétrico</i>	57
5.2	Asymmetric Bias Controlled Method (ABCM)	58
5.3	Análisis matemático del ABCM	59
5.4	Análisis experimental del ABCM	62
5.4.1	Caracterización del montaje	63
5.4.2	Recorrido de potencias	64
5.4.3	Resultados obtenidos con la DCF	64
5.5	Mejoras e inconvenientes del ABCM	66
5.5.1	<i>BIAS DRIFT</i> de los moduladores interferométricos	67
CAPÍTULO 6. RF SCAN		71
6.1	RF Scan	71
6.2	Análisis matemático del RF Scan	72
6.3	Análisis experimental del RF Scan	75
6.4	Implementación en Fiber Test	75
6.4.1	Recorrido de potencias	80
6.4.2	Resultados obtenidos con la DCF	81
6.4.3	Problemas experimentales	84
CONCLUSIONES Y LINEAS DE FUTURO		87
ANEXO I: CÓDIGO EN MATLAB		92
	Programa de la Función de Transferencia	92
	Programa del MPSM	96
	Programa del ABCM	102
	Programa del RF Scan	109
ANEXO II: DATASHEETS DE LOS DISPOSITIVOS		116

INTRODUCCIÓN

Debido a sus mínimas pérdidas de señal y a sus óptimas propiedades de ancho de banda, la fibra óptica se ha convertido en el medio de transmisión principal para los sistemas de comunicación. Desde sus primeras instalaciones en las líneas que enlazaban las grandes centrales de conmutación, la fibra se está trasladando hoy en día hasta los mismos hogares, extendiéndose su uso a un mayor abanico de aplicaciones.

Este papel destacado de la fibra óptica es debido a sus muchas propiedades favorables. Es un medio técnicamente idóneo para el desarrollo de las comunicaciones. Su gran capacidad de transmisión, su reducida atenuación de la señal y su inmunidad frente a interferencias electromagnéticas han permitido abrir las verdaderas autopistas de la información.

La dispersión es uno de los principales factores de degradación de la señal, que se han presentado en las redes de las telecomunicaciones basadas en fibra óptica. Hay varias clases, las más significativas son la dispersión cromática y la dispersión modal. De entre estas dos la más grave y la que más limita la velocidad y la distancia de transmisión es la dispersión modal. Por esta razón en las redes actuales predomina el uso de fibra óptica *monomodo*, en ella tan sólo se tiene dispersión cromática. Aún así la dispersión cromática impone límites a la transmisión y por ello este TFC se dedica a su estudio, medida y caracterización.

Es posible combatir los efectos de la dispersión cromática mediante el empleo de componentes ópticos diseñados adecuadamente. La solución pasa por emplear dispositivos denominados *compensadores de dispersión*. Estos componentes poseen características de dispersión opuestas a las de la fibra de tal forma que el efecto global sea de cancelación. Las *Dispersion Compensating Fiber Bragg Gratings* (DC-FBG) y las *Dispersion Compensating Fibers* (DCF) son algunos de los dispositivos que poseen estas propiedades. Para obtener una compensación eficiente es necesario un análisis detallado tanto de las características del elemento a compensar (normalmente fibra) como las del elemento compensador (normalmente DC-FBG o DCF). En ese sentido estudiaremos varios métodos de medida de dispersión cromática que presenten buenos compromisos entre precisión, versatilidad y sencillez de la medida y de los instrumentos necesarios.

Los objetivos del proyecto son, en primer lugar, efectuar el estudio del fenómeno de la dispersión cromática en fibra *monomodo* e identificar sus efectos y parámetros característicos.

En segundo lugar, analizaremos las bases teóricas de los métodos de medida estándar *Modulation Phase Shift Method* (MPSM) y *Peucheret*. Estos métodos utilizan como señal de test la señal óptica modulada mediante un tono de radiofrecuencia. La modulación se realiza normalmente utilizando un modulador electro-óptico Mach Zehnder. Se estudiarán exhaustivamente estos dispositivos debido a la repercusión de su configuración en los métodos de

medida de dispersión estudiados en el proyecto. Concretamente, buscaremos las opciones de configuración del modulador más adecuadas que nos permitan optar a nuevos diseños más rápidos y eficientes. Con este objetivo y partiendo de las bases de los métodos comentados se desarrollarán dos nuevas técnicas de medida de dispersión, el *Asymmetric Bias Controlled Method* (ABCM) y el RF Scan.

Las implementaciones prácticas de cada uno de los métodos se llevarán a cabo utilizando los instrumentos del banco de medidas ópticas del laboratorio D3-212 del departamento TSC. Dichos dispositivos estarán controlados remotamente por la interfaz gráfica Fiber Test. El primer prototipo de esta interfaz fue creado por antiguos estudiantes del grupo de investigación del departamento TSC con el objetivo de sistematizar y facilitar las técnicas de medida de dispersión. Está implementada con el programa Matlab, una herramienta muy extendida en el ámbito de la ingeniería, que nos permite combinar cálculos numéricos, gráficos y programación de manera fácil y sencilla.

La primera versión tiene algunas carencias por lo que otro de nuestros objetivos se centrará en optimizar y automatizar la interfaz gráfica de manera que resulte más accesible para el usuario. Hasta el momento la interfaz gráfica presenta únicamente los procesos de medida Función de Transferencia y MPSM, la idea es mejorarlo y ampliarlo en función de los resultados que se vayan obteniendo a lo largo del proyecto.

CAPÍTULO 1. CONCEPTOS BÁSICOS

En este capítulo analizaremos algunos conceptos básicos necesarios para el desarrollo del proyecto y para su posterior aplicación experimental.

1.1 Fibra óptica

Una fibra óptica es una guíaonda dieléctrica con geometría cilíndrica. Está formada por un núcleo cilíndrico de material dieléctrico rodeado por otro material también dieléctrico que posee un índice de refracción ligeramente inferior. La guíaonda así establecida facilita que las señales se propaguen de manera confinada en su interior.

Del análisis electromagnético de la propagación de las señales en las fibras se desprenden los posibles modos del campo que ésta es capaz de guiar. La propiedad de guiar o bien uno o bien múltiples de estos modos permite establecer una clasificación básica de las fibras: una fibra recibe el nombre de **multimodo** cuando a través de ella pueden propagarse varios modos; se dice que una fibra es **monomodo** si sólo admite la propagación del modo fundamental a las frecuencias de interés.

1.2 Dispersión

Hay varias clases de dispersión, las más significativas son la dispersión cromática y la dispersión modal. Cada una de ellas es generada por mecanismos diferentes pero al final producen el mismo efecto sobre el pulso que se propaga.

La dispersión modal es debida a la propagación de la energía de la señal repartida en varios modos de propagación con constantes de propagación diferentes y por tanto velocidades de transmisión diferentes. Es el tipo de dispersión más grave y que más limita la velocidad y la distancia de propagación. Para evitar este tipo de dispersión se fabrican fibras *monomodo* con un diámetro más reducido que a pesar de presentar mayores dificultades de acoplo y de conexión, están libres de este tipo de dispersión. Este proyecto se centrará en fibras *monomodo* y por tanto no se considerará dispersión modal sino tan solo dispersión cromática.

1.2.1 Dispersión cromática

La dispersión cromática es consecuencia de la dependencia del índice de refracción efectivo del modo guiado en la fibra con la longitud de onda; es decir, diferentes componentes de frecuencia de los pulsos transmitidos viajan a diferentes velocidades, produciendo un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos. Este efecto puede originar la superposición de diferentes pulsos, aumentando así la probabilidad de producirse errores de detección.

1.2.2 Velocidad de fase, retardo de grupo y dispersión

Con el propósito de ofrecer una visión de conjunto de los principales aspectos relacionados con la propagación de señales en las fibras ópticas, en este apartado se recopilan algunos conceptos esenciales sobre la dispersión y sus efectos.

Velocidad de fase

Velocidad a la que avanza la fase de una onda monocromática propagándose por un medio lineal y homogéneo. En nuestro caso, se concreta como la velocidad a la que se propaga la señal portadora.

Velocidad de grupo y retardo de grupo

Cuando se superponen ondas que se propagan con velocidad diferente, se obtiene un estado no periódico. Ahora bien, si las ondas que se propagan tienen frecuencias y velocidades próximas su composición da lugar a la formación de pulsos o trenes de onda.

Hay que señalar, que la velocidad de propagación de tales pulsos, denominada **velocidad de grupo**, puede ser distinta de la velocidad de fase o velocidad de cada una de las ondas que la constituyen.

Para ilustrar este concepto consideramos la onda constituida por una portadora modulada por la señal de información (envolvente), (1.1). Veremos a través del siguiente análisis que la portadora se propaga a la **velocidad de fase**, mientras que la envolvente lo hace a una velocidad distinta, la velocidad de grupo.

Supongamos que una portadora de frecuencia ω_0 es modulada por un pulso $x(t)$, cuya variación en el tiempo es lenta si se compara con la frecuencia portadora (desde el punto de vista espectral, esto significa que la anchura del espectro es reducida en comparación con ω_0). En relación a esta señal, interesa conocer cómo afecta la propagación a través de un medio dispersivo en una distancia z arbitraria. (Ref [1])

La expresión de la señal, es la siguiente:

$$E(t) = x(t) \cdot e^{j\omega_0 t} \quad (1.1)$$

Puesto que cada componente espectral de la señal experimenta un retardo distinto en el medio, de cara al análisis conviene escribir esta última en términos de su composición en frecuencias por medio de la transformada de Fourier. Las envolventes o equivalentes paso bajo se relacionan mediante:

$$X_{out}(\omega) = X_{in}(\omega) \cdot e^{-j\beta(\omega)z} \quad (1.2)$$

Donde:

- $X_{in}(\omega)$: es la Transformada de Fourier de la señal transmitida.
- $X_{out}(\omega)$: es la Transformada de Fourier de la señal recibida.
- $\beta(\omega)$: es la constante de fase del modo de propagación fundamental.
- z : es la longitud de la fibra recorrida.

Al cumplirse que los saltos de frecuencia son mucho más pequeños que la frecuencia ω_0 , es decir, $\omega - \omega_0 \ll \omega_0$, la constante de propagación β puede reemplazarse por su desarrollo en serie de Taylor alrededor de ω_0 :

$$\beta(\omega) \approx \beta(\omega_0) + (\omega - \omega_0) \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} + \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2} \left. \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right|_{\omega_0} + \frac{(\omega - \omega_0)^3}{6} \left. \frac{\partial^3 \beta}{\partial \omega^3} \right|_{\omega_0} + \dots \quad (1.3)$$

donde los términos a partir de orden tres se han considerado despreciables.

Llamando:

$$\beta_0 = \beta(\omega_0) \quad (1.4) \quad \beta_1 = \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \quad (1.5) \quad \beta_2 = \left. \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} \right|_{\omega_0} \quad (1.6)$$

Y sustituyendo lo anterior en la expresión de $\beta(\omega)$ podemos reescribir la expresión 1.3 como:

$$\beta(\omega) \approx \beta_0 + \Delta\omega\beta_1 + \frac{\Delta\omega^2}{2}\beta_2 \quad (1.7)$$

Por otra parte, si el parámetro β_2 es cero, la envolvente mantiene su forma y tan sólo sufre un retardo: $\tau = \beta_1 \cdot z$. La velocidad a la que se ha propagado la envolvente es la ya comentada velocidad de grupo que se define como:

$$v_g = \left(\left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \right)^{-1} \quad (1.8)$$

De la misma manera, el retardo experimentado es denominado retardo de grupo y se relaciona con la velocidad de grupo como sigue:

$$\tau_g (s/m) = \frac{1}{v_g} = \left. \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} \quad (1.9)$$

Finalmente, si se hace la representación gráfica de varios valores del retardo de grupo para cada longitud de onda, se puede determinar el parámetro de la dispersión (D), como la pendiente de la recta resultante.

Matemáticamente se puede expresar como:

$$D = \left. \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda} \right|_{\lambda_0} = \left. \frac{\partial \omega}{\partial \lambda} \right|_{\omega_0} \cdot \beta_2 \quad (1.10)$$

Sabiendo que:

$$\partial \omega \approx -\frac{2\pi \cdot c}{\lambda_0^2} \partial \lambda \quad (1.11)$$

Podemos expresar el parámetro de la dispersión de la siguiente forma:

$$D = -\frac{2\pi \cdot c}{\lambda_0^2} \cdot \beta_2 \quad (1.12)$$

Este parámetro, en la fibra, puesto que la dispersión es proporcional a la distancia de fibra recorrida, se mide en picosegundos por nanómetro y por kilómetro (ps/nm·Km). Un valor típico en la fibra *monomodo* estándar en tercera ventana (1.55μm) es 17ps/(nm·Km). En el caso de elementos dispersivos como las DC-FBG la dispersión introducida se da como un valor concentrado directamente en ps/nm.

Es importante considerar, pues, que el análisis de la dispersión anterior, basado en β , es válido únicamente para una fibra o cuando la dispersión es acumulativa con la distancia. En el caso de dispositivos de dispersión concentrada como las FBG hablamos de dispersión total y por lo tanto para su desarrollo se usa la fase óptica total. La relación entre ellas es la siguiente $\phi = -\beta \cdot z$.

A continuación puesto que en todos los métodos de medida se considera el efecto del elemento dispersivo sobre una señal de test compuesta por la frecuencia portadora más dos bandas laterales separadas $\Delta\omega$ de la portadora, donde $\Delta\omega$ corresponderá a la frecuencia de la señal moduladora utilizada, se desarrolla el proceso matemático considerando las fases ópticas correspondientes a las bandas superior e inferior.

Sabiendo que el término suma de fases se expresa de la siguiente forma:

$$\sum \phi = \phi^+ + \phi^- = \phi(\omega_0 + \Delta\omega) + \phi(\omega_0 - \Delta\omega) \quad (1.13)$$

Y considerando que las fases ópticas en desarrollo de Taylor son:

$$\begin{aligned}\phi^+ &= \phi(\omega_0 + \Delta\omega) \approx \phi(\omega_0) + \left. \frac{\delta\phi}{\delta\omega} \right|_{\omega_0} \cdot \Delta\omega + \left. \frac{1}{2} \frac{\delta^2\phi}{\delta\omega^2} \right|_{\omega_0} \cdot \Delta\omega^2 \\ \phi^- &= \phi(\omega_0 - \Delta\omega) \approx \phi(\omega_0) - \left. \frac{\delta\phi}{\delta\omega} \right|_{\omega_0} \cdot \Delta\omega + \left. \frac{1}{2} \frac{\delta^2\phi}{\delta\omega^2} \right|_{\omega_0} \cdot \Delta\omega^2\end{aligned}\tag{1.14}$$

Obtenemos:

$$\sum \phi = 2 \cdot \phi(\omega_0) + \left. \frac{\delta^2\phi}{\delta\omega^2} \right|_{\omega_0} \cdot \Delta\omega^2\tag{1.15}$$

En este último caso el primer término $2 \cdot \phi(\omega_0)$ no lo consideramos ya que sin pérdida de generalidad consideramos que se elige el origen de tiempos de forma que la fase sea cero a la frecuencia portadora. La expresión 1.13 queda entonces del siguiente modo:

$$\sum \phi \approx -\beta_2 \cdot \Delta\omega^2\tag{1.16}$$

Finalmente, observando la expresión 1.14 y recordando que el parámetro $\beta_2 = -\frac{\lambda_0^2 \cdot D}{2\pi \cdot c}$, podemos reescribir el sumatorio de fases de la siguiente forma:

$$\boxed{\sum \phi = \frac{\lambda_0^2 \cdot D \cdot 2\pi \cdot f_m^2}{c}}\tag{1.17}$$

Por otro lado, también podemos expresar la resta de fases entre bandas con la siguiente expresión:

$$\Delta\phi = \phi^+ - \phi^- = \phi(\omega_0 + \Delta\omega) - \phi(\omega_0 - \Delta\omega)\tag{1.18}$$

Del mismo modo que antes, considerando el desarrollo realizado en las expresiones 1.14, podemos definir el parámetro diferencia de fases como sigue:

$$\Delta\phi \approx 2 \left. \frac{\delta\phi}{\delta\omega} \right|_{\omega_0} \cdot \Delta\omega\tag{1.19}$$

Sustituyendo la expresión 1.5, la expresión queda de la siguiente forma:

$$\Delta\phi \approx 2\beta_1 \cdot \Delta\omega \quad (1.20)$$

Finalmente, sabiendo que el parámetro β_1 se corresponde con el retardo de grupo podemos concretar la diferencia de fases como:

$$\Delta\phi \approx 2 \cdot \tau_g \cdot \Delta\omega \quad (1.21)$$

Estos dos parámetros, suma de fases y diferencia de fases, serán utilizados en los siguientes capítulos ya que su desarrollo es imprescindible para el cálculo de la dispersión cromática.

1.3 Modulador Mach Zehnder

El modulador Mach Zehnder (MZ) es uno de los principales dispositivos de este proyecto puesto que su implementación será necesaria para efectuar las modulaciones entre la portadora óptica y la moduladora de RF.

Este modulador se basa en el efecto electro-óptico que tiene lugar en ciertos cristales entre los que destaca el Niobato de Litio. Según este efecto la fase de la señal óptica que se propaga por el cristal cambia de manera proporcional al campo eléctrico que se le aplique. Para transformar la modulación de fase en una modulación de amplitud se recurre a estructuras interferométricas integradas entre las que destaca la configuración Mach Zehnder (figura 1.1).

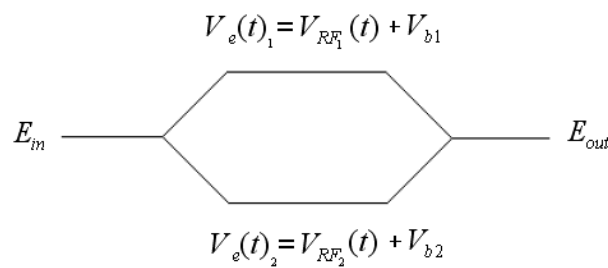


Fig. 1.1. Estructura modulador MZ

En la figura, una onda óptica representada por el campo eléctrico asociado E_{in} se distribuye de forma equitativa entre dos guías ópticas integradas, cada una de ellas sometida a la acción de un electrodo sobre el que se aplica un nivel de continua V_{bn} , destinado a polarizar el modulador en un punto de trabajo determinado, y una señal moduladora V_{RF_n} . La onda óptica de salida E_{out} será el resultado de la interferencia entre estas dos ondas que han sufrido desfases diferentes y por tanto estará modulado en amplitud en función de los voltajes aplicados a cada electrodo.

Las diferencias de fase introducidas en cada uno de los brazos son proporcionales a los voltajes aplicados y vienen dadas por:

$$\Delta\phi_{1,2} = \frac{\pi}{V_c} (V_{b1,2} + V_{RF1,2}(t)) \quad (1.22)$$

Siendo V_c la sensibilidad del electrodo correspondiente. Este es un parámetro característico del electrodo y mide la eficiencia de modulación del mismo.

Habitualmente, la componente de radiofrecuencia es una señal pequeña frente a la tensión de *bias*, lo que permite hacer aproximaciones que se conocen con el nombre de ***small signal approximations***.

Es importante destacar también, que según la configuración del Mach Zehnder la sensibilidad de los electrodos se combina para dar lugar a la tensión de media onda del modulador o V_π (ver apartado 1.4.1).

1.3.1 Tipos de moduladores

Single-Drive: este tipo de moduladores posee un único acceso para los dos brazos interferométricos. La señal eléctrica introducida por este acceso afectará de la misma forma a los dos electrodos pero con signo contrario. Este modo de trabajo es el conocido como *push-pull*.

Dual-Drive: este tipo de moduladores tiene dos accesos, uno para cada uno de los dos brazos. Esto nos permite trabajar, además de en modo *push-pull*, en otro tipo de configuraciones como por ejemplo en modo *asimétrico*.

1.3.2 Modos de funcionamiento

Push-Pull: como ya hemos comentado anteriormente esta configuración es típica de moduladores *single-drive*. Consiste en introducir a los electrodos del modulador la misma tensión pero con signo contrario:

$$\theta_1(t) = -\theta_2(t) \quad (1.23)$$

Con esto conseguimos generar dos modulaciones de fase idénticas pero de signo contrario que a la salida del modulador provocarán una modulación de amplitud. Este modo de trabajo será utilizado en el método de medida MPSM explicado en el capítulo 4.

Asimétrico: esta configuración es posible con moduladores *dual-drive*. En este caso se aplica una señal eléctrica tan solo en uno de los brazos mientras que por la otra rama la señal óptica circula libremente sin verse afectada.

$$\theta_2(t) = 0 \quad (1.24)$$

Este modo de trabajo será utilizado para los métodos ABCM y RF Scan explicados en los capítulos 5 y 6 respectivamente.

1.4 Función de transferencia

Es la relación entre la potencia de salida del modulador y la tensión que se introduce en los electrodos. En ella podemos encontrar varios parámetros interesantes para la caracterización del modulador. **(Ref [2])**

1.4.1 Parámetros

Voltaje de media onda (V_{π}): es la diferencia de voltaje que hay entre el punto de máxima potencia y el de mínima potencia de una función de transferencia. Este parámetro nos proporciona información de la eficiencia del modulador. Cuanto más baja sea la V_{π} , más eficiente será el modulador ya que querrá decir que necesita menos tensión para conseguir una fase de 180° entre las ramas interferométricas.

La relación del parámetro sensibilidad del electrodo con el voltaje de media onda o V_{π} depende del modo de trabajo del modulador. Por ejemplo, si se trabaja en modo *push-pull*, para obtener un desfase de 180° se requiere un voltaje igual a la mitad de la sensibilidad de cada uno de los electrodos. Es por eso que el voltaje de media onda del modulador en modo *push-pull* se relaciona con la sensibilidad de cada uno de los electrodos, supuestamente iguales, como:

$$V_{\pi} = \frac{V_c}{2} \quad (1.25)$$

Si se trabaja en modo *asimétrico* en cambio, para obtener un desfase de 180° entre las ramas se requiere un voltaje igual a la sensibilidad del electrodo que se está usando. Es por eso que el voltaje de media onda del modulador en modo *asimétrico* se relaciona con la sensibilidad de los electrodos, supuestamente iguales, como:

$$V_{\pi} = V_c \quad (1.26)$$

Punto de cuadratura (QP): este punto indica la zona de trabajo donde la relación entre la potencia de salida y la tensión aplicada a los electrodos se comporta de forma lineal en un margen de tensiones de *bias* cercano. Se corresponde con la mitad del valor de V_{π} .

Extinction ratio (ER): relación entre la potencia máxima y mínima de la función de transferencia. En un caso ideal, donde se divide la señal en ambas ramas por igual, el ER es infinito.

Punto de máxima transmisión (MTP): En este punto la potencia de salida es máxima.

Punto de mínima transmisión (mTP): se corresponde con el voltaje V_{π} cuando el MTP se encuentra en 0V. Si nos situamos en este punto la potencia de salida de la frecuencia portadora es prácticamente nula. Es por ello que permite conseguir modulaciones en doble banda lateral sin portadora. Junto con el MTP nos permite calcular el voltaje de media onda

Su representación gráfica es la siguiente:

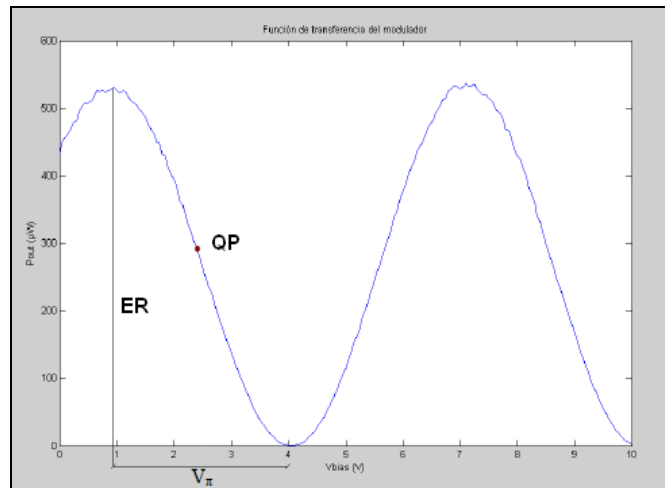


Fig. 1.2. Función de transferencia

1.5 Polarización de entrada

Otro de los puntos importantes en el desarrollo del proyecto es el sistema de polarización de entrada del modulador Mach Zehnder. Como se ha explicado en el apartado 1.3 el MZ es un dispositivo fundamental en el montaje y por lo tanto debemos garantizar su correcto funcionamiento para conseguir los resultados esperados.

Los moduladores basados en interferómetros de Mach Zehnder (MZ) emplean en uno de sus brazos un material electro-óptico, en la mayoría de casos el Niobato de Litio. Este material es cristalino y anisotrópico, lo que significa que los índices de refracción dependen de la dirección de los ejes del cristal. Esto supone que deba controlarse cuidadosamente la polarización óptica de entrada al modulador.

En particular existe una dirección óptima en la cual la eficiencia de la interacción entre las ondas óptica y eléctrica es mayor. Nos interesa, entonces, que la luz incida sobre el cristal con esta polarización.

Existen varias formas para conseguir esto, la más común es el uso de una *fibra preservadora de polarización (Polarization Maintaining Fiber, PMF)* a la entrada del modulador. Es otro tipo de fibra *monomodo* que se diseña para permitir la

propagación de una única polarización de la señal óptica de entrada, en este caso será la polarización que da la máxima eficiencia de modulación, esto es, el mínimo valor posible de V_{π} . Su principio de funcionamiento se basa en introducir deformaciones geométricas en el núcleo de la fibra durante el proceso de fabricación para conseguir un comportamiento birrefringente.

Es importante destacar, pero, que esta fibra preservadora va a rechazar la componente de la luz en polarización perpendicular a la de su dirección de polarización, lo que supone una pérdida de potencia si la polarización en la fibra que se le conecta al modulador no coincide con la de la fibra preservadora.

En las fibras estándar que utilizaremos en el resto del montaje, debido a su simetría cilíndrica, el modo fundamental de propagación puede adoptar cualquier polarización. Al objeto de reducir al máximo las pérdidas de potencia por desalineamiento de polarización entre la señal en la fibra estándar y en la fibra preservadora a la entrada del MZ, utilizaremos un controlador de polarización que nos permitirá variar la polarización en la fibra estándar de modo que en su conexión con la fibra preservadora exista un alineamiento de polarización que permita obtener niveles de señal aceptables para nuestros experimentos.

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE LABORATORIO

2.1 Instrumentos

En este capítulo definiremos los dispositivos de medida utilizados en el laboratorio. Resulta fundamental conocer sus propiedades para realizar una correcta caracterización y obtener unos resultados óptimos.

2.1.1 Telecom Test Laser New Focus 6427

Este dispositivo actúa como fuente de luz en el montaje de medida de la dispersión. Es un láser sintonizable que nos permite realizar un barrido óptico, concretamente esto es necesario para la implementación del método de medida MPSM. Dispone de un puerto GPIB que conectado al ordenador nos permite controlar el dispositivo láser a través del programa Matlab y la interfaz gráfica Fiber Test.



Fig. 2.1. Láser New Focus 6427

Láser NEW FOCUS 6427	
BW óptico	1520 - 1570 nm
Potencia óptica	-3 – 7 dBm
Tipo de conector	FC/APC

Tabla 2.1. Características New Focus Láser 6427

2.1.2 Fuente de alimentación programable Promax FA-851

La fuente de alimentación programable FA-851 se puede controlar remotamente, gracias a su puerto RS-232 permitiendo disponer al usuario de todas las funciones de control automáticas vía PC. Su uso en nuestro proyecto, nos permite obtener la tensión que le introducimos al modulador como *bias*. Esto es importante para realizar las medidas de la Función de Transferencia y los métodos ABCM y RF Scan ya que podemos variar la tensión de *bias* según sea necesario.



Fig. 2.2. Fuente programable FA-851

2.1.3 Multímetro HP 8153A

Este dispositivo nos permite obtener medidas de potencia que son necesarias para realizar las medidas de la Función de Transferencia. Como el láser, tiene

un puerto GPIB que nos permite conectarnos vía PC y por tanto controlar el dispositivo mediante el programa Matlab y la interfaz gráfica.



Fig. 2.3. Multímetro HP 8153A

Multímetro HP 8153A	
BW óptico	800- 1700 nm
Error tolerado	±2.2%
Margen de potencias	-110 – 27 dBm
Tipo de conector	SC/APC

Tabla 2.2. Características Multímetro HP 8153A

2.1.4 Analizador de redes HP 8753D

El analizador de redes está presente en el montaje de las tres técnicas de medida de dispersión, el MPSM, el ABCM y el RF Scan. En este proyecto su principal aplicación es la de proporcionar la señal de radiofrecuencia con la que se modulará la señal óptica y medir la fase y la amplitud eléctrica de la señal detectada tras el Device Under Test (DUT) referida a esta señal de radiofrecuencia (parámetro S_{21} en módulo y fase). (Ref [3])



Fig. 2.4. Analizador de redes 8753D

Las características más relevantes del analizador tanto siendo usado como generador de señal o como medidor se muestran en las tablas 2.3 y 2.4.

Analizador de redes HP 8753D (generador de señal)	
BW eléctrico	30 KHz - 6 GHz
Máx. potencia de salida	10 dBm
Mín. potencia de salida	-15 dBm
Tipo de conector	N

Tabla 2.3. Características HP 8753D

Analizador de redes HP 8753D (medidor)	
BW eléctrico	30 KHz - 6 GHz
Máx. potencia de entrada	10 dBm
Tipo de conector	N

Tabla 2.4. Características HP 8753D

2.1.5 Controlador de polarización

Como se ha comentado en el apartado 1.5, el controlador de polarización es un elemento esencial para conseguir un buen funcionamiento del modulador electro-óptico. Este dispositivo nos permite adaptar la luz emitida por el láser para que adquiera una polarización muy similar a la de la fibra preservadora de polarización a la entrada del MZ.

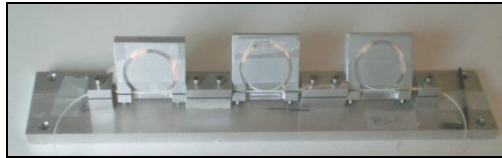


Fig. 2.5. Polarizador

Para conseguir un correcto funcionamiento de este dispositivo es necesario mover sus piezas móviles hasta conseguir la posición que nos permita obtener la máxima potencia en el modulador MZ. Esto lo podemos comprobar realizando diferentes funciones de transferencia mientras variamos la posición de dichas piezas.

2.1.6 Bias-Tee

El Bias-Tee nos permite multiplexar dos señales eléctricas, una de ellas de radio frecuencia y la otra continua. De esta forma podemos introducir por un mismo brazo del modulador una señal de RF y una tensión de *bias*.



Fig. 2.6. Bias-Tee

2.1.7 Modulador Lucent 2623NA

El modulador Lucent es del tipo *single-drive* y trabaja en modo *push-pull*. Tiene un único acceso por el cual introducimos la señal de *bias* y de RF mediante el Bias-Tee. Será el modulador que usemos preferentemente en el método MPSM. Tal y como mostrará el análisis teórico, los otros dos métodos precisan que el modulador trabaje en modo asimétrico y por tanto requerirán del uso de un modulador *dual-drive*.

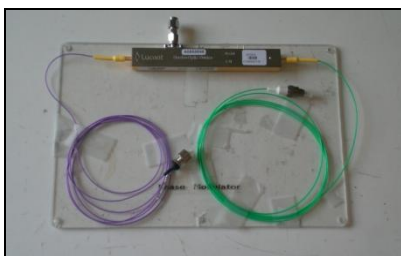


Fig. 2.7. Modulador Lucent

Modulador LUCENT AGERE 2623	
BW óptico	1525 – 1625 nm
BW eléctrico	10 GHz
Impedancia electrodos	43 Ω
Pérdidas inserción (IL)	3.7 dB
V_{π} ($V_{\text{máx}} - V_{\text{min}}$)	3.1 V
Tipo de conectores	FC/UPC

Tabla 2.5. Características Modulador Lucent

2.1.8 Modulador Fujitsu FTM7921ER/951

El modulador Fujitsu es de tipo *dual-drive* y permite trabajar en modo *asimétrico*. Es un componente esencial en los montajes ABCM y RF Scan.

Tiene dos accesos por los cuales al implementar estos dos métodos introduciremos respectivamente la señal de *bias* y la señal de RF.

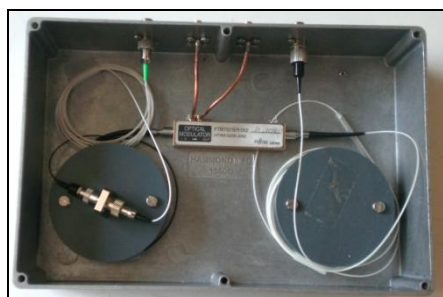


Fig. 2.8. Modulador Fujitsu

Modulador Fujitsu	
BW óptico	1530 – 1608 nm
BW eléctrico	8.5 GHz
Impedancia electrodos	50 Ω
Pérdidas inserción (IL)	6 - 7 dB
V_{π} ($V_{\text{máx}} - V_{\text{min}}$)	4 V
Tipo de conectores	FC/UPC

Tabla 2.6. Características del Modulador Fujitsu

2.1.9 Detector óptico Agere

El detector óptico demodula la portadora óptica recibida a través de la fibra, recuperando la señal eléctrica de información, para posteriormente medir en el analizador de redes su fase o amplitud dependiendo del método de medida realizado.



Fig. 2.9. Detector óptico

Las características técnicas más importantes del dispositivo se muestran en las tablas 2.7 y 2.8.

Detector óptico Agere	
BW óptico	1280 – 1580 nm
BW eléctrico	30 KHz – 9 GHz
Vcc (alimentación)	8 V

Tabla 2.7. Características detector óptico

Nº PIN	Descripción
1	GND
2	Vcc
3	Vcc
4	GND
5	GND
6	GND

Tabla 2.8. Características detector óptico

2.1.10 Conectores ópticos

Constituyen uno de los elementos más importantes dentro de la gama de dispositivos pasivos necesarios para establecer un enlace óptico. Su misión es la de permitir el alineamiento y unión temporal y repetitivo, de dos o más fibras ópticas entre sí y en las mejores condiciones ópticas posibles.

Existen varios tipos de conectores, en nuestro caso utilizamos de tipo FC. En ellos la conexión se realiza mediante una rosca, haciendo encajar la lengüeta del conector macho en el conector hembra. Esta implementación resulta fácil para el usuario y además aporta robustez en las pruebas de laboratorio.



Fig. 2.10. Conector FC

El acabado de las ferrules de los conectores ópticos se realiza aplicando diversas tecnologías denominadas habitualmente como *pulidos*:

- **Conectores con pulido APC:** este tipo de conectores disponen de un pulido angular convexo de 8° . Se suelen identificar por su color verde.
- **Conectores con pulido UPC:** este tipo de conectores están pulidos horizontalmente. Se suelen identificar por su color negro.

Es importante destacar que para poder realizar una conexión entre conectores con pulido APC y UPC debemos introducir una fibra intermedia que disponga en cada uno de sus extremos de un conector FC con un pulido diferente. De esta forma siempre conectemos entre sí conectores con el mismo tipo de pulido.

2.1.11 Kit de limpieza de fibras

Para un correcto funcionamiento del sistema es importante mantener limpios los conectores de las fibras. Para ello utilizamos un kit de limpieza específico compuesto de un microscopio (Westover Scientific FM-C400), Alcohol Isopropílico y un paño estéril.

Para realizar el proceso de limpieza se introduce la fibra en el microscopio y mediante una luz LED se observa su núcleo. De esta manera, podemos detectar las motas de polvo que puedan afectarnos a la medida y eliminarlas utilizando el paño húmedo en alcohol isopropílico.



Fig. 2.11. Kit de limpieza

2.1.12 DUT (Device Under Test)

Una forma de compensar la dispersión introducida por un tramo de fibra consiste en colocar, delante o detrás de él, otro tramo de fibra de características de dispersión opuestas, de forma que el efecto global sea de cancelación.

Entre este tipo de fibras se encuentran las DCF (Dispersión Compensating Fibers) y las DC-FBG (Dispersion Compensating Fiber Bragg Gratings). Estos serán los dispositivos dispersivos que utilizaremos como test (Device Under Test, DUT) para validar nuestros métodos de medida.

Compensador de Dispersión Cromática PIRELLI (DC-FBG)

La DC-FBG introduce un retardo que depende de la longitud de onda de forma que se compense el retardo sufrido por las diferentes longitudes de onda de la señal transmitida. Concretamente nos sirve para compensar la dispersión que podrían introducir unos 80km de fibra en tercera ventana.



Fig. 2.12. PIRELLI
CDC-04074

PIRELLI CDC-04074	
BW óptico	1557.27 – 1561.19 nm
Dispersión nominal	-1253.35 ps/nm
Pérdidas inserción (IL)	6.18 dB
Tipo de conectores	FC/UPC

Tabla 2.9. Características PIRELLI
CDC-04074

Fibra compensadora de dispersión cromática (DCF)

Las DCFs se caracterizan por poseer un parámetro de dispersión cromática elevado y de signo opuesto al de las fibras convencionales operando en tercera ventana. Colocando una cierta longitud de DCF tras el enlace de fibra óptica que constituye el sistema de comunicaciones, es posible compensar la dispersión cromática acumulada durante el trayecto. En nuestro caso, la DCF está formada por 14.76 Km de fibra equivalentes a -1362 ps/nm de dispersión.



Fig. 2.13. Fibra
compensadora

Fibra compensadora de dispersión	
Dispersión nominal	-1362 ps/nm
Pérdidas inserción (1575nm)	9.35 dB
Tipo de conectores	FC/APC

Tabla 2.10. Características fibra compensadora

La ventaja de las DC-FBGs frente a las DCF es que la DC-FBG es un dispositivo compacto que nos puede ofrecer valores de dispersión altos con pocas pérdidas de inserción, mientras que en el caso de la DCF las pérdidas de inserción aumentan de manera proporcional a la dispersión introducida.

La DC-FBG del laboratorio permite obtener la misma dispersión que 14.76 Km de fibra compensadora que introducen unas pérdidas de 9.35 dB, con tan solo 6.18 dB de pérdidas de inserción. Por el contrario, las DC-FBGs son dispositivos de banda estrecha, con lo que el margen de longitudes de onda de utilización es limitado. En nuestro caso necesitaremos seleccionar de manera precisa la longitud de onda a utilizar en el láser sintonizable si usamos la DC-FBG mientras que en el caso de la DCF podremos usar un mayor margen de longitudes de onda, o incluso el láser fijo de nuestro banco de medidas.

CAPÍTULO 3. INTERFAZ GRÁFICA FIBER TEST

En este capítulo desarrollaremos el proceso de actualización del primer prototipo de la interfaz gráfica Fiber Test. Esta aplicación nos permitirá obtener los resultados experimentales en cada uno de los métodos presentados.

En la primera versión, el programa presentaba una estructura de menús poco eficiente ya que sólo permitía al usuario realizar medidas efectuando todo el montaje experimental. Para mejorar este inconveniente, se ha reestructurado tanto su diseño visual como su estructura interna de manera que sea más amigable y fácil de seguir por el usuario y además incluya más opciones de medida.

Para presentar las mejoras realizadas se explicarán por separado cada uno de los menús en que hemos estructurado el programa, el menú *Measure* y el menú *Plot*. Cada una de las partes constará de cuatro apartados dedicados a los diferentes procesos de medida: la Función de Transferencia, el MPSM, el ABCM y el RF Scan. En cada uno de los casos, se explicarán detalladamente los pasos a seguir para realizar la medida utilizando el nuevo prototipo de la interfaz gráfica.

3.1 Optimización de la interfaz gráfica Fiber Test

El programa se estructura en dos grandes bloques. El primero de ellos *Measure* nos permite realizar medidas y caracterizaciones, mientras que el segundo, menú *Plot*, nos permite cargar datos que han sido realizados anteriormente en el contexto del menú *Measure*.

La pantalla inicial del programa es la siguiente:

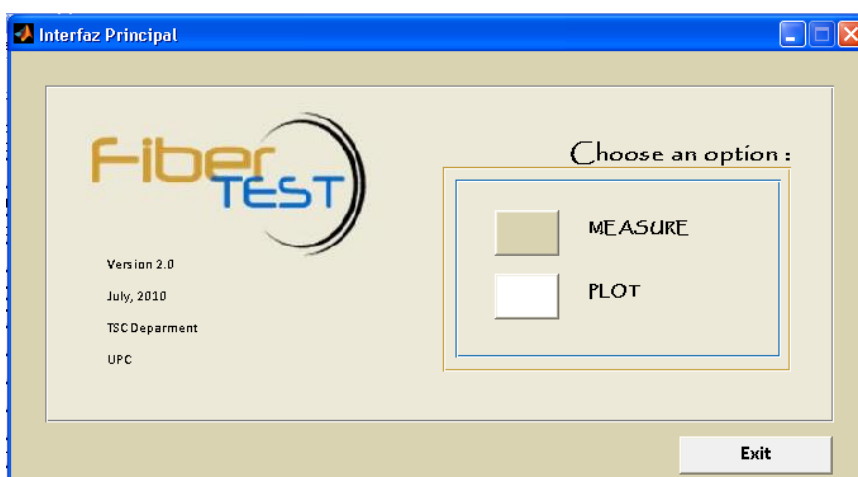


Fig. 3.1. Pantalla inicial del Fiber Test

Cada uno de estos menús, *Measure* y *Plot*, se estructura en forma de árbol. Cuando accedemos a alguno de ellos tenemos la posibilidad de elegir, en una segunda pantalla, el método de medida que queremos realizar o aquel del cual queremos consultar algún dato ya ejecutado anteriormente. Una vez allí, la estructura de menú cambia según la elección que haya tomado el usuario. En el siguiente apartado se detalla todo el procedimiento según la opción elegida.

3.2 MENÚ Measure

Si el usuario quiere realizar medidas y caracterizaciones, la relación de menús se estructura según el siguiente esquema.

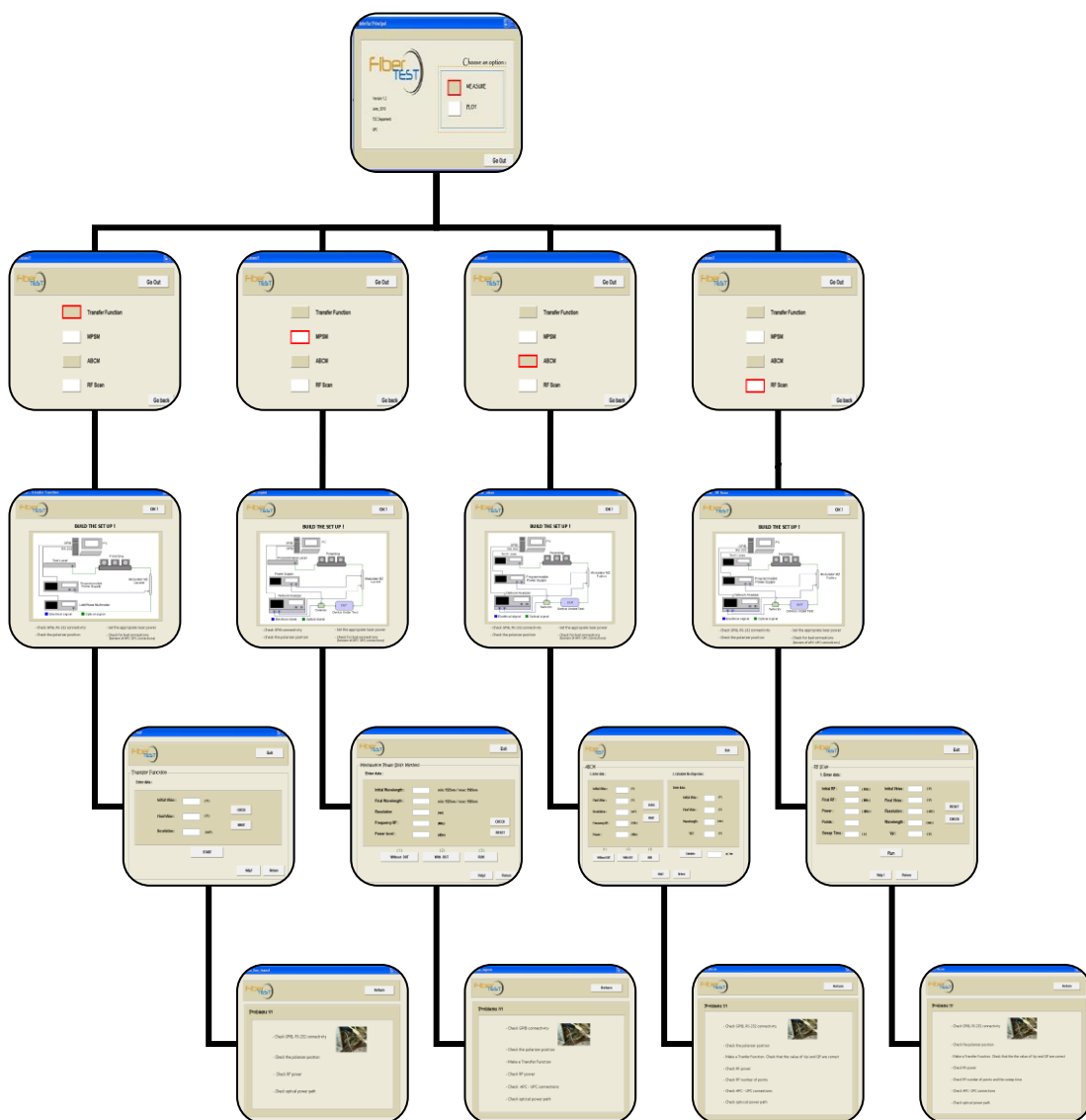


Fig. 3.2. Esquema del menú *Measure*

Al elegir el menú *Measure* llegamos a una primera pantalla donde debe elegirse el tipo de medida que se desea realizar: la Función de Transferencia,

el MPSM, el ABCM y el RF Scan. La pantalla correspondiente se muestra en la figura 3.3.

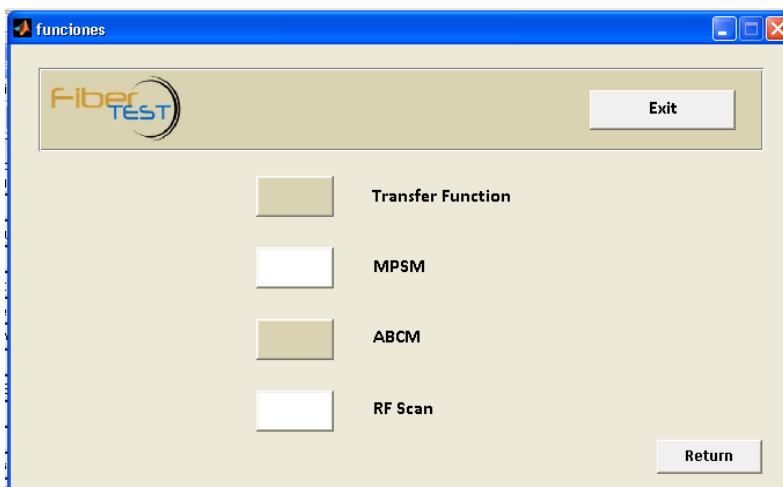


Fig. 3.3. Elección del proceso de medida

Una vez elegido el proceso de medida, aparece la pantalla de montaje correspondiente a cada método para que el usuario pueda llevar a cabo el montaje adecuado. Cuando todas las conexiones son correctas, mediante el botón *OK* se corrobora que el usuario está listo para empezar la medida. A partir de aquí, el siguiente paso es rellenar el formulario de introducción de datos que aparece en pantalla y que nos permite iniciar el proceso de medida automáticamente. Después de un tiempo de espera, que variará según el proceso de medida utilizado, aparecen finalmente las graficas correspondientes en cada caso. Además, al mismo tiempo, en la última pantalla comentada podemos consultar de nuevo la pantalla de comprobación de montaje y el menú de ayuda.

En el caso de la ayuda se dan algunas pautas básicas para realizar el proceso de medida correctamente. Por lo que respecta al menú de comprobación de montaje también se incluye en esta última pantalla por si el usuario quiere revisar alguna conexión antes de realizar la medida.

A continuación, se detalla cada una de las partes según el método elegido.

3.2.3.1 Función de transferencia

En este caso se quiere realizar una gráfica que nos muestre la relación entre la potencia de salida del modulador y la tensión que se introduce en los electrodos.

Montaje

El láser funcionará en modo longitud de onda fija, deberemos pues seleccionar manualmente la longitud de onda de interés o utilizar el láser fijo. Destacar que en general, la función de transferencia de los moduladores es prácticamente

invariante en función de la longitud de onda utilizada. El nivel de potencia óptico en el láser será también seleccionado de forma manual.

En general se ha visto más práctico dejar al control del usuario todo lo relativo a la integridad de la señal óptica. Se ha comprobado que los montajes son muy vulnerables a pequeños cambios: suciedad, pequeñas torsiones de los cables, conexiones defectuosas, etc. Son problemas bastante frecuentes que pueden provocar severas pérdidas de señal óptica. Tal y como se avisa en la ayuda es importante comprobar, mediante medidas de potencia, en todo el camino que recorre la señal que el nivel de potencia óptica conseguido está dentro de los límites razonables.

El montaje necesario para la implementación del método se muestra en la figura 3.4.

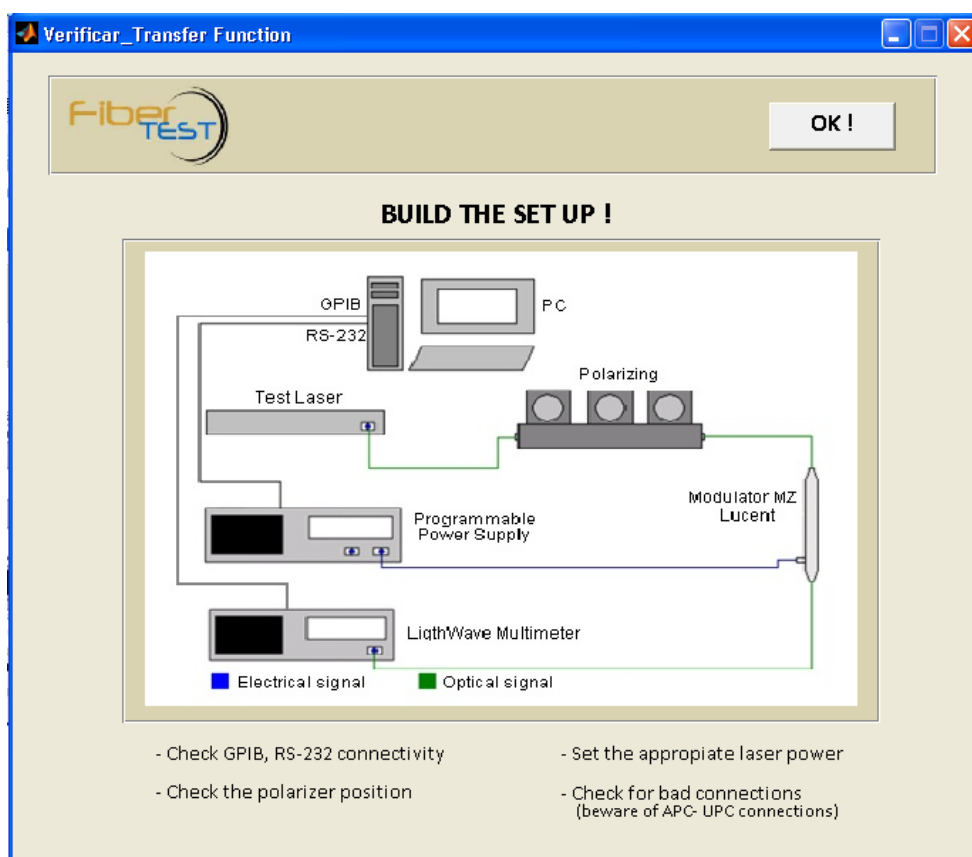


Fig. 3.4. Pantalla de montaje de la Función de transferencia

Desde el láser y previo al modulador, tal y como se ha comentado en el apartado 1.5, se requerirá un control de polarización para adaptar la polarización de la onda en la fibra estándar a la de la fibra preservadora a la entrada del MZ. El proceso de ajuste de este polarizador se encuentra explicado en el apartado 2.1.5.

La salida del modulador debe conectarse al medidor de potencia óptica y la entrada de *bias* de interés debe conectarse a la fuente de alimentación programable. Fiber Test controla la tensión de alimentación en la fuente y se

ocupa de recoger las medidas del medidor de potencia. Ambos dispositivos deberán estar correctamente conectados al ordenador de control mediante las interfaces correspondientes, GPIB para el medidor y RS-232 para la fuente de alimentación.

Introducción de datos

Una vez realizado el montaje correcto, se deben introducir los parámetros necesarios para que el programa pueda realizar todo el proceso comentado:

- Vbias inicial (V): valor en el cual empieza el barrido de *bias*.
- Vbias final (V): valor en el cual termina el barrido de *bias*.
- Resolución (mV): valor de los saltos efectuados por el *bias* al realizar el barrido.

Como se puede ver en la figura 3.5, la pantalla correspondiente a la función de transferencia da al usuario la posibilidad de introducir, directamente, todos los parámetros comentados anteriormente. Después de ser introducidos, el usuario clicca el botón *Start* y mediante el puerto RS-232 los datos son enviados a la fuente programable que nos permite iniciar la medida.

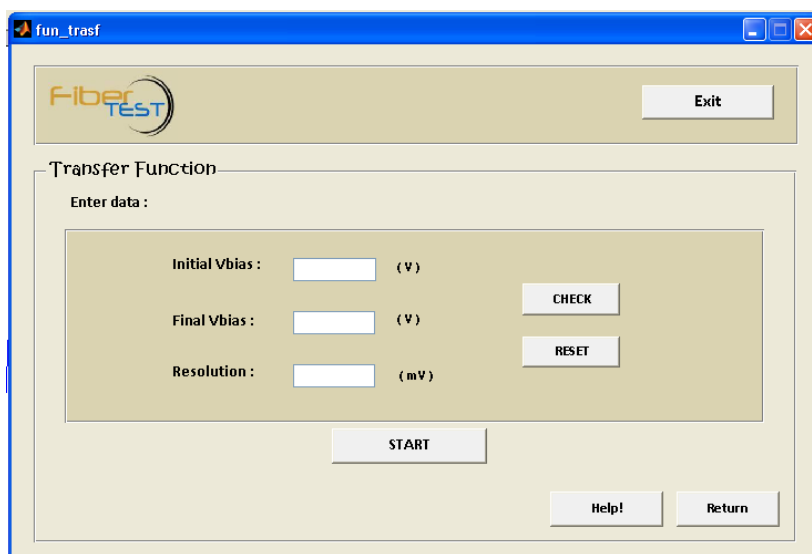


Fig. 3.5. Pantalla de la Función de Transferencia

Además, como se ve en la parte derecha de la figura, desde esta pantalla podemos acceder, si fuera necesario, al menú de ayuda (*help*) o volver a la pantalla anterior de comprobación del montaje (*check*), comentada más arriba (ver figura 3.6 y 3.4 respectivamente).

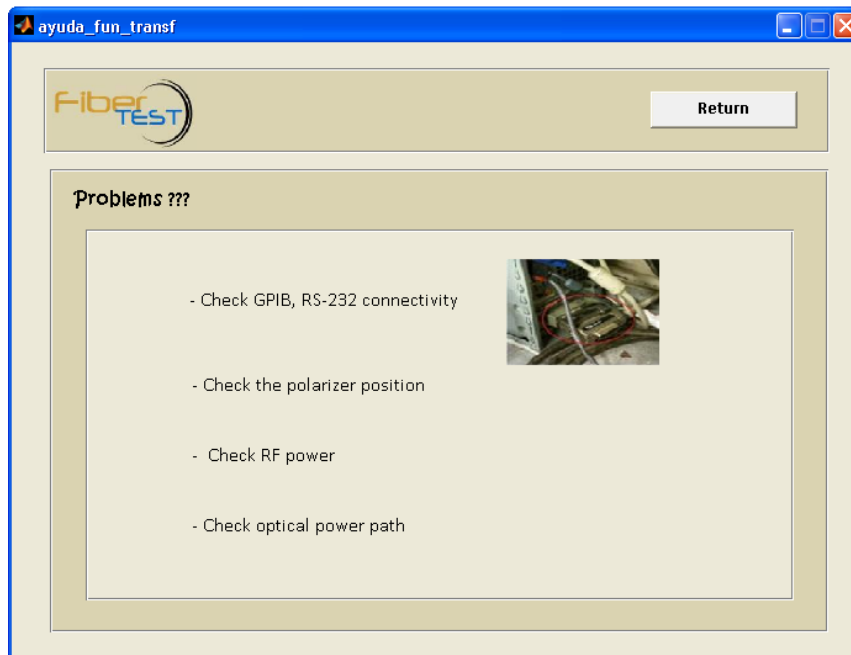


Fig. 3.6. Pantalla de ayuda de la Función de transferencia

Finalmente, después de un tiempo de espera de aproximadamente 10 min, se obtiene la gráfica de la Función de Transferencia. Según la resolución introducida el proceso de medida puede variar su tiempo de ejecución. En este caso, por ejemplo, se han considerado 100 mV de resolución y la medida ha tardado en efectuarse 10 min. La gráfica muestra el ejemplo de la Función de Transferencia obtenida con el modulador Lucent.

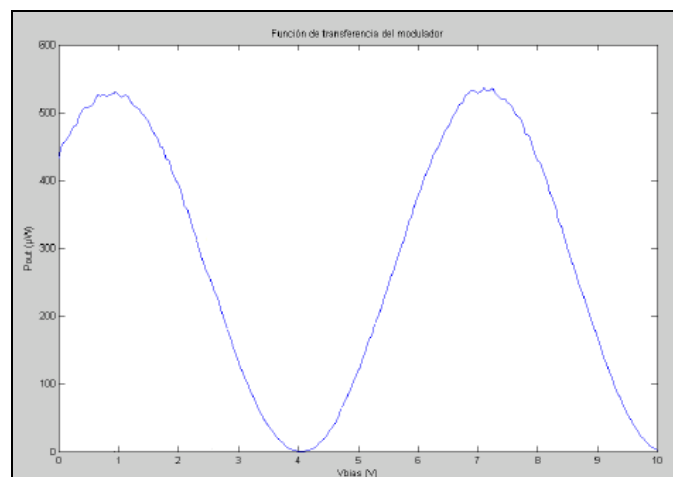


Fig. 3.7. Gráfica de la Función de Transferencia del modulador Lucent

3.2.3.2 MPSM

El MPSM es el único de los métodos de medida de dispersión que estaba implementado en la primera versión de la interfaz gráfica Fiber Test.

Montaje

Este método requiere como señal de test una señal óptica modulada en radiofrecuencia. Esta modulación se obtiene generalmente utilizando un láser, que proporciona la longitud de onda portadora, modulada por una señal de RF en un MZ polarizado en el QP. Tal y como se ve en el desarrollo matemático del apartado 4.3, para valores moderadamente bajos de la frecuencia moduladora el retardo de la envolvente de la señal óptica a la salida del dispositivo dispersivo respecto de la envolvente de la señal de test a la entrada, es aproximadamente igual al retardo de grupo a la longitud de onda portadora (la proporcionada por el láser). Por esta razón, utilizamos un analizador de redes en el montaje (figura 3.8), tanto para proporcionar la señal de referencia que se introduce en el MZ como señal moduladora, como para medir el retardo de esta envolvente que se aplica a la señal óptica a la salida del DUT.

El proceso anterior permite obtener el retardo de grupo a la longitud de onda proporcionada por el láser. Para obtener el valor de la dispersión necesitamos repetir el proceso anterior para otra longitud de onda. Aproximaremos entonces el factor de dispersión como la derivada del retardo de grupo mediante incrementos:

$$D \approx \frac{\Delta \tau_g}{\Delta \lambda} = \frac{\tau_{g2} - \tau_{g1}}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3.1)$$

Así pues, desde un punto de vista práctico, necesitamos que Fiber Test controle la longitud de onda del láser para efectuar un barrido, y además vaya obteniendo el valor de la fase del parámetro S_{21} extraído del analizador de redes. Estos dos dispositivos, tal y como muestra el esquema, deberán estar correctamente conectados al ordenador de control.

Como en todos los métodos implementados, se deja al control manual del usuario todos los aspectos de nivel de señal óptica y por tanto el nivel de señal en el láser se ajusta manualmente.

Al objeto de eliminar de la medida los efectos debidos al MZ y otros elementos en el montaje, debe realizarse una calibración previa del sistema que nos permita obtener la característica del sistema en ausencia del DUT. Esta referencia se restará posteriormente de la medida insertando el DUT.

De cara a la realización de la medida el primer paso es realizar el montaje experimental correspondiente. En el caso del MPSM se muestra en la figura 3.8.

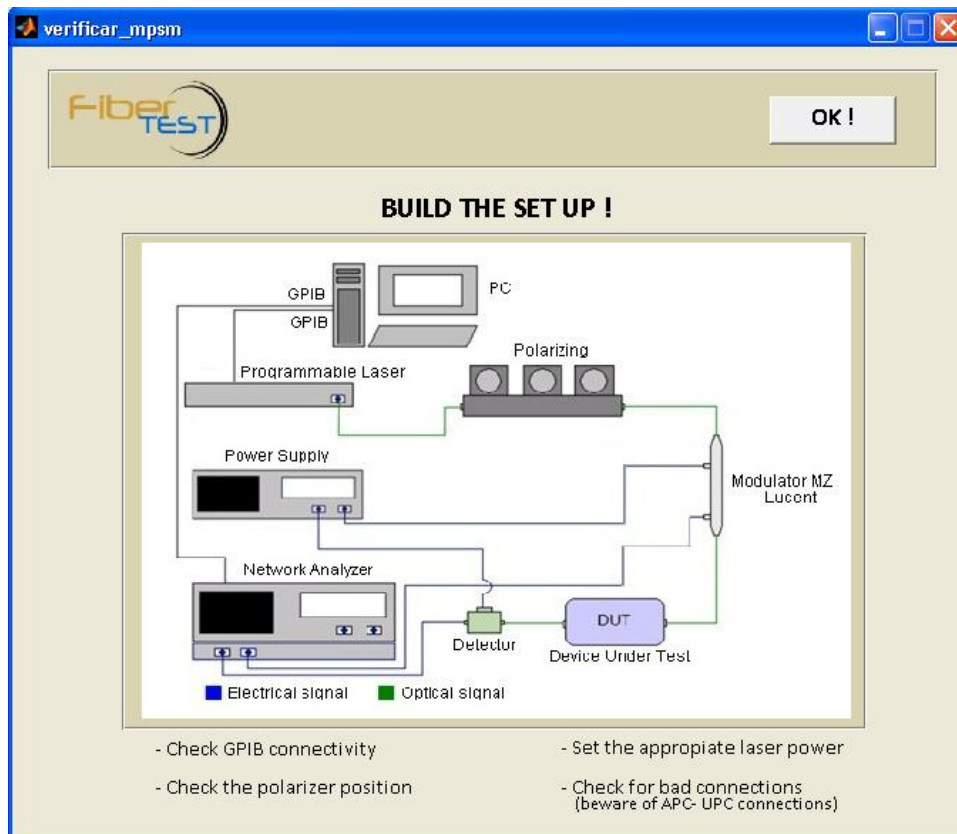


Fig. 3.8. Pantalla de montaje del MPSM

Introducción de datos

Una vez completado el montaje experimental, el segundo paso es introducir los parámetros en la interfaz gráfica. En este caso son los siguientes:

- Longitud de onda inicial (nm): longitud de onda en la cual se inicia el barrido.
- Longitud de onda final (nm): longitud de onda en la cual termina el barrido.
- Frecuencia analizador de redes (GHz): frecuencia moduladora que se introduce al modulador.
- Potencia analizador de redes (dBm): potencia de la señal generada por el analizador de redes.
- Resolución (nm): valor de los saltos efectuados por el láser sintonizable al realizar el barrido.

En la pantalla mostrada en la figura 3.9 el usuario puede introducir, directamente, todos los parámetros comentados. En este caso, se conectan el láser sintonizable y el analizador de redes al PC y mediante un puerto GPIB se nos permite enviar todos los datos remotamente.

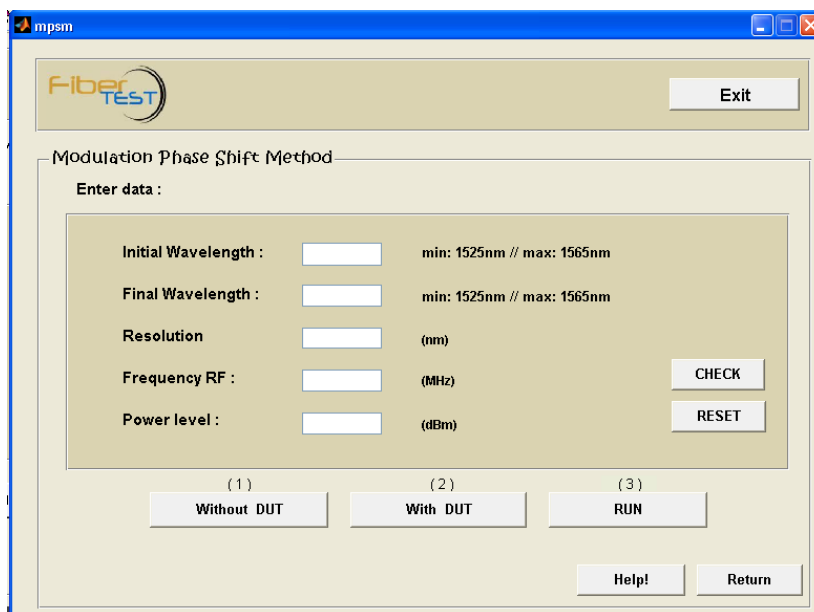


Fig. 3.9. Pantalla del MPSM

Como se muestra en la figura se llevan a cabo tres pasos: (1) *Without DUT*, (2) *With DUT* y (3) *RUN*. Primero se realiza la medida sin considerar el DUT, luego se realiza otra medida con el elemento dispersivo añadido y finalmente considerando los datos obtenidos anteriormente se realiza el cálculo de la fase calibrada, el retardo de grupo y la dispersión.

A continuación, se muestra un ejemplo de las gráficas resultantes para una DCF.

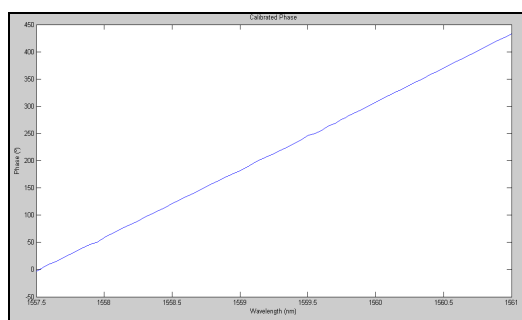


Fig. 3.10. Fase calibrada

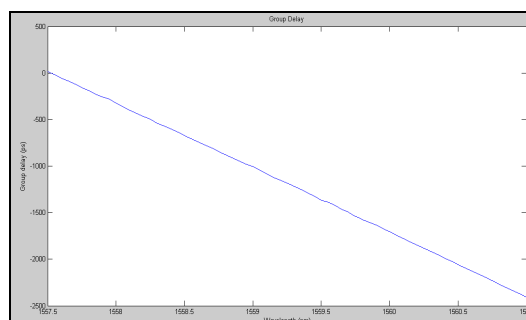


Fig. 3.11. Retardo de grupo

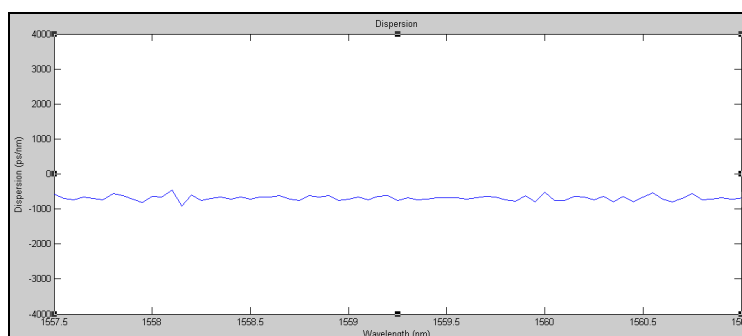


Fig. 3.12. Dispersión

Del mismo modo que en el caso anterior, también se puede acceder a la pantalla de ayuda mediante el botón *help* (ver figura 3.13).

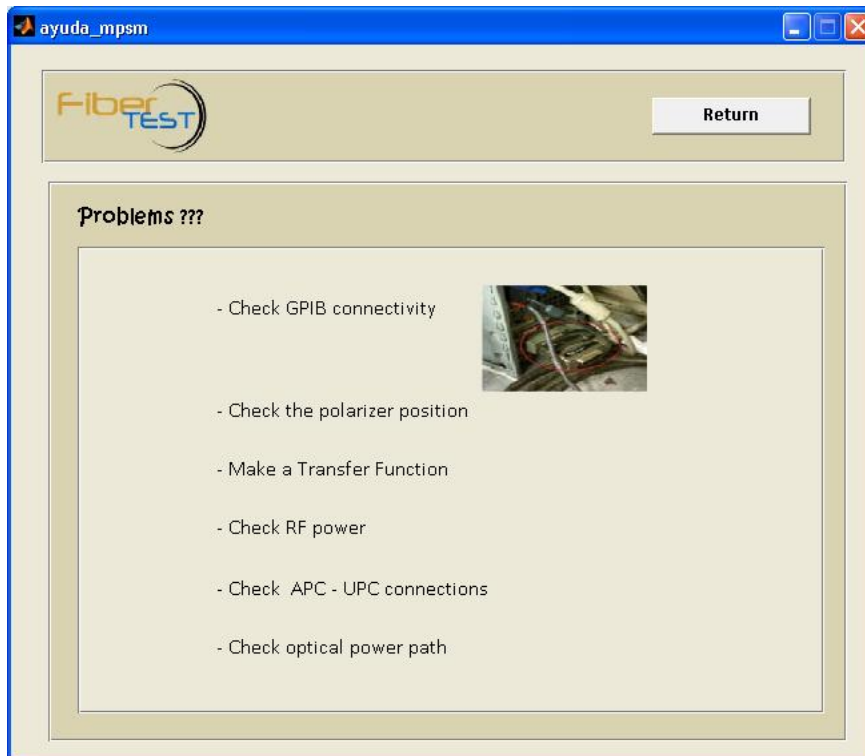


Fig. 3.13. Pantalla de ayuda del MPSM

3.2.3.3 ABCM

El ABCM es uno de los métodos de medida de dispersión de nueva incorporación y por lo tanto se ha tenido que implementar al completo todo su desarrollo.

Montaje

El esquema utilizado para llevar a cabo este método, básicamente es el mismo que para el MPSM, con la diferencia de que ahora la portadora óptica generada por el láser es modulada utilizando un modulador MZ *dual-drive* en configuración *asimétrica*.

El montaje considerando este modo de funcionamiento del MZ se muestra en la figura 3.14.

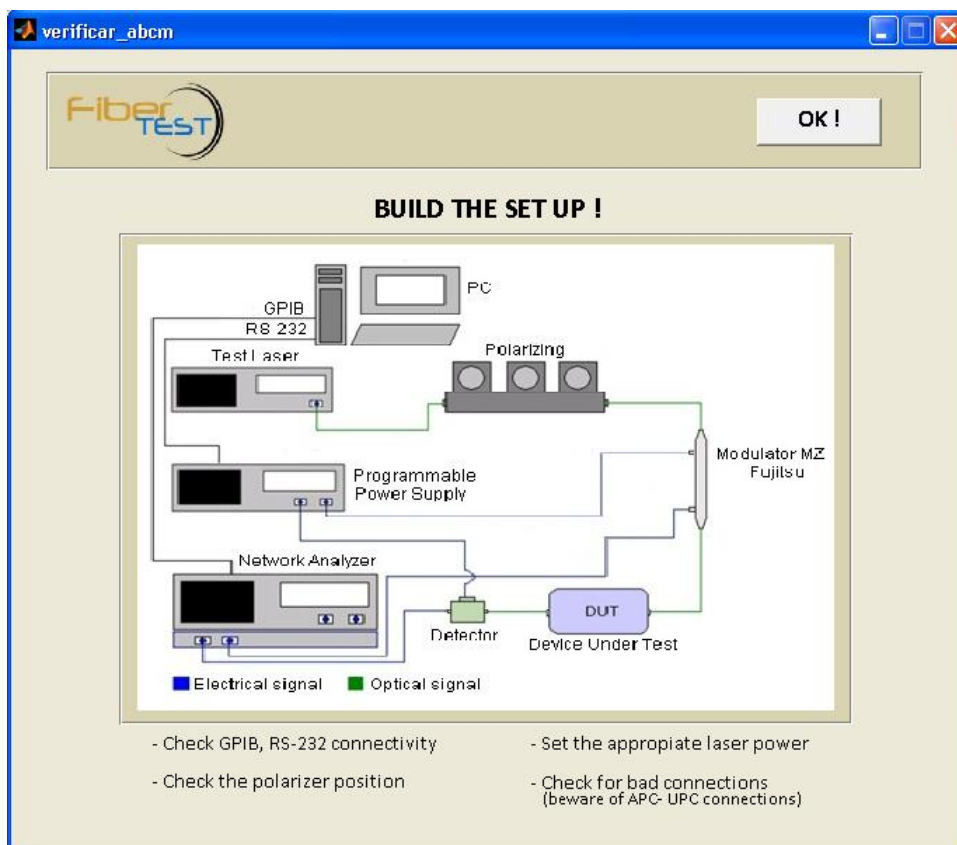


Fig. 3.14. Pantalla de montaje del ABCM

Como se verá en el análisis matemático del apartado 5.2 esta configuración en el modulador provoca que las bandas laterales ópticas sean afectadas por un desfase que depende del voltaje de *bias* y que permite controlar la interferencia mutua entre las bandas superior e inferior cuando son afectadas por retardos debidos al DUT.

Para evitar posibles medidas erróneas debidas a las atenuaciones de los dispositivos implicados en el montaje, la idea es encontrar el voltaje de *bias* que hace que la interferencia entre banda superior e inferior sea destructiva. De esta manera encontramos aquellos puntos donde la señal detectada se anula, es decir, donde se producen ceros de amplitud. Una vez encontrados estos ceros, será el desplazamiento entre ellos el que nos permita obtener la dispersión.

En consecuencia, desde un punto de vista práctico, necesitamos que Fiber Test controle, mediante la fuente programable FA-851, el barrido de tensión de *bias* que nos permite encontrar el valor concreto de *bias* que hace que la señal detectada, es decir el módulo del parámetro S_{21} medido en el analizador de redes, se anule. Las conexiones de estos dos dispositivos deben cumplir el esquema mostrado en la figura 3.14. Del mismo modo que en el método anterior, se deja al control manual del usuario todos los aspectos de nivel de señal óptica.

Por otro lado, con el fin de obtener el valor correcto del desplazamiento de los ceros se debe realizar un proceso de calibración. Se efectuará una medida previa sin DUT que nos servirá como referencia respecto a la medida que añada el elemento dispersivo. Además, en su caso es necesario realizar una función de transferencia antes de realizar la medida. Los valores entre los cuales se realice el barrido tienen que ser los adecuados para posteriormente poder calcular la dispersión. Este concepto se desarrollará más detalladamente en el capítulo 5.

Introducción de datos

Una vez realizado el montaje y establecidos los parámetros, el usuario debe introducirlos en el programa para iniciar la medida:

- Vbias inicial (V): valor en el cual se empieza el barrido de *bias*.
- Vbias final (V): valor en el cual termina el barrido de *bias*.
- Frecuencia analizador de redes (GHz): frecuencia moduladora que se introduce al modulador.
- Potencia analizador de redes (dBm): potencia de la señal generada por el analizador de redes.
- Resolución (mV): valor de los saltos efectuados por el *bias* al realizar el barrido.

En la figura 3.15 podemos observar que la pantalla se divide en dos partes. En la primera (1. Enter data) se encuentra el espacio dedicado a los parámetros comentados anteriormente, aquellos que luego son enviados remotamente hasta los dispositivos, en este caso hacia el analizador de redes y la fuente de alimentación.

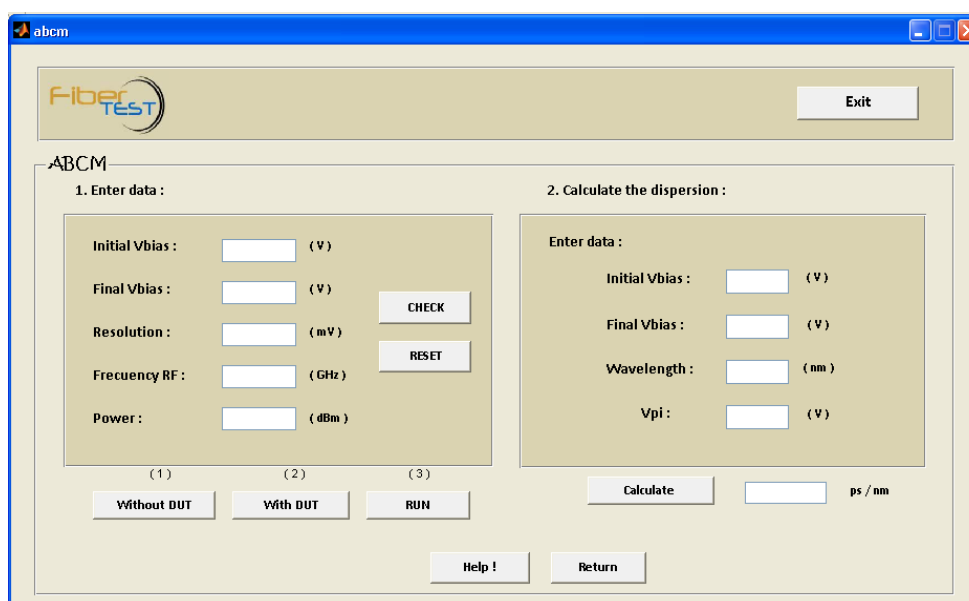


Fig. 3.15. Pantalla del ABCM

Seguidamente del mismo modo que el MPSM, se efectúan tres medidas: (1) *Without DUT*, (2) *With DUT* y (3) *RUN*. Una inicial sin considerar el DUT, otra posterior incluyendo el elemento dispersivo y finalmente una última que permite dibujar ambas gráficas a la vez (ver gráfica 3.16). Debe considerarse que su tiempo de ejecución es de 3h, 1h 30 min para la medida sin DUT y 1h 30 min para la medida con DUT.

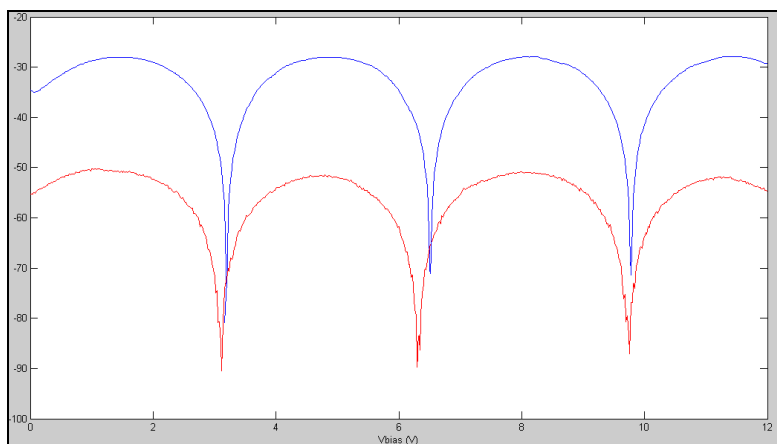


Fig. 3.16. Gráfica ceros móviles y ceros fijos

En la figura 3.16 podemos observar los puntos en los cuales la señal detectada se ha visto anulada (ceros). En el capítulo 5 se encuentra detallada la base matemática correspondiente a este proceso.

Una vez el usuario ha visualizado la gráfica, debe dirigirse al segundo paso (2. *Calculate the dispersion*) donde encontrará el espacio dedicado al cálculo de la dispersión. A partir del desplazamiento de los ceros móviles podemos definir un rango de tensión de *bias* en el cual el programa pueda determinar el valor de la dispersión.

Para escogerlo correctamente tenemos que fijarnos en el rango de valores de *bias* en el cual únicamente estemos presenciando un cero móvil.

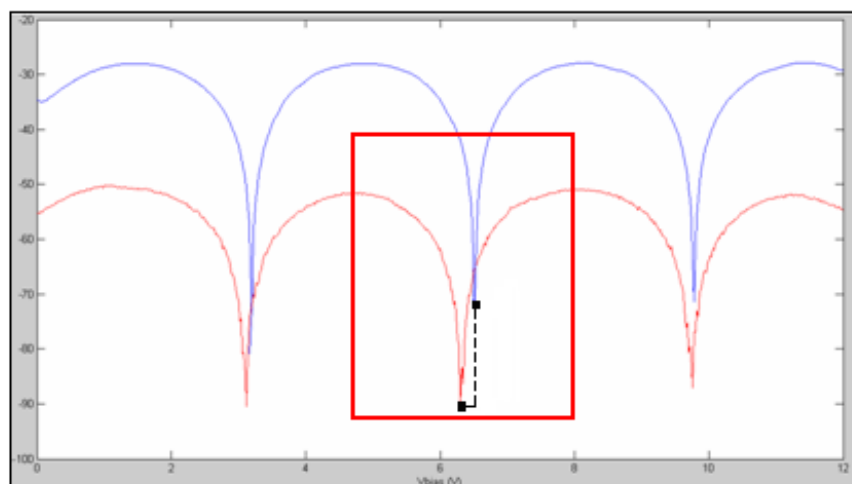


Fig. 3.17. Rango de Vbias para calcular la dispersión

Una vez decidido, el usuario puede ya introducir estos valores junto con la longitud de onda y V_{π} , parámetros también necesarios para el cálculo de la dispersión.

Además, siguiendo el mismo esquema que en los casos anteriores, también podemos encontrar la pantalla correspondiente al menú de ayuda (ver figura 3.18).

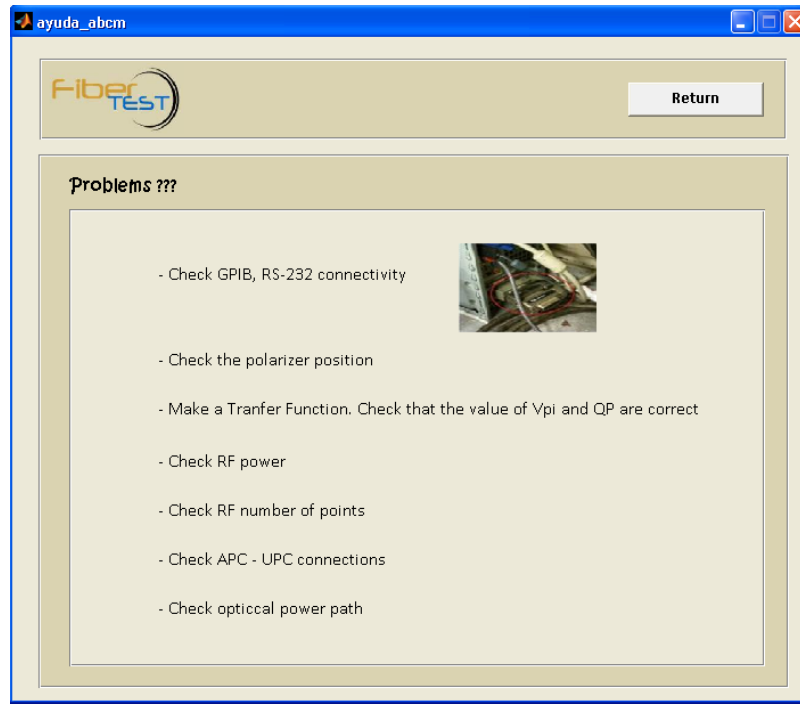


Fig. 3.18. Pantalla de ayuda del ABCM

3.2.3.4 RF Scan

En el caso del RF Scan, se combinan las mejores prestaciones del MPSM y el ABCM.

La técnica de RF Scan propone combinar los datos que pueden obtenerse aplicando MPSM ($\Delta\phi$) por un lado, y aplicando ABCM ($\Sigma\phi$) por otro, para conseguir barridos del espectro óptico mediante barridos en la frecuencia moduladora manteniendo una longitud de onda fija y por tanto sin necesidad del láser sintonizable. La base matemática de este método se halla detallada en el apartado 6.2.

Experimentalmente el proceso consiste en realizar un barrido de voltajes de *bias* y para cada valor de *bias* obtener un barrido frecuencial del parámetro S_{21} en el analizador de redes. Deberán determinarse por un lado las frecuencias a las que se producen ceros del módulo de S_{21} para cada valor de *bias*, y por otro las fases de este parámetro que se obtienen a estas mismas frecuencias para valores de *bias* en que el parámetro S_{21} tenga un nivel de amplitud aceptable. Combinando adecuadamente estos dos datos tal y como se explica en el apartado 6.2 puede determinarse el valor de la dispersión a las frecuencias en que se sitúen las bandas ópticas laterales producidas por el barrido en radiofrecuencia de la señal moduladora.

Por supuesto, estos barridos estarán limitados por el ancho de banda de RF disponible. Tengamos en cuenta que en tercera ventana, cada GHz barrido en radiofrecuencia corresponderá aproximadamente a 8 pm en longitud de onda. En el caso del RF Scan como a partir de un barrido en RF se cubre un intervalo frecuencial óptico a ambos lados de la portadora podemos decir que por cada GHz barrido en radiofrecuencia se barren 16 pm a frecuencias ópticas.

Para cubrir intervalos frecuenciales mayores lo mejor es combinar un barrido en RF usando RF Scan para la resolución fina y un láser sintonizable con saltos frecuenciales grandes para llegar a cubrir márgenes frecuenciales más amplios.

Montaje

El montaje experimental (ver figura 3.19) es el mismo que en el caso del ABCM, la única diferencia radica en los parámetros necesarios para la medida.

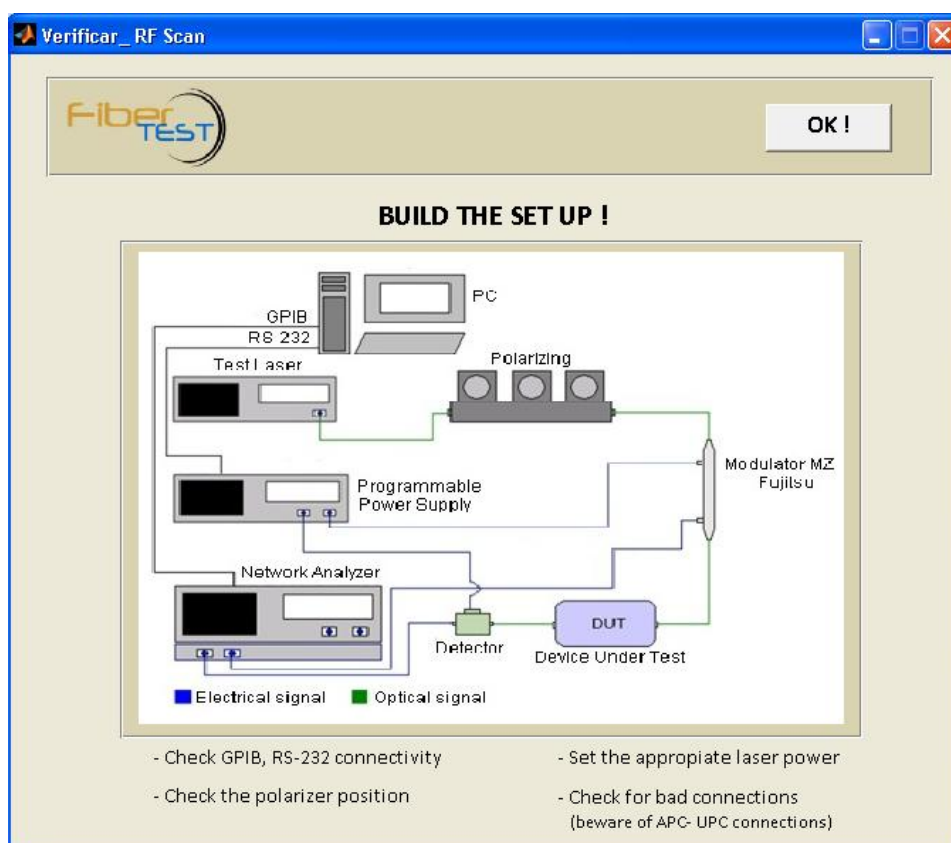


Fig. 3.19. Pantalla de comprobación de montaje del RF Scan

Introducción de datos

Los parámetros necesarios para que se pueda llevar a cabo el proceso son los siguientes:

- Potencia analizador de redes (dBm): potencia de la señal generada por el analizador de redes.

- Frecuencia inicial de barrido (KHz): frecuencia a la cual se inicia el barrido de RF.
- Frecuencia final de barrido (GHz): frecuencia final del barrido de RF.
- Sweep time (s): tiempo que tarda en efectuarse el barrido en RF.
- Puntos (resolución NA): número de puntos que queremos visualizar en la pantalla del NA.
- Vbias inicial (V): valor inicial de la tensión de *bias*.
- Vbias final (V): valor final de la tensión de *bias*.
- Resolución (mV): valor de los saltos efectuados por el *bias*.
- Longitud de onda (nm): λ portadora.
- Vpi (V): valor del punto de trabajo del modulador.

Como se muestra en la figura 3.20, en la pantalla el usuario puede introducir directamente los datos comentados.

Fig.3.20. Pantalla del RF Scan

Los parámetros localizados en la parte izquierda de la pantalla se corresponden con los datos necesarios para realizar el barrido de RF en el analizador de redes. Del mismo modo, en la parte derecha encontramos los datos destinados al cambio de *bias* durante los diferentes barridos de frecuencia.

Una vez establecidos los parámetros, el botón *Run* nos permite iniciar la medida. Cuando el proceso ha terminado se muestra la gráfica de los ceros y de los máximos para las frecuencias a las cuales se anula la señal detectada. Mediante estas dos gráficas es posible determinar el retardo de grupo y por tanto también la dispersión. En este caso, su tiempo de ejecución es de aproximadamente unos 30 minutos para una resolución 100 mV.

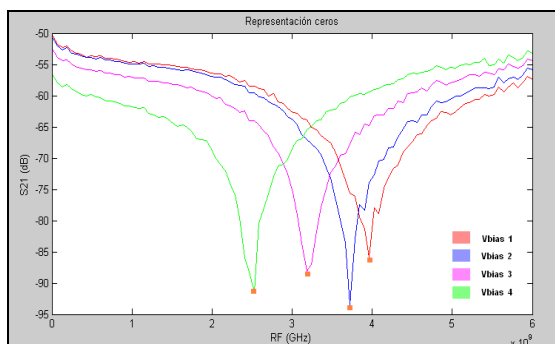


Fig.3.21. Representación de ceros

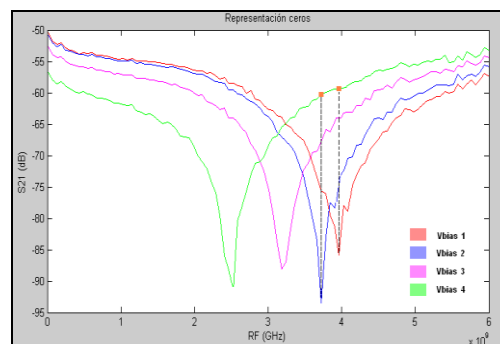


Fig.3.22. Representación de máximos

Además, desde la pantalla 3.20 también podemos acceder, si fuera necesario, al menú de ayuda (*help*) (ver figura 3.23)



Fig. 3.23. Pantalla de ayuda del RF Scan

3.2.4 MENÚ Plot

Si el usuario quiere cargar datos que han sido realizadas anteriormente en el contexto del menú *Measure*, el menú Plot se lo permite a partir de las características comentadas a continuación.

En el primer prototipo la interfaz presentaba únicamente la posibilidad de realizar el cálculo de la dispersión realizando siempre el montaje con todos los dispositivos y no disponía de ningún tipo de función de guardado y recuperación de medidas realizadas. Sin embargo, la práctica en el laboratorio aconseja disponer de un sistema de guardado de medidas y recuperación de gráficas y por eso en este TFC nos hemos planteado una reestructuración de los menús que incluya estas funciones.

Cada vez que se inicia una medida, el programa pide al usuario que introduzca el nombre del archivo en el que se guardarán todos los datos obtenidos. La

idea es aprovechar esto para crear un espacio donde el usuario pueda recuperar la gráfica correspondiente únicamente cargando el archivo de la medida deseada. De esta manera, conseguimos que el usuario pueda recuperar datos realizados anteriormente sin necesidad de realizar todo el montaje de laboratorio de nuevo.

Por otra parte, además de cargar los datos también se ha incluido un resumen de los parámetros utilizados en la medida: frecuencia, potencia, longitud de onda, etc. Así pues, una vez que el usuario carga el archivo de datos guardado ya puede obtener, en la misma pantalla del programa, todos los datos importantes que fueron utilizados para realizar la medida.

La relación de menús, en este caso, se estructura de la siguiente forma:

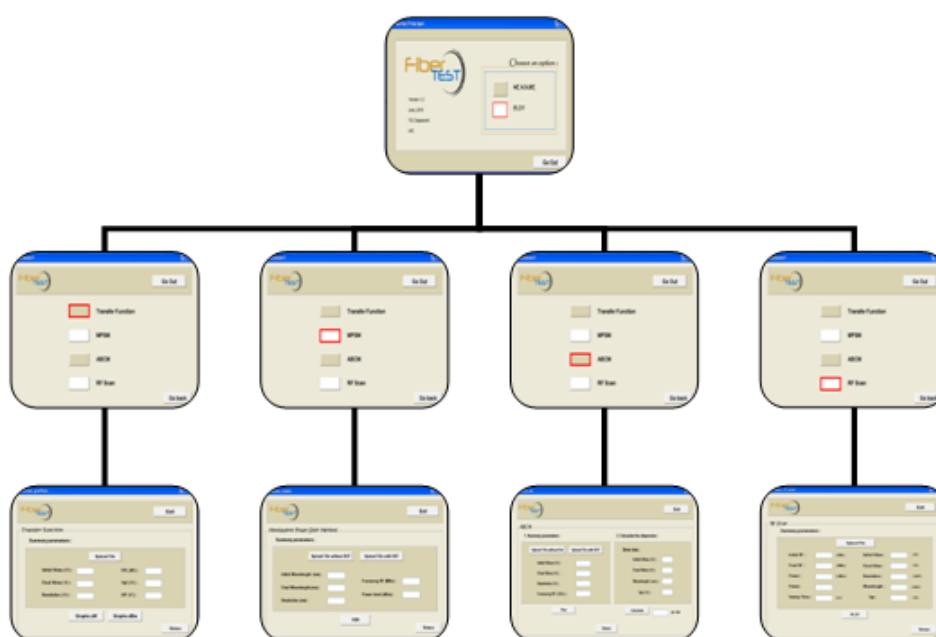


Fig. 3.24. Esquema del menú *Plot*

Del mismo modo que antes, el primer paso para visualizar las gráficas es acceder a la pantalla del método del cual queremos consultar las medidas. Una vez accedemos a la técnica seleccionada se pide cargar el archivo de texto correspondiente a la gráfica que queremos visualizar mediante el botón *Upload File*.

A continuación se explica cada una de las pantallas más detalladamente.

3.2.4.1 Función de transferencia

El primer paso es cargar el archivo utilizando el botón *Upload File* que muestra la figura 3.25. Una vez cargado, el programa muestra directamente los parámetros en su campo correspondiente y el usuario ya puede recuperar la gráfica en uW o dBm según prefiera.

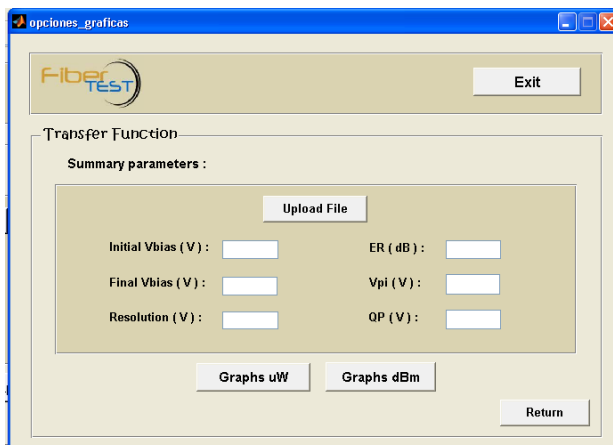


Fig. 3.25. Pantalla de resumen de la F.Transferencia

Es importante destacar también, que los parámetros necesarios para realizar la medida en cada método son distintos y por tanto el fichero de texto que se crea tiene una estructura diferente según la medida que se esté efectuando. En el caso de la Función de Transferencia el formato del fichero es el siguiente.

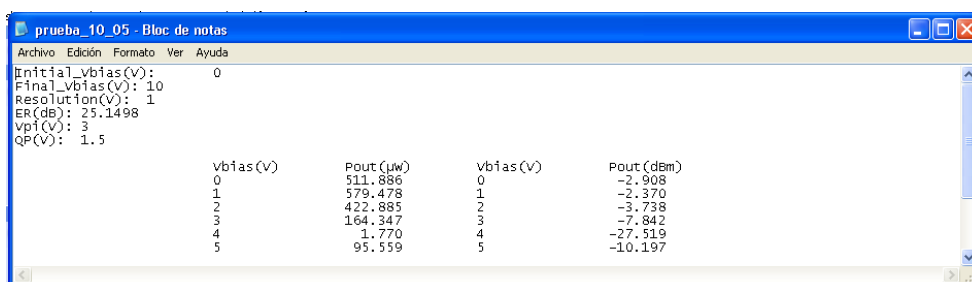


Fig. 3.26. Formato del fichero de la Función de Transferencia

3.2.4.2 MPSM

En este caso, hay que cargar los dos archivos necesarios para el cálculo de la dispersión: la medida efectuada sin DUT (*Upload File without DUT*) y la medida con DUT (*Upload File with DUT*). Del mismo modo que antes, se cargan los datos y mediante el botón *RUN* se ejecuta la representación de la fase calibrada, el retardo de grupo y la dispersión.

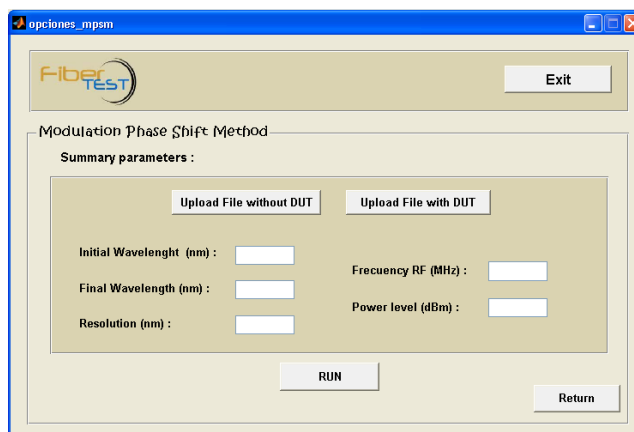
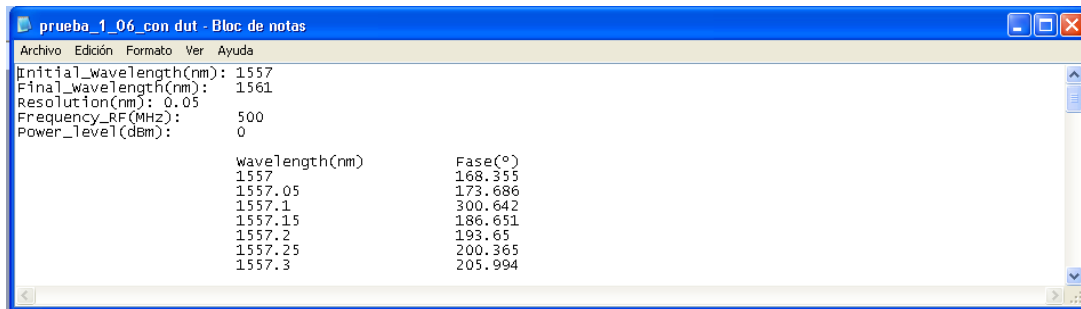


Fig. 3.27. Pantalla de resumen del MPSM

En este caso, siguiendo la explicación realizada en el apartado 3.1.1.2 la estructura del fichero que carga el usuario es la siguiente.



```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Initial_wavelength(nm): 1557
Final_wavelength(nm): 1561
Resolution(nm): 0.05
Frequency_RF(MHz): 500
Power_level(dBm): 0

wavelength(nm)      Fase(°)
1557                 168.355
1557.05              173.686
1557.1               300.642
1557.15              186.651
1557.2               193.65
1557.25              200.365
1557.3               205.994

```

Fig. 3.28. Formato del fichero del MPSM

3.2.4.3 ABCM

Como en su esquema principal, en este caso el ABCM también presenta dos partes diferenciadas en la pantalla. En la primera (*1. Summary parameters*) el usuario tiene disponible dos botones, (*Upload File without DUT*) y (*Upload File with DUT*), donde puede cargar los archivos de la medida que quiere consultar. Una vez cargados, podemos ver todos los parámetros utilizados en sus espacios correspondientes y apretando el botón *Plot* obtendríamos la gráfica de ambas funciones.

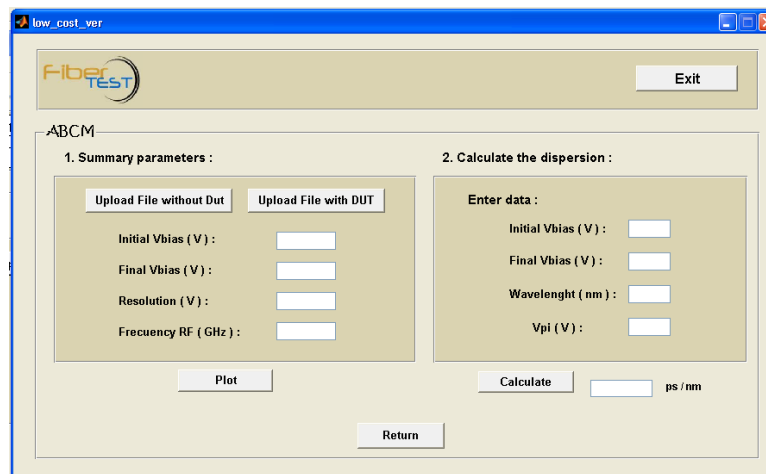
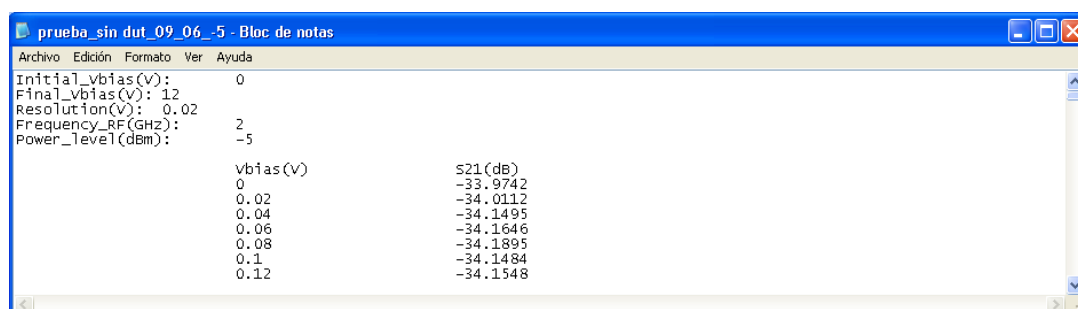


Fig. 3.29. Pantalla de resumen del ABCM

Después de realizar la representación gráfica de las dos funciones el usuario debe decidir cuál es el rango de tensión de *bias* idóneo para calcular la dispersión. Es decir, debe decidir a partir de que cero móvil quiere realizar el cálculo para así introducir en el formulario el valor correspondiente de tensión de bias inicial y final. El siguiente paso es introducir los parámetros de la longitud de onda utilizada y el valor de *Vpi*, datos también necesarios para el cálculo de la dispersión. Finalmente, mediante el botón *Calculate* podemos obtener el valor concreto de la dispersión en ps/nm.

Del mismo modo que antes, a continuación se muestra el formato del fichero de texto correspondiente al ABCM. En él podemos observar el valor de la amplitud obtenido para cada valor de la tensión de *bias*.



```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Initial_vbias(V): 0
Final_vbias(V): 12
Resolution(V): 0.02
Frequency_RF(GHz): 2
Power_level(dBm): -5

vbias(V)          S21(dB)
0                 -33.9742
0.02              -34.0112
0.04              -34.1495
0.06              -34.1646
0.08              -34.1895
0.1               -34.1484
0.12              -34.1548

```

Fig. 3.30. Formato del fichero del ABCM

3.2.4.4 RF SCAN

Como vemos en la figura 3.31 la distribución es similar a la pantalla de introducción de datos (ver figura 3.20). Una vez cargado el archivo mediante el botón *Upload File*, se nos muestran los datos utilizados para el barrido de RF (parte izquierda) y los saltos de *bias* (parte derecha).

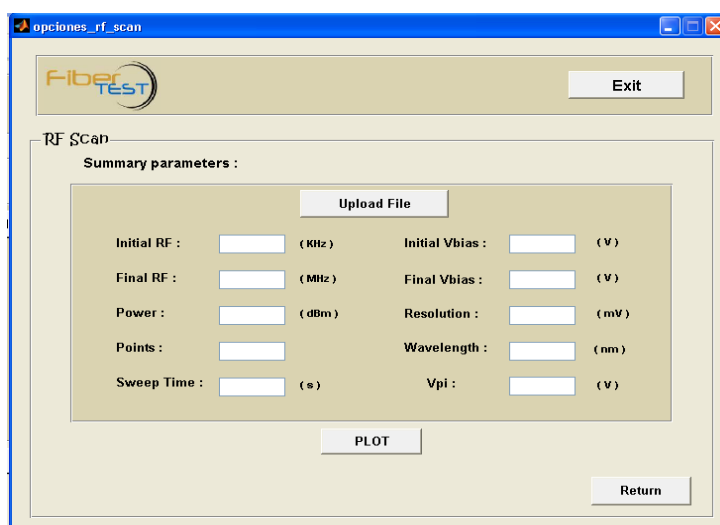


Fig. 3.31. Pantalla de resumen del RF Scan

Por lo que se refiere al formato del fichero, en este caso contiene más parámetros que en los métodos anteriores. Como se muestra en la figura 3.32 existen cuatro columnas de datos. En la primera de ellas encontramos el valor correspondiente a la tensión de *bias* a la cual se efectúa cada barrido de RF. En la segunda columna encontramos las frecuencias a las que se produce un cero en amplitud para los *bias* comentados. Finalmente, en la tercera y la cuarta tenemos los valores de amplitud máxima y fase correspondientes a las frecuencias a las cuales se anula la señal.

prueba1_22_06 - Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Initial_RF(KHz): 10000
 Final_RF(MHz): 6000
 Power_Level(dBm): 0
 Points: 101
 Sweep_Time(s): 2
 Initial_Vbias(V): 3.8
 Final_Vbias(V): 6.2
 Resolution(V): 0.1
 wavelength(nm): 1559
 vpi(V): 3.7

Vbias(V)	Frequency_zeros(MHz)	S21(dB)	Phase(°)
3.800	5820300000.000	-45.157	-10.592
3.900	5820300000.000	-45.157	-10.592
4.000	5580700000.000	-44.802	-91.539
4.100	5460900000.000	-45.216	-136.092
4.200	5460900000.000	-45.216	-136.092
4.300	5341100000.000	-45.211	-175.426

Fig. 3.32. Formato del fichero del RF SCAN

3.3 Mejoras del Fiber Test

En esta versión de la interfaz gráfica Fiber Test se ha llevado a cabo la optimización y automatización de los procesos de medida: Función de Transferencia, MPSM y ABCM. Se ha diseñado una nueva estructura de menús que divide las posibilidades de interacción con el programa en dos apartados fundamentales: realización de medidas (*Measure*) y presentación de resultados (*Plot*).

En el caso del ABCM se ha realizado su diseño gráfico y toda su implementación al completo ya que en el primer prototipo de la interfaz no estaba incluido. Además, se ha introducido el desarrollo de un nuevo método de medida, el RF Scan. En su caso, se ha realizado una primera aproximación del proceso de medida y se ha iniciado su automatización. Queda abierta la posibilidad de añadir otras mejoras que nos permitan optimizarlo para conseguir mejores resultados.

CAPÍTULO 4. MÉTODOS BÁSICOS DE MEDIDA DE DISPERSIÓN

En este capítulo explicaremos dos de los métodos básicos de medida de la dispersión cromática: *el Modulation Phase Shift Method (MPSM)* y el método de *Peucheret*, ambos basados en la modulación de RF de la portadora óptica utilizando un modulador MZ en configuración *push-pull* polarizado en cuadratura. Resulta importante realizar su análisis para comprender cuáles son sus limitaciones y justificar porque es interesante la implementación de nuevos métodos de medida que las solventen.

Cabe destacar, que en el caso del MPSM este TFC considera tanto su desarrollo teórico como su desarrollo experimental en Fiber Test. Por el contrario, el método de Peucheret se estudiará tan sólo de forma teórica, puesto que en general requiere de frecuencias de modulación muy altas para poder determinar los valores de dispersión que usualmente son de interés. Fiber Test incluye el método ABCM que tal y como se ve en los desarrollos realizados en el capítulo 5 está basado en el método de Peucheret y nos permite superar las limitaciones de éste usando para el MZ una configuración *asimétrica*.

En primer lugar partiendo de la descripción básica realizada en el apartado 1.3, se analizará en detalle el desarrollo matemático del modulador Mach Zehnder en modo *genérico*. Es el principal dispositivo del montaje y gracias a sus diferentes modalidades podemos implementar cada uno de los métodos de medida. Conocer su comportamiento genérico nos permitirá entender más fácilmente su implementación aplicada a las particularidades de cada método.

Seguidamente, a partir de la expresión genérica que obtengamos en el estudio del MZ, realizaremos la particularización para el modo de trabajo *push-pull*. Este desarrollo nos permitirá fundamentar la base matemática de los métodos MPSM y Peucheret.

4.1 Desarrollo matemático del modulador en modo *genérico*

De forma genérica podemos considerar en cada una de las ramas del modulador MZ una tensión de radiofrecuencia y una tensión de *bias* diferente. Estaríamos refiriéndonos a un modulador *dual-drive* como el modulador Fujitsu:

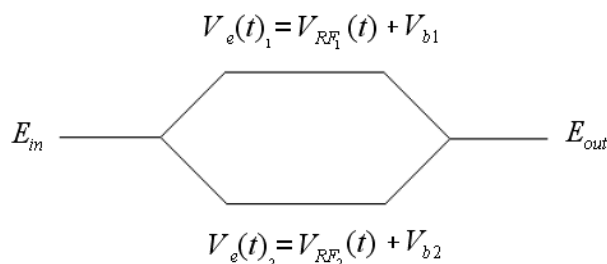


Fig. 4.1. Estructura Mach Zehnder

Considerando:

$$\begin{aligned}
 \text{Rama 1:} \quad m_1 &= \frac{\pi}{2V_{\pi 1}} V_{RF1} & \theta_1 &= \frac{\pi}{2V_{\pi 1}} V_{b1} \\
 \text{Rama 2:} \quad m_2 &= \frac{\pi}{2V_{\pi 2}} V_{RF2} & \theta_2 &= \frac{\pi}{2V_{\pi 2}} V_{b2}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

donde m es el índice de modulación y V_{π} es el voltaje de media onda, podemos determinar la envolvente del campo eléctrico a la salida del modulador como:

$$\begin{aligned}
 E_{out} &= e^{j(\theta_1 + m_1 \cdot \cos(\omega_{m_1} t + \theta_{m_1}))} + e^{j(\theta_2 + m_2 \cdot \cos(\omega_{m_2} t + \theta_{m_2}))} = \\
 &= e^{j\theta_1} \cdot e^{j(m_1 \cdot \cos(\omega_{m_1} t + \theta_{m_1}))} + e^{j\theta_2} \cdot e^{j(m_2 \cdot \cos(\omega_{m_2} t + \theta_{m_2}))}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Finalmente, si ahora utilizamos la relación de Jacobi-Anger $e^{jA \cos(\omega t)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(A) \cdot e^{jn\omega t}$ obtenemos la expresión compleja de la onda óptica a la salida del modulador de la siguiente forma: **(Ref [4])**

$$E_{out} = e^{j\theta_1} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n \cdot J_n(m_1) \cdot e^{jn(\omega_{m_1} t + \theta_{m_1})} + e^{j\theta_2} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n \cdot J_n(m_2) \cdot e^{jn(\omega_{m_2} t + \theta_{m_2})}$$

(4.3)

Todos los métodos de medida se basan en un modulador Mach Zehnder por lo tanto la expresión genérica correspondiente a su salida (4.3), nos será útil a lo largo de todo el proyecto. Únicamente habrá que aplicar las particularidades del modo de trabajo utilizado en el modulador para concretar la expresión final en cada caso.

4.2 Análisis matemático de la respuesta a la señal de test

Las características del modulador Mach Zehnder y por consiguiente sus modos de funcionamiento permiten obtener diferentes expresiones matemáticas de la señal detectada a la salida del DUT.

De forma común en todos los métodos de medida desarrollados en este TFC se inyecta al DUT una señal de test que puede expresarse de forma genérica

usando 4.3. Ahora bien, debemos concretar el modo de trabajo del modulador a la hora de caracterizar el sistema final. Si recordamos, existen dos posibles funcionamientos para el MZ, el modo *push-pull* y el modo *asimétrico*. En este apartado se efectuará el desarrollo considerando el funcionamiento *push-pull*, más adelante, en el capítulo 5, se analizará el procedimiento considerando las particularidades del modo *asimétrico*. Es por eso, por tanto, que a continuación realizamos el desarrollo teórico basándonos en la expresión 1.23 comentada en el apartado 1.3.2.

Consideramos como estructura general el esquema de la figura 4.2.

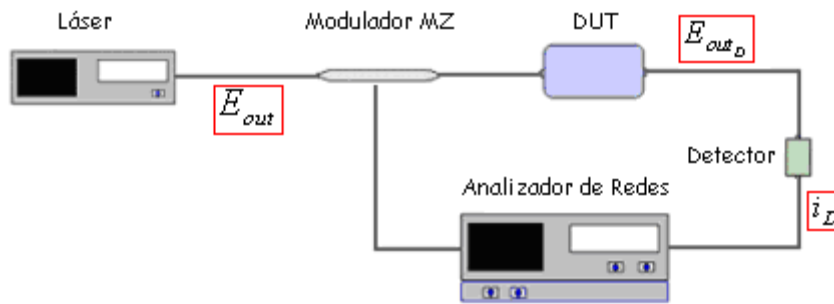


Fig. 4.2. Estructura básica de montaje

En primer lugar, a partir de la expresión 4.3, haciendo uso de la aproximación *small-signal* $V_{RF} \ll V_{bias}$, consideramos irrelevantes las bandas ópticas laterales superiores a partir de orden 2, por tanto el espectro de la señal de test contiene únicamente la portadora y dos bandas laterales, la superior y la inferior.

Considerando esta condición y particularizando para modo *push-pull* la expresión 4.3, obtenemos la siguiente expresión para la señal de test a la salida del modulador/entrada del DUT:

$$E_{out} = J_0(m) + e^{2j\theta_2} \cdot J_0(m) - \left[-j \cdot J_1(m) + j \cdot J_1(m) \cdot e^{2j\theta_2} \right] \cdot e^{-j(\omega_m t + \theta_m)} + \left[j \cdot J_1(m) - j \cdot J_1(m) \cdot e^{2j\theta_2} \right] \cdot e^{j(\omega_m t + \theta_m)} \quad (4.4)$$

Una vez obtenida la salida E_{out} , la señal pasa por el elemento dispersivo, DUT, que añade un desfase a las diferentes componentes frecuenciales de la señal. Teniendo en cuenta este desfase la señal se ve modificada del siguiente modo:

$$E_{out_D} = J_0(m) \left[1 + e^{2j\theta_2} \right] + 2j \cdot J_1(m) \left[1 - e^{2j\theta_2} \right] \cdot e^{\frac{j(\phi_1 + \phi_{-1})}{2}} \cdot \cos(\omega_m t + \theta_m + \frac{\phi_1 - \phi_{-1}}{2}) \quad (4.5)$$

Finalmente, la salida del detector se obtiene haciendo:

$$i_D = \|E_{out}\|^2 = \text{Re}^2 + \text{Im}^2$$

La corriente detectada contiene términos de señal continua a la frecuencia moduladora, y también a armónicos de ésta. Bajo la aproximación *small-signal* los armónicos tendrán poca relevancia. Considerando esto, la componente a la frecuencia moduladora toma la expresión siguiente.

$$i_D = 4m \cdot \cos\left(\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2}\right) \cdot \sin(2\theta_2) \cdot \cos\left(\omega_{mt} + \theta_m + \frac{\phi_1 - \phi_{-1}}{2}\right)$$

(4.6)

donde ϕ_1 y ϕ_{-1} corresponden a las fases introducidas por el DUT en las bandas laterales superior e inferior respectivamente.

Sobre la expresión 4.6 y teniendo en cuenta los resultados de la sección 1.2.2, observamos que disponemos de dos magnitudes que pueden proporcionarnos información sobre la dispersión introducida por el DUT.

Por un lado tenemos el término suma de fases de las dos bandas que para valores moderadamente bajos de la frecuencia moduladora (que permitan aproximar la fase en las bandas a partir de un desarrollo en serie de Taylor de tres términos sobre la frecuencia portadora como en las expresiones (1.14)) se relaciona directamente con el valor de la dispersión a la frecuencia portadora según:

$$\sum \phi = \frac{\lambda_0^2 \cdot D \cdot 2\pi \cdot f_m^2}{c}$$

(4.7)

En esto se basa el método de Peucheret, que por tanto requiere la determinación del módulo del parámetro S_{21} en un montaje como el de la figura 4.2.

Por otro lado, la expresión 4.6 nos muestra que midiendo la fase del S_{21} en el montaje 4.2 obtendremos la semiresta de fases $\left(\frac{\phi_1 - \phi_{-1}}{2}\right)$ entre la banda superior y la inferior que bajo la misma aproximación sobre la frecuencia moduladora comentada, puede aproximarse al retardo de grupo a la frecuencia portadora del siguiente modo:

$$\Delta\phi \approx 2 \cdot \tau_g \cdot \Delta\omega$$

(4.8)

4.3 Modulation Phase Shift Method (MPSM)

Hemos visto en el apartado anterior que la medida del desfase que sufre la envolvente de RF modulada sobre la portadora óptica en su tránsito a través del DUT, puede aproximarse al retardo de grupo que éste introduce a la frecuencia portadora, siempre que la frecuencia moduladora sea lo suficientemente baja como para que la fase óptica en las bandas laterales pueda aproximarse mediante un desarrollo de Taylor de tres términos (expresiones 1.14) centrado en la frecuencia portadora.

Para obtener el valor de la dispersión se requiere efectuar una medida del retardo a dos frecuencias portadoras cercanas de forma que podamos aproximar la derivada que define el coeficiente de dispersión mediante incrementos, como sigue:

$$D = \frac{\partial \tau_g}{\partial \lambda} \approx \frac{\Delta \tau_g}{\Delta \lambda} \quad (4.9)$$

Necesitamos por tanto utilizar un láser sintonizable. Lo usual es efectuar todo un barrido en longitud de onda y determinar el valor de la dispersión en todo un margen de frecuencia. Lo vemos a continuación de forma más detallada.

Su esquema básico es el siguiente:

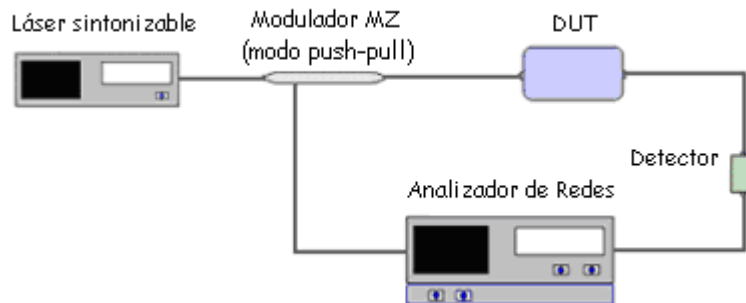


Fig. 4.3. Estructura básica del MPSM

Considerando el esquema de la figura 4.3 realizamos el correspondiente análisis matemático.

De la expresión 4.6 extraemos el término diferencia de fases (será la fase calibrada del S_{21} que obtendremos mediante el analizador de redes) que nos permite aproximar mediante incrementos la derivada en la definición del retardo de grupo:

$$\psi = \frac{\phi_1 - \phi_{-1}}{2} = \frac{\phi(\omega_0 + \Delta\omega) - \phi(\omega_0 - \Delta\omega)}{2} \quad (4.10)$$

$$\tau_g = -\frac{\delta\phi}{\delta\omega} \approx -\frac{\phi(\omega_0 + \Delta\omega) - \phi(\omega_0 - \Delta\omega)}{2\Delta\omega} \quad (4.11)$$

Una vez obtenido el retardo de grupo, si recordamos el desarrollo del apartado 1.2.2, podemos obtener fácilmente el valor de la dispersión:

$$D = \frac{\partial\tau_g}{\partial\lambda} \approx \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} \quad (4.12)$$

De nuevo, necesitamos medir el retardo de grupo para dos longitudes de onda cercanas que nos permitan aproximar la derivada por incrementos:

$$D = \frac{\partial\tau_g}{\partial\lambda} \approx \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} = \frac{\tau_g(\lambda_{0_2}) - \tau_g(\lambda_{0_1})}{\lambda_{0_2} - \lambda_{0_1}} \quad (4.13)$$

Combinando algunas expresiones, el cambio de fase eléctrica calibrada medido entre dos longitudes de onda se puede expresar como:

$$\Delta\psi = 360 \cdot D \cdot f_m \cdot \Delta\lambda \quad (4.14)$$

Por tanto, podemos deducir la dispersión medida como:

$$D = \frac{\Delta\psi_{medida}}{360 \cdot f_m \cdot \Delta\lambda} \quad (4.15)$$

donde $\Delta\psi_{medida}$ viene dada por la diferencia de fases eléctricas (fases calibradas del S_{21} dado por el analizador de redes) medidas para dos longitudes de onda portadoras:

$$\Delta\psi_{medida} = \psi(\lambda_{0_1}) - \psi(\lambda_{0_2}) \quad (4.16)$$

Por último, considerando la expresión 4.16, podemos reescribir el parámetro de la dispersión del siguiente modo:

$$D = \frac{\psi(\lambda_{0_1}) - \psi(\lambda_{0_2})}{360 \cdot f_m \cdot \Delta\lambda}$$

(4.17)

4.4 Limitaciones del MPSM

Es importante destacar que este método presenta algunas limitaciones. Principalmente existe un compromiso entre los valores de f_m y $\Delta\lambda$ resultante de las aproximaciones de las derivadas por incrementos. Necesitamos que la frecuencia sea pequeña ya que estamos aproximando la expresión del retardo

de grupo como: $\tau_g = -\frac{\Delta\psi^\pm}{2\Delta\omega_m}$ y por tanto la aproximación será mejor cuanto

menor sea la frecuencia de modulación relativa al ritmo de cambio de la fase óptica. Pero al mismo tiempo, nos interesa que la frecuencia sea alta ya que la magnitud medida experimentalmente y por tanto sujeta al error experimental es la fase eléctrica $\Delta\psi^\pm$. Según la expresión 4.11 para obtener el retardo de grupo hay que dividir por la frecuencia de modulación y por tanto el error en el retardo de grupo medido aumenta al disminuir la frecuencia de modulación que se utilice.

Por otro lado, debido a la naturaleza periódica de la función que gobierna la fase detectada, existe un valor máximo de dispersión que este método es capaz de medir sin ambigüedades. El detector de fase únicamente proporciona cambios comprendidos entre $\pm 180^\circ$. Después de introducir un $\Delta\lambda$, el detector se pone a 0 e introduce de nuevo $\pm 180^\circ$ para la siguiente medida. Si el siguiente $\Delta\lambda$ produce un cambio mayor a $\pm 180^\circ$ respecto al anterior, el detector de fase pierde el historial de cambio de fase actual y mide la fase equivalente en el periodo $\pm 180^\circ$ lo que hace que la medida no sea la esperada.

Por consiguiente, el máximo valor de dispersión que podrá medirse usando este método dependerá de f_m y $\Delta\lambda$ según las siguientes expresiones.

$$\Delta\psi = 360 \cdot D \cdot f_m \cdot \Delta\lambda \leq \pm 180 \quad (4.18)$$

$$D_{\max} \leq \frac{1}{2 \cdot f_m \cdot \Delta\lambda} \quad (4.19)$$

Este compromiso entre la precisión de la medida y la validez de las aproximaciones matemáticas deberá resolverse en función de los dispositivos de medida disponibles. Más adelante, se justificará el valor de algunos parámetros necesarios en el sistema para que esta limitación no afecte notablemente a la medida.

4.5 Método de Peucheret

De igual modo que en el MPSM, el método de Peucheret mantiene el esquema de funcionamiento mostrado en la figura 4.3. La expresión 4.6, por tanto, nos permite realizar también el desarrollo matemático para este método. La única

diferencia se encuentra en su interpretación, ahora no será el parámetro de la fase quien nos aporte información sobre la dispersión sino la amplitud.

Como hemos visto en el apartado 1.2.2, la expresión suma de fases se puede expresar del siguiente modo:

$$\sum \phi = \frac{\lambda_0^2 \cdot D \cdot 2\pi \cdot f_m^2}{c} \quad (4.20)$$

Si ahora nos fijamos en la expresión 4.6 podemos ver que haciendo medidas de amplitud para diferentes frecuencias, se puede determinar el parámetro de la dispersión. En esto se basa el método de Peucheret.

El problema está en que en un montaje experimental es difícil atribuir únicamente al efecto de la dispersión las atenuaciones encontradas puesto que varios de los dispositivos presentes, incluido el DUT, pueden añadir pérdidas cuyo valor será difícil de eliminar de la medida. La estrategia entonces consiste en determinar dónde se producen ceros de señal detectada. Estos ceros se producen debido a la interferencia destructiva entre la señal detectada procedente de la banda superior y la procedente de la banda inferior. El problema se encuentra en cómo influir sobre el nivel de dispersión para conseguir precisamente una interferencia destructiva. En el método de Peucheret lo que se hace es aumentar la frecuencia de modulación hasta conseguir esto mismo, que la interferencia entre bandas sea destructiva.

Concretamente, consiste en determinar dos frecuencias (f_m) diferentes para las cuales se anule la amplitud de la señal detectada. De esta forma, podemos determinar el valor del término suma de fases y por tanto el valor de la dispersión. A continuación se muestra el procedimiento matemático a seguir.

Como hemos justificado anteriormente el parámetro suma de fases se expresa de la siguiente forma $\sum \phi = \frac{\lambda_0^2 \cdot D \cdot 2\pi \cdot f_m^2}{c}$, y sabiendo que éste se anula para valores de $(2m+1) \cdot \frac{\pi}{2}$ podemos definir el parámetro de la dispersión del siguiente modo.

Frecuencia 1:

$$\frac{\lambda_0^2 \cdot D \cdot 2\pi \cdot f_{m1}^2}{c} = (2m+1) \cdot \frac{\pi}{2} \quad D = \frac{(2m+1) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot c}{\lambda_0^2 \cdot 2\pi \cdot f_{m1}^2} \quad (4.21)$$

Frecuencia 2:

$$\frac{\lambda_0^2 \cdot D \cdot 2\pi \cdot f_{m2}^2}{c} = (2m+2) \cdot \frac{\pi}{2} \quad D = \frac{(2m+2) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot c}{\lambda_0^2 \cdot 2\pi \cdot f_{m2}^2}$$

(4.22)

Considerando la diferencia entre las dos frecuencias comentadas:

$$\frac{\lambda_0^2 \cdot D \cdot 2\pi}{c} (f_{m2}^2 - f_{m1}^2) = \pi - \frac{\pi}{2}$$

(4.23)

Obtenemos el parámetro de la dispersión como:

$$D = \frac{c}{4 \cdot \lambda_0^2 \cdot (f_{m2}^2 - f_{m1}^2)}$$

(4.24)

4.6 Limitaciones del método de Peucheret

Como en el MPSM en el método de Peucheret también existen algunas limitaciones. El mayor inconveniente es que dependiendo del valor de la dispersión a medir, las frecuencias a las que se generan los ceros de amplitud pueden estar muy separadas entre sí, lo que conlleva a que se pierda mucha resolución. Además, al mismo tiempo esto implica que se debe poseer un equipo que se ajuste a estas necesidades y por lo tanto que pueda resultar demasiado caro.

Las limitaciones de estos dos métodos muestran la importancia de analizar los métodos actuales de medida de dispersión. Es fundamental determinar sus limitaciones e investigar nuevos métodos que puedan solventar estos inconvenientes. En los capítulos 5 y 6 se presentarán nuevos métodos de medida que mejoren algunas de estas restricciones.

4.7 Análisis experimental del MPSM

Para calcular el valor de la dispersión se emplea el montaje mostrado en la figura 4.4.

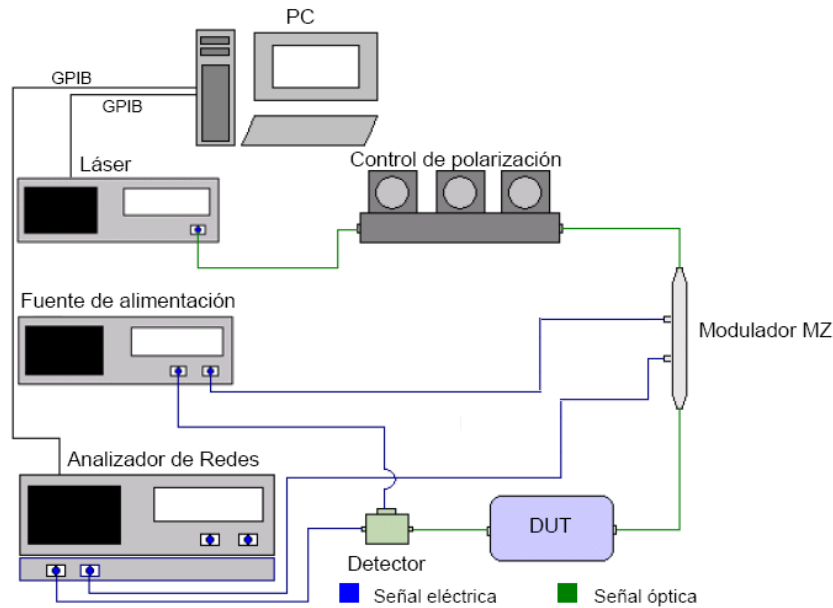


Fig. 4.4. Esquema experimental del MPSM

El funcionamiento se basa en modular una señal óptica mediante una señal de radio frecuencia. Una vez la señal óptica ha atravesado el dispositivo dispersivo, con un analizador de redes se mide el desfase que ha sufrido la envolvente de la señal para así calcular el retardo de grupo. El análisis matemático y la justificación de la técnica de obtención del retardo de grupo se encuentran en el apartado 4.3.

Una vez implementado el montaje experimental adecuado el siguiente paso para iniciar la medida es introducir los parámetros necesarios en la interfaz gráfica Fiber Test. La pantalla correspondiente se muestra en el apartado 3.1.1.2. Desde el punto de vista del usuario se facilita mucho el trabajo práctico ya que el programa se encarga de enviar automáticamente todos los datos a los dispositivos que estén implicados en la medida.

Concretamente, en este caso los parámetros más importantes son los relacionados con la longitud de onda. Estos datos se envían al laser sintonizable que nos permite iniciar el barrido óptico y por lo tanto la medida. Su señal se conecta a través del polarizador a la entrada óptica del modulador y mediante el bias-tee se introducen la tensión de *bias* (cuadratura) y la señal de RF que proporciona el analizador de redes. Una vez a la salida del modulador nos encontramos con el elemento dispersivo (DUT) que nos introduce en el sistema la dispersión cromática. Para recuperar la señal moduladora y eliminar la componente óptica, la señal retardada entra en el detector óptico-eléctrico. Finalmente, la salida del detector se introduce en el analizador de redes que nos permite medir la fase de la señal.

Es importante tener en cuenta que para realizar la medida de fase introducida por el DUT es necesario realizar previamente un proceso de calibración. Con ello se minimizan los efectos de los errores de repetibilidad y se corrigen los defectos de precisión. Por ejemplo, en nuestro caso, el mismo modulador

introduce una fase inicial que a pesar de que no depende de la frecuencia portadora puede ocasionar pequeñas variaciones en la fase resultante.

Por este motivo, con el fin de eliminar los retardos ajenos al DUT, el proceso de calibración consiste en realizar una primera medida sin DUT que nos permita obtener el valor de fase de cada una de las longitudes de onda para posteriormente restárselo a la medida realizada con el elemento dispersivo añadido.

4.7.3 Caracterización del montaje

Como hemos mencionado en el apartado 4.4 el MPSM presenta una limitación significativa. Existe un compromiso en la elección de los saltos frecuenciales que efectúa el láser y la frecuencia de modulación.

Para evitar los posibles errores que pueda ocasionar esta limitación, mostramos a continuación los valores concretos de algunos parámetros.

- **Frecuencia de la señal de RF:** A frecuencias bajas se obtendrían medidas con poca resolución y por el contrario a frecuencias muy altas el desarrollo de Taylor aplicado en las aproximaciones no sería válido. Considerando estas restricciones se ha decidido escoger un valor intermedio de 500 MHz.
- **Frecuencia de la señal óptica:** este parámetro sufre algunas limitaciones según el elemento dispersivo utilizado. En el caso de emplear la DC-FBG la frecuencia óptica estará limitada por el ancho de banda de la misma. Por el contrario en el caso de utilizar la fibra compensadora no existe ningún tipo de restricción. dentro de los valores típicos de longitudes de onda típicas de los sistemas de emisión por fibra.

A continuación se muestra un cuadro resumen de los valores comentados anteriormente incluyendo también el valor de las potencias elegidas.

	Frecuencia	Potencia	
Señal RF	500 MHz	-5 dBm	
Señal óptica	1557.5 – 1561 nm	DC-FBG	3 dBm
		DCF	4 dBm

Tabla 4.1. Resumen de parámetros

4.7.4 Recorrido de potencias

Una vez acordado el valor de los parámetros, se recomienda realizar un *recorrido de potencias* a lo largo del montaje. El objetivo es observar el valor que está tomando la potencia a la salida de cada uno de los dispositivos. De

esta manera, en caso de que el resultado no sea el esperado podremos detectar con mayor facilidad en qué etapa del montaje se ha producido el error. A continuación, se muestra el recorrido de potencias que se obtiene para el montaje experimental del MPSM.

Realizado para la medida sin DUT y una potencia óptica de 4 dBm

Etapas	P_{in}	Pérdidas	P_{out}
Polarizador	4 dBm	0.5 dB	3.5 dBm
Modulador	3.5 dBm	12.5 dB	-9 dBm
Fibra intermedia	-9 dBm	0.2 dB	-9.2 dBm

Tabla 4.2. Recorrido de potencias sin DUT

Realizado para la medida con DUT y una potencia óptica de 4 dBm

Etapas	P_{in}	Pérdidas	P_{out}
Polarizador	4 dBm	0.5 dB	3.5 dBm
Modulador	3.5 dBm	12.5 dB	-9 dBm
Fibra intermedia	-9 dBm	0.2 dB	-9.2 dBm
DUT (DCF)	-9.2 dBm	5.15 dB	-14.35 dBm

Tabla 4.3. Recorrido de potencias con DUT

4.7.5 Resultados obtenidos con la DCF

Siguiendo las consideraciones explicadas anteriormente realizamos las medidas experimentales utilizando la DCF.

Los parámetros introducidos en la interfaz gráfica Fiber Test son los siguientes:

- Longitud de onda inicial: 1557.5 nm
- Longitud de onda final: 1561 nm
- Frecuencia analizador de redes: 500 MHz
- Potencia analizador de redes: -5 dBm
- Resolución: 0.05 nm

En primer lugar se efectúa la medida correspondiente al montaje sin DUT. En la figura 4.5 se puede observar el resultado.

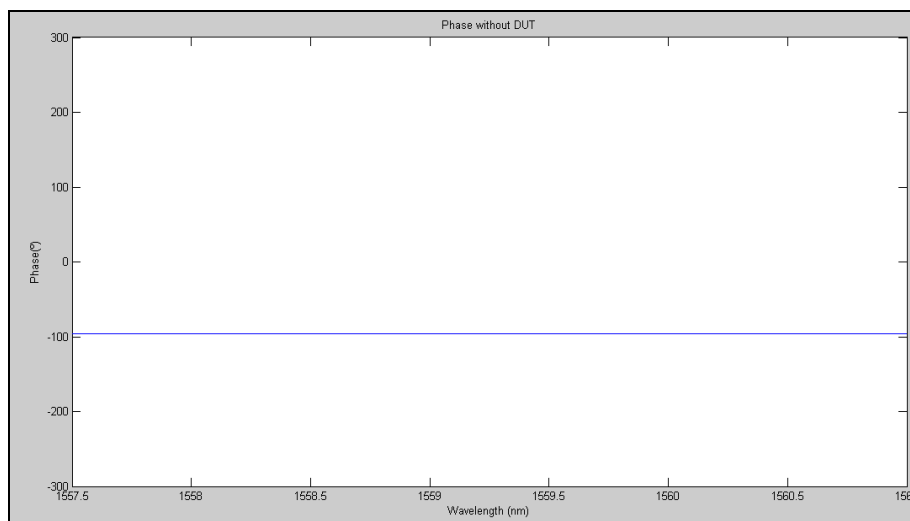


Fig. 4.5. Medida de fase sin DUT

Como vemos en la gráfica, el valor de fase se mantiene prácticamente constante a lo largo de las diferentes longitudes de onda. Esto es debido a que la medida se ha realizado sin DUT y por tanto no existe dispersión alguna.

Del mismo modo, realizamos la medida de fase con DUT.

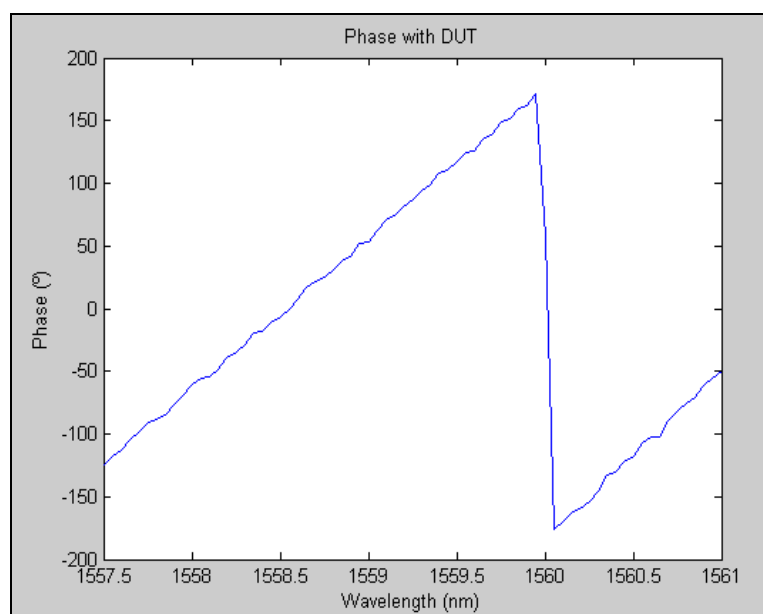


Fig. 4.6. Medida de fase con DUT

Como vemos en la gráfica 4.6, la señal aparece formando un diente de sierra debido a los saltos de fase del sistema. Antes de continuar con la medida debemos corregir estos saltos ya que el detector de fase únicamente proporciona cambios comprendidos entre $\pm 180^\circ$. Esta restricción se ha detallado en el apartado 4.4.

Para solventar este problema, se suma 360° cada vez que aparece un salto de fase. De esta manera, se evitan los cambios y la señal pasa a convertirse en una recta como se observa en la figura 4.7.

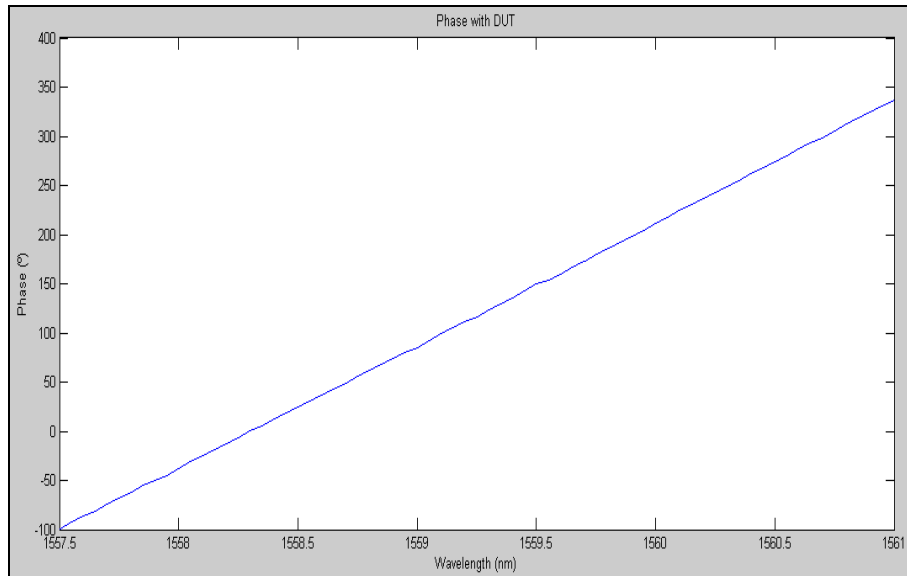


Fig. 4.7. Medida de fase con corrección

Una vez obtenidas las dos medidas de fase correspondientes, la medida sin DUT y la medida corregida con DUT, realizamos la calibración comentada anteriormente. Si recordamos este procedimiento nos permite obtener únicamente la fase añadida por el elemento dispersivo.

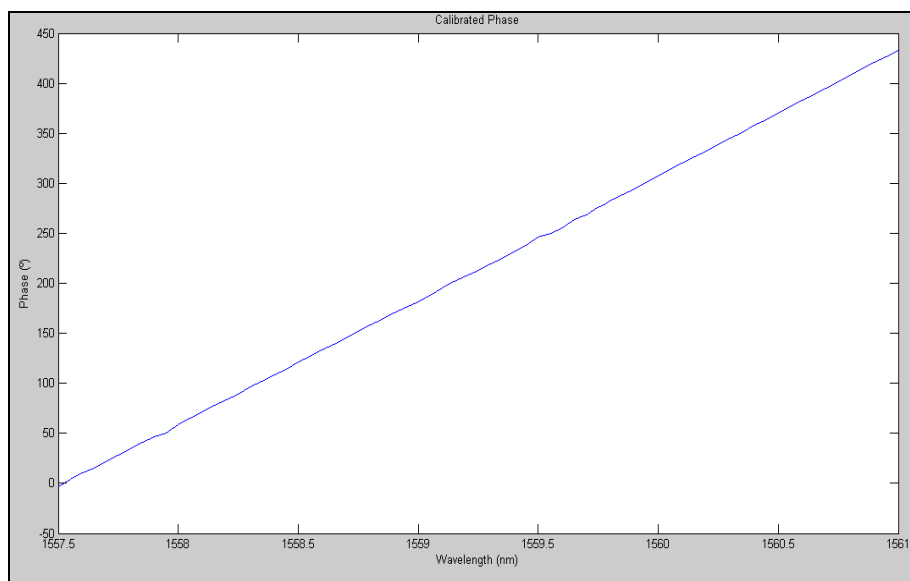


Fig. 4.8. Medida de fase calibrada

A continuación, siguiendo el desarrollo aplicado en el apartado 4.3, calculamos el retardo de grupo que sufre la señal para cada longitud de onda.

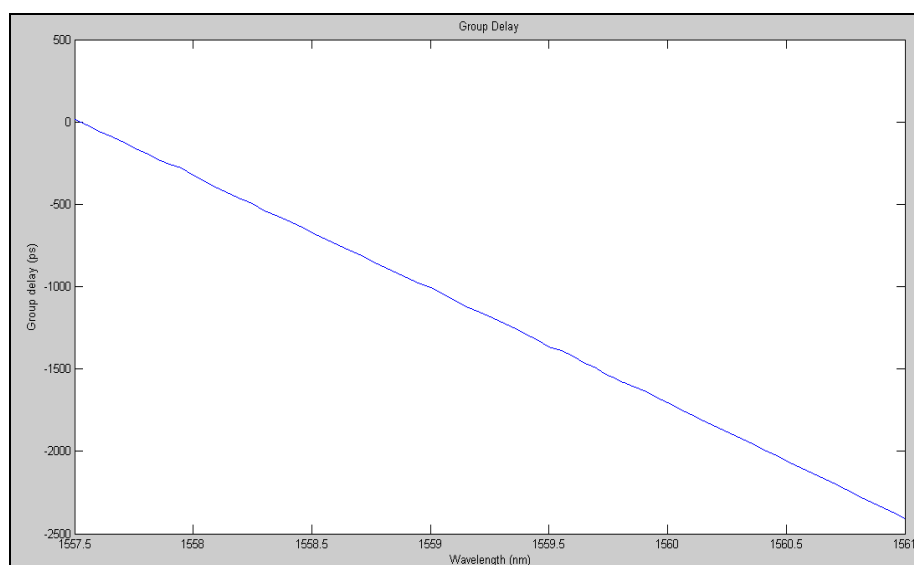


Fig. 4.9. Retardo de grupo

Por último, aplicando la fórmula 4.13 donde se realiza la derivada del retardo de grupo respecto la longitud de onda, obtenemos la gráfica de la dispersión.

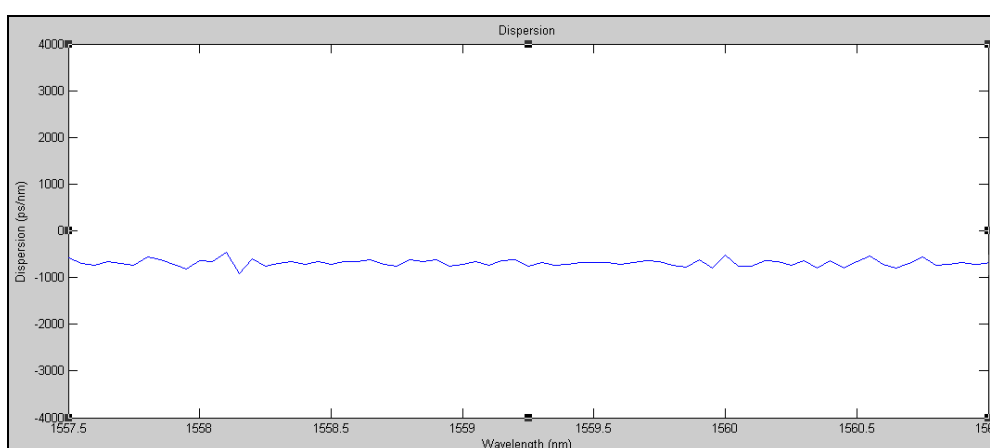


Fig. 4.10. Dispersión

Tras realizar la media de los valores de dispersión obtenidos en la gráfica anterior y compararlos con el valor nominal, obtenemos la tabla siguiente:

Dispersión	
Valor medido	-687,11 ps/pm
Valor nominal	-671 ps/pm
Error de medida	-16,11 ps/pm

Tabla 4.4. Cálculo del error de medida

CAPÍTULO 5. ASYMMETRIC BIAS CONTROLLED METHOD

En este capítulo explicaremos un nuevo método de medida de dispersión, el *Asymmetric Bias Controlled Method* (ABCM). Su montaje es similar al del MPSM pero cabe destacar que en este caso necesitaremos trabajar en modo *asimétrico* y por lo tanto precisaremos de un modulador Mach Zehnder en funcionamiento *dual-drive*.

A partir de la expresión genérica que hemos obtenido en el estudio del MZ, llevaremos a cabo el análisis matemático considerando este tipo de configuración en el modulador Mach Zehnder. Este desarrollo nos permitirá fundamentar la base matemática para el ABCM y para otro nuevo método de medida de dispersión, el RF Scan, explicado en el capítulo 6.

5.1 Desarrollo matemático del modulador en modo *asimétrico*

Al aplicar al modulador un modo de trabajo *asimétrico* obtenemos la estructura siguiente:

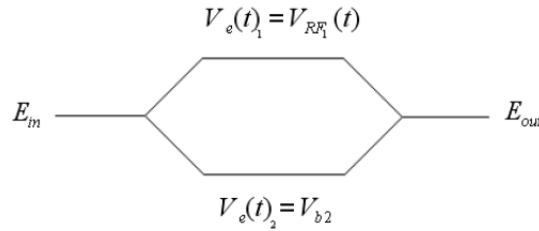


Fig. 5.1. Modulador en modo asimétrico

Considerando el esquema, realizamos su desarrollo matemático partiendo de la expresión 4.3 correspondiente a la salida del modulador Mach Zehnder en modo *genérico*.

$$E_{out} = e^{j\theta_{b1}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n \cdot J_n(m_1) \cdot e^{jn(\omega_{m1}t + \theta_{m1})} + e^{j\theta_{b2}} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n \cdot J_n(m_2) \cdot e^{jn(\omega_{m2}t + \theta_{m2})} \quad (5.1)$$

No obstante, esta vez es necesario considerar que estamos trabajando en modo *asimétrico* y por lo tanto tenemos que tener en cuenta las siguientes características:

$m_1 \neq 0$	$m_2 = 0$
$V_{b1} = 0$	$V_{b2} \neq 0$
$\theta_{b1} = \frac{\pi}{V_{\pi 1}} V_{b1} = 0$	$\theta_{b2} = \frac{\pi}{V_{\pi 2}} V_{b2} \neq 0$

(5.2)

Con las expresiones anteriores y teniendo en cuenta las particularidades para el modo *asimétrico* obtenemos a la salida del modulador *dual-drive* la siguiente expresión:

$$E_{out} = J_0(m) + j \cdot J_1(m) \cdot e^{j(\omega_m t + \theta_m)} + j \cdot J_1(m) \cdot e^{-j(\omega_m t + \theta_m)} + e^{j\theta_{b2}}$$

(5.3)

5.2 Asymmetric Bias Controlled Method (ABCM)

Se ha visto en el método de Peucheret que la única manera para conseguir que el valor de la dispersión produzca precisamente un cero de señal detectada a la frecuencia moduladora, es cambiar el valor de esta frecuencia moduladora a valores que podían ser demasiado elevados, dependiendo de la dispersión a medir.

A continuación veremos que al trabajar en modo *asimétrico* se dispone de una nueva variable para conseguir estos ceros a una frecuencia moduladora dada. Esta nueva variable se corresponde con el valor del *bias* aplicado al modulador.

El esquema básico del método es el siguiente:

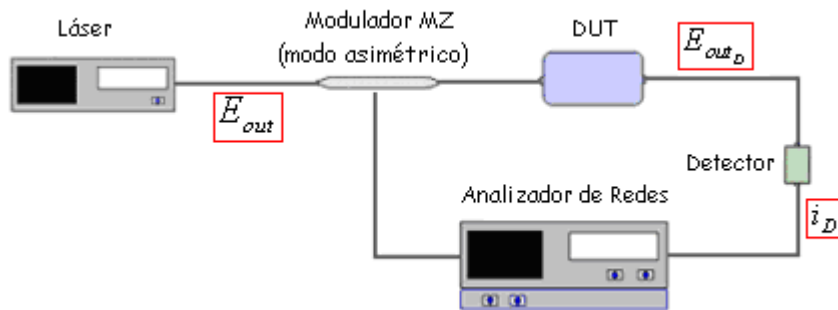


Fig. 5.2. Esquema básico del ABCM

Una vez obtenida la señal E_{out} a la salida del modulador, expresión 5.3, la señal pasa por el elemento dispersivo, donde éste le añade un desfase a las diferentes componentes frecuenciales de la señal. Teniendo en cuenta este desfase y las aproximaciones *small-signal*, la señal se ve modificada del siguiente modo:

$$E_{out_D} = 2 \cdot J_0(m) \cdot \cos\left(\frac{\theta_{b2}}{2}\right) + 2j \cdot J_1(m) \cdot e^{-j\left(\frac{\theta_{b2}}{2}\right)} \cdot e^{j\left(\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2}\right)} \cdot \cos\left(\omega_m t + \theta_m + \frac{\phi_1 - \phi_{-1}}{2}\right)$$

(5.4)

Finalmente, a la salida del detector obtenemos la expresión final:

$$i_D = \|E_{out}\|^2 = \text{Re}^2 + \text{Im}^2$$

$$i_D = 4m \cdot \sin\left(\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2} - \frac{\theta_{b2}}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta_{b2}}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega_{mt} + \theta_m + \frac{\phi_1 - \phi_{-1}}{2}\right)$$

(5.5)

Cabe destacar que en la expresión 5.5 se puede ver que también en este caso tenemos la diferencia de fases propia del MPSM. Esto permite realizar las medidas del MPSM utilizando un modulador en funcionamiento *asimétrico* siempre que se garantice amplitud suficiente como para detectar la fase con suficiente precisión.

Observando la expresión anterior 5.5 también se comprueba que efectivamente, podemos controlar los ceros de amplitud a partir de la tensión de *bias*. Concretamente a partir de dos parámetros:

1. $\cos\left(\frac{\theta_{b2}}{2}\right)$
2. $\sin\left(\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2} - \frac{\theta_{b2}}{2}\right)$

Para el caso 1, se producen ceros de amplitud a $(2n+1) \cdot V_\pi$, son los conocidos como **ceros fijos**. Por otro lado, para el caso 2, los ceros se producen a $2\left(n - \frac{\sum \phi}{\pi}\right) \cdot V_\pi$ y debido a su dependencia con la fase introducida por el DUT son conocidos como **ceros móviles**. En los dos casos considerando $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$.

Es precisamente el desplazamiento que se produce entre los ceros móviles el que nos permite calcular la dispersión cromática.

5.3 Análisis matemático del ABCM

Con la finalidad de comprender mejor el sistema realizamos el análisis matemático que nos permite obtener el valor de la dispersión. Empezamos por buscar aquellos valores de tensión de *bias* que hacen que la amplitud se anule.

En primer lugar realizamos la medida sin DUT, de esta manera obtenemos el argumento del seno sin tener en cuenta la dispersión:

$$\sin\left(\frac{\theta_{b1}}{2}\right) = n\pi \quad (5.6)$$

Gráficamente el resultado es el que se muestra en la figura 5.3.

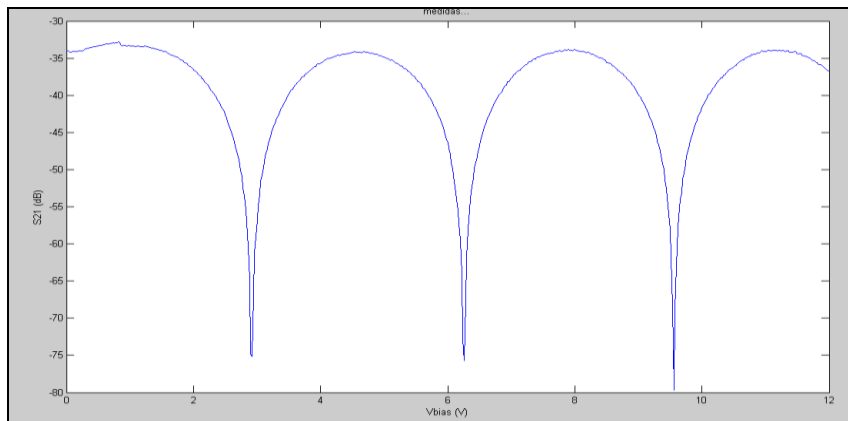


Fig. 5.3. Medida sin DUT

En este caso tenemos ceros para tensiones de *bias* que se corresponden con múltiplos de V_{π} . Sobre la función de transferencia estos ceros de señal modulada se corresponden con los máximos y los mínimos de la misma función de transferencia.

En segundo lugar, llevamos a cabo la medida con DUT para obtener el argumento con las fases introducidas por el elemento dispersivo:

$$\sin\left(\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2} - \frac{\theta_{b2}}{2}\right) = n\pi \quad (5.7)$$

El resultado de ambas gráficas resultantes es el siguiente:

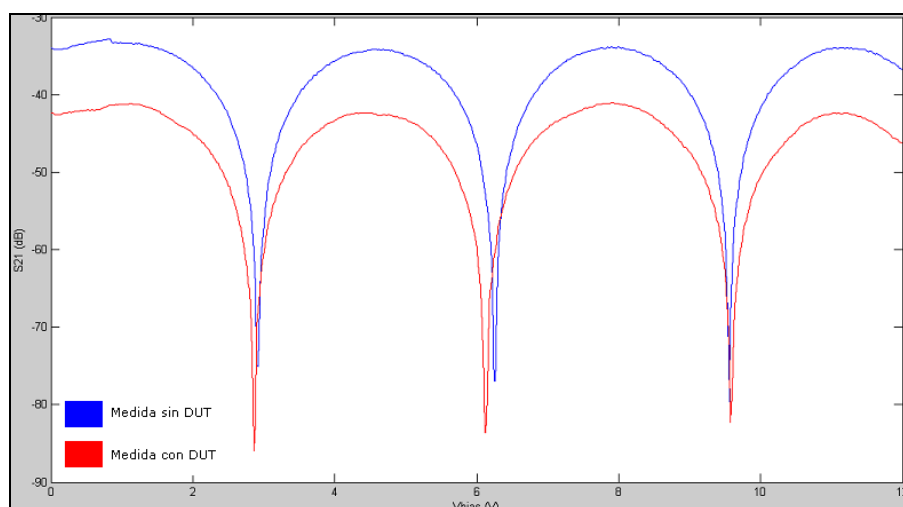


Fig. 5.4. Medida sin DUT y con DUT

Lo que se obtiene, es que mientras los ceros debidos a cancelación de portadora (mínimos de la función de transferencia) se mantienen fijos para el mismo valor de *bias* que en ausencia de DUT, los ceros que se producen en los máximos de la función de transferencia cambian de valor debido a la fase adicional entre componentes espectrales inducida por la dispersión. Ese cambio de valor en el *bias* necesario para la cancelación nos permite calcular el valor de la dispersión según la expresión 5.10, obtenida a partir del siguiente desarrollo.

Considerando que la suma de fases es, $\frac{D\pi\lambda_0^2 f_m^2}{c}$ podemos reescribir la expresión 5.7 como:

$$\sin\left(\frac{D\pi\lambda_0^2 f_m^2}{c} - \frac{\theta_{b2}}{2}\right) = n\pi \quad (5.8)$$

donde θ_{b2} es la fase producida por la tensión de *bias* necesaria para conseguir un cero de señal modulada detectada.

Una vez realizadas las medidas considerando el caso sin DUT y el caso con DUT, podemos deducir:

$$\theta_{b1} - \theta_{b2} = -\frac{2D\pi\lambda_0^2 f_m^2}{c}$$

$$\Delta\theta_b = -\frac{2D\pi\lambda_0^2 f_m^2}{c} \quad (5.9)$$

Finalmente, considerando la expresión 4.1, donde se define $\theta = \frac{\pi}{V_\pi} V_b$, podemos concretar el valor de la dispersión del siguiente modo:

$$D = \frac{-c \cdot \Delta\theta_b}{2\pi\lambda_0^2 f_m^2} = \frac{-c \cdot \frac{\pi}{V_\pi} (V_{b1} - V_{b2})}{2\pi\lambda_0^2 f_m^2} = \frac{-c \cdot \pi (V_{b1} - V_{b2})}{2\pi V_\pi \lambda_0^2 f_m^2}$$

$$D = \frac{-c \cdot (V_{b1} - V_{b2})}{2 \cdot V_\pi \lambda_0^2 f_m^2}$$

(5.10)

5.4 Análisis experimental del ABCM

Mientras que para determinar la dispersión con el MPSM se requieren medidas a dos longitudes de onda cercanas y por tanto se necesita usar un láser sintonizable, en este caso la medida de la dispersión tan sólo requiere de medidas a la longitud de onda de interés y puede por tanto realizarse usando un láser fijo. Esta variación también es notable en las conexiones que unen el PC con los demás dispositivos. Ahora, los elementos controlados remotamente son la fuente de alimentación, mediante el puerto RS-232, y el analizador de redes, mediante el puerto GPIB. La fuente nos permite controlar el barrido de *bias* y el analizador de redes nos introduce la señal moduladora y nos mide la amplitud de la señal detectada. Cabe destacar que prescindir del láser sintonizable es una ventaja respecto al MPSM ya que de este modo evitamos sus imprecisiones en la medida.

Para llevar a cabo las medidas de dispersión mediante el método ABCM es necesario seguir la implementación práctica de la figura 5.5.

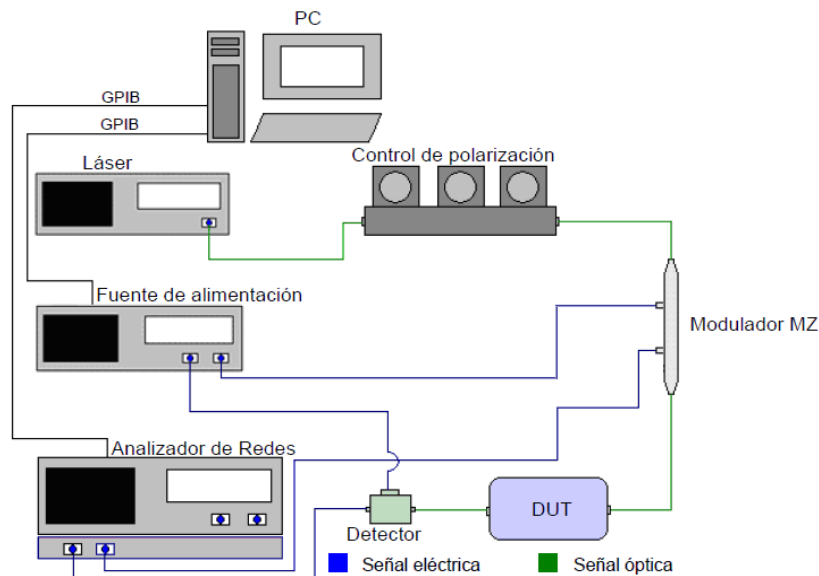


Fig.5.5. Esquema experimental del ABCM

El primer paso importante para llevar a cabo la medida es realizar la conexión del esquema de montaje tal y como muestra la figura 5.5. Pero aún realizando la implementación pertinente no se garantiza que la medida vaya a ser correcta, por lo que es necesario comprobar, antes de iniciar el proceso, que los niveles de señal óptica son los adecuados y que el ajuste del polarizador es correcto para adaptar la polarización de la onda en la fibra estándar a la de la fibra preservadora a la entrada del MZ.

Una vez hechas todas las comprobaciones, para iniciar la medida es necesario introducir los parámetros característicos del método en la interfaz gráfica Fiber Test. Como se ha visto en el apartado 3.1.1.3 el usuario puede elegir la tensión de *bias*, inicial y final, la resolución de los saltos efectuados por la fuente de alimentación y la frecuencia de modulación y potencia del analizador de redes.

Una vez introducidos todos los parámetros necesarios, el láser envía la señal óptica que a través del polarizador llega hasta la entrada del modulador *dual-drive*. A su salida la señal pasa por el elemento dispersivo donde éste le añade un desfase. Finalmente mediante el detector, la señal llega al analizador de redes para que éste pueda medir su amplitud. Allí, se efectúan tres medidas por cada tensión de *bias* a partir de las cuales el programa extraerá una media. Este proceso se repetirá hasta que la fuente de alimentación proporcione la tensión final introducida previamente por el usuario.

Hay que recordar que en este caso resulta imprescindible realizar una función de transferencia antes de realizar la medida. Los valores entre los cuales se realice el barrido tienen que ser los adecuados para posteriormente poder calcular la dispersión. Los ceros móviles en ausencia de dispersión se producen para múltiplos pares de la tensión V_{π} .

Además, como en el método anterior hay que realizar un proceso de calibración. Con el fin de obtener el valor correcto del desplazamiento de los ceros móviles se debe hacer una medida previa sin DUT y otra posterior con DUT.

5.4.1 Caracterización del montaje

Igual que ocurre en el método de medida MPSM, existe un compromiso entre la elección de la frecuencia y la potencia de la señal de RF.

A continuación se muestran los valores seleccionados para la medida teniendo en cuenta esta limitación.

Frecuencia de la señal de RF: si la frecuencia es muy baja el desplazamiento que se produce entre los ceros móviles puede resultar insignificante, dando lugar a confusiones. En la mayoría de casos los dispositivos tienen un cierto margen de error que también puede afectar a la medida con pequeñas variaciones en el desplazamiento.

Por lo contrario si la frecuencia elegida es muy elevada, se puede producir un exceso de desplazamiento en los ceros móviles. Sin olvidar que se debe tener en cuenta que la aproximación en serie de Taylor deja de ser válida para bandas muy alejadas de la portadora.

Se decide entonces, utilizar una frecuencia de 2 GHz para realizar las medidas.

Frecuencia de la señal óptica: en nuestros experimentos este valor suele ir limitado por la banda de paso de la DC-FBG. En este caso se escoge la frecuencia central del ancho de banda del dispositivo, 1559 nm.

A continuación se muestra un cuadro resumen de los valores comentados anteriormente incluyendo además las potencias seleccionadas para la medida.

	Frecuencia	Potencia	
Señal RF	2 GHz	-5 dBm	
Señal óptica	1559 nm	DC-FBG	3 dBm
		DCF	4 dBm

Tabla 5.1. Resumen de parámetros

5.4.2 Recorrido de potencias

Como se ha justificado en el apartado 4.7.2, es conveniente realizar un recorrido de potencias antes de efectuar la medida.

A continuación, se muestra el correspondiente para el montaje experimental del ABCM.

Realizado para la medida sin DUT y una potencia óptica de 4 dBm

Etapas	P_{in}	Pérdidas	P_{out}
Polarizador	4 dBm	1.5 dB	2.5 dBm
Modulador	2.5 dBm	11.2 dB	-8.7 dBm
Fibra intermedia	-8.7 dBm	0.4 dB	-9.1 dBm

Tabla 5.2. Recorrido de potencias sin DUT

Realizado para la medida con DUT y una potencia óptica de 4 dBm

Etapas	P_{in}	Pérdidas	P_{out}
Polarizador	4 dBm	1.5 dB	2.5 dBm
Modulador	2.5 dBm	11.2 dB	-8.7 dBm
Fibra intermedia	-8.7 dBm	0.4 dB	-9.1 dBm
DUT (DCF)	-9.1 dBm	5.3 dB	-14.4 dBm

Tabla 5.3. Recorrido de potencias con DUT

5.4.3 Resultados obtenidos con la DCF

Siguiendo las consideraciones explicadas en el apartado 5.4, a continuación se realizan las medidas experimentales con la DCF. Los parámetros introducidos en Fiber Test son los siguientes:

- Frecuencia RF: 2 GHz
- Potencia RF: -5 dBm
- Longitud de onda: 1559 nm
- Potencia óptica: 4 dBm
- Barrido de *bias* utilizado: 0 V – 12 V
- Resolución: 20 mV

En primer lugar, realizamos la medida sin DUT.

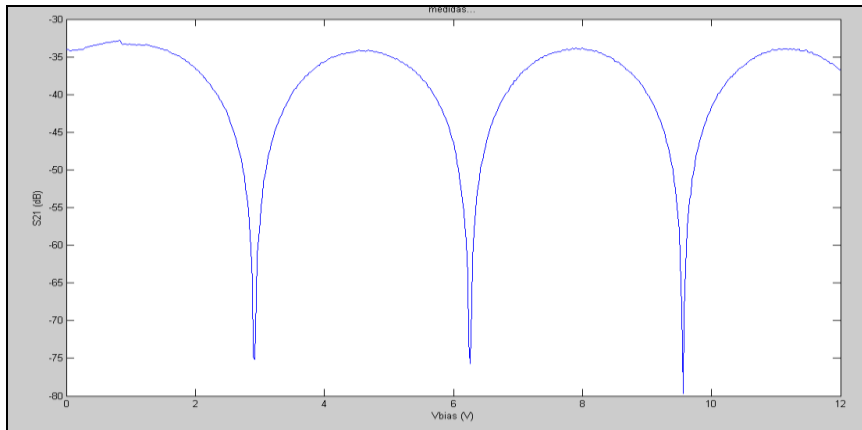


Fig. 5.6. Gráfica sin DUT

En segundo lugar, realizamos la medida con DUT.

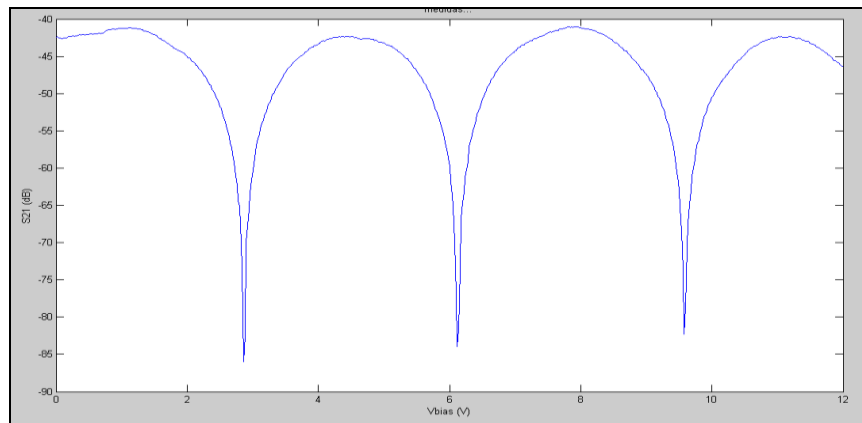


Fig. 5.7. Gráfica con DUT

Representamos las dos gráficas juntas para observar el desplazamiento de los ceros móviles.

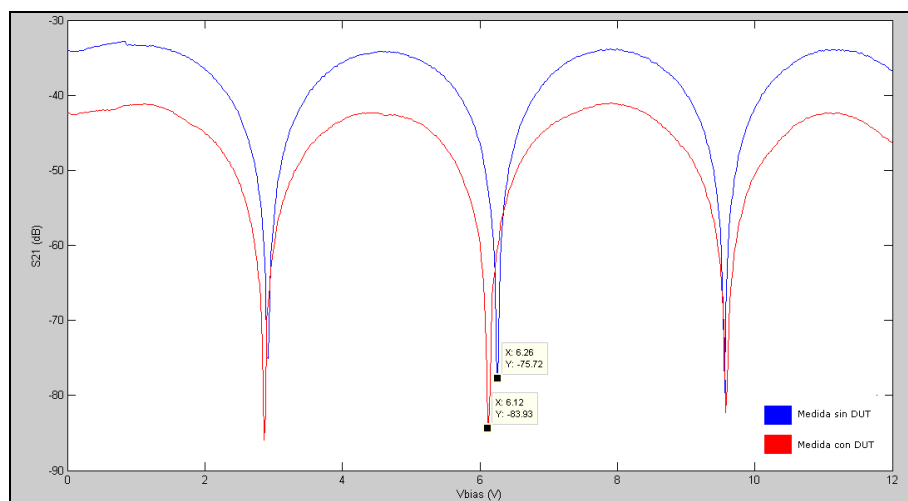


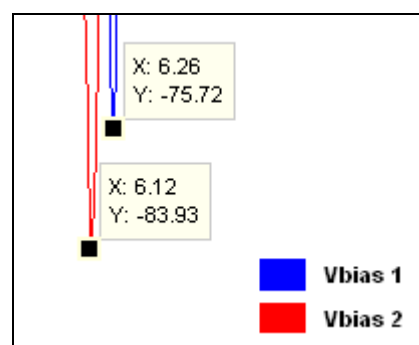
Fig. 5.8. Gráfica del desplazamiento de los ceros móviles

Por último, calculamos el valor de la dispersión:

$$(V_{b1} - V_{b2}) = 6.26 - 6.12 = 0.14V$$

$$V_{\pi} = 3.3V$$

$$D = \frac{-c \cdot (V_{b1} - V_{b2})}{2 \cdot V_{\pi} \lambda_0^2 f_m^2}$$



$$D = \frac{-c \cdot (V_{b1} - V_{b2})}{2 \cdot V_{\pi} \lambda_0^2 f_m^2} = \frac{-3 \cdot 10^8 \cdot 0.14}{2 \cdot 3.3 \cdot (1559 \cdot 10^{-9})^2 \cdot (2 \cdot 10^9)^2} = -654.56 \text{ ps/pm}$$

Dispersión	
Valor medido	-654.56 ps/pm
Valor nominal	-671 ps/pm
Error de medida	16.44 ps/pm

Tabla 5.4. Valor de la dispersión

Como podemos observar en la tabla 5.4 se observa un valor de la dispersión bastante cercano al valor nominal. Para lograr este resultado se ha considerado una frecuencia de RF lo suficientemente grande como para que el desplazamiento pueda ser medido pero suficientemente pequeña para que los ceros móviles no lleguen a solaparse con los fijos. Además, se ha realizado previamente un *recorrido de potencias* para comprobar que todos los dispositivos se estaban comportando correctamente. Este proceso resulta importantísimo si queremos obtener unos resultados óptimos.

5.5 Mejoras e inconvenientes del ABCM

Una de las ventajas que presenta el ABCM respecto al MPSM es que, en su caso, no se requiere de dos longitudes de onda para realizar el cálculo de la dispersión. Únicamente necesita una longitud de onda fija lo que implica prescindir del laser sintonizable y por lo tanto evitar errores de precisión en la medida.

Además, en el caso de querer aplicar esta técnica en situaciones reales se podría efectuar el cálculo de la dispersión simplemente a partir de la diferencia entre los ceros fijos y los ceros móviles. En este TFC no se ha implementando de tal manera pero es importante considerarlo para situaciones reales en las que resulta difícil realizar la medida sin DUT.

Otro factor interesante de la aplicación de esta técnica es que se puede determinar el signo de la dispersión. Según la dirección del desplazamiento de los ceros móviles se puede determinar si es positiva o negativa. En nuestro caso, como se observa en la figura 5.8 el desplazamiento es hacia la izquierda lo que implica que la dispersión es negativa.

Como inconveniente se ha comprobado que, del mismo modo que en el MPSM, existe un compromiso en la elección de la frecuencia de la señal de RF. Al aumentar la frecuencia de la señal de RF el desplazamiento de los ceros móviles se incrementa, lo que prácticamente puede llegar a producir un solapamiento de los ceros fijos con los móviles. Dado este caso, sería imposible la realización de las medidas de dispersión oportunas. A su vez si la frecuencia de RF es muy pequeña el desplazamiento que sufren los ceros móviles es tan insignificante que tampoco permite el cálculo la dispersión.

Por lo que se refiere a la implementación práctica también se deriva otro inconveniente. Es necesario trabajar con moduladores de tipo *dual-drive* y actualmente resulta difícil conseguirlos en el mercado. Una opción complementaria es utilizar una asociación de acopladores, fibras y un modulador de fase. Su combinación permite de igual manera realizar una configuración *asimétrica* y a pesar de que se introducirían algunas pequeñas pérdidas en el sistema serían mucho más fáciles de conseguir.

Además, después de llevar a cabo las pruebas de laboratorio hemos detectado que este método presenta un grave inconveniente. Su ejecución resulta bastante lenta ya que el cambio de *bias* necesita mucho tiempo para efectuarse. Buscar el cero de *bias* con suficiente precisión para cada portadora requiere mucha resolución y hace que se ralentice mucho el método. Este hecho, además, causa que el modulador electro-óptico no funcione correctamente provocando el fenómeno conocido como *bias drift*. A continuación se detallan sus efectos.

5.5.1 **BIAS DRIFT** de los moduladores interferométricos

Como se ha comentado en el apartado 5.5 la principal limitación del ABCM es su lenta ejecución. Aproximadamente cada prueba, con DUT y sin DUT indistintamente, puede tardar sobre una hora y media, considerando que se efectúan las dos medidas comentadas, podemos afirmar que el método tarda unas tres horas en conseguir el valor de la dispersión.

Pero además del tiempo, existe otro inconveniente derivado de este problema, el conocido como ***bias drift*** (Ref [5]). Es un efecto destacable en el comportamiento de los moduladores interferométricos Mach Zehnder que consiste en el desplazamiento que sufre el punto de trabajo (V_{π}) a lo largo del tiempo.

Mediante el programa Fiber Test se han generado 7 funciones de transferencia del modulador *dual-drive* durante 3 horas. Entre cada función se ha dejado una

pausa de 10 minutos y cada una de ellas ha tardado en ejecutarse alrededor de unos 15 minutos. El resultado obtenido se muestra en la siguiente figura:

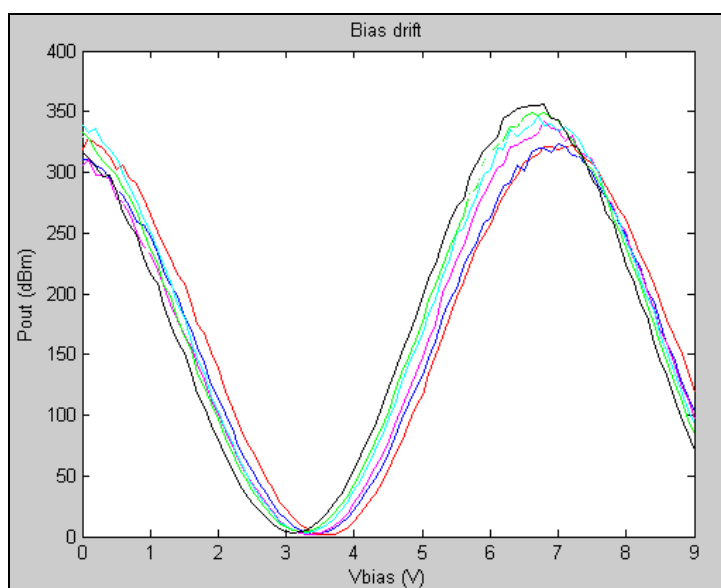


Fig. 5.9. Efecto del *bias drift*

Como se observa en la figura existe aproximadamente 0.5V positivo de *drift* o desplazamiento entre los valores de la primera y la última función. Este valor puede parecer despreciable pero toma importancia en experimentos de larga duración o aquellos que se repiten múltiples veces ya que obliga a calcular de nuevo el punto de trabajo definido inicialmente.

Desafortunadamente el ABCM cumple estas dos condiciones. Es un método de larga duración y que además debe repetirse en dos ocasiones: una primera medida con DUT y otra sin DUT. Para comprobar cómo afecta este fenómeno en su caso realizamos algunas medidas correspondientes a tres situaciones distintas.

Caso 1: El modulador ha estado trabajando realizando otras funciones anteriormente y con pausas reducidas en el mismo día.

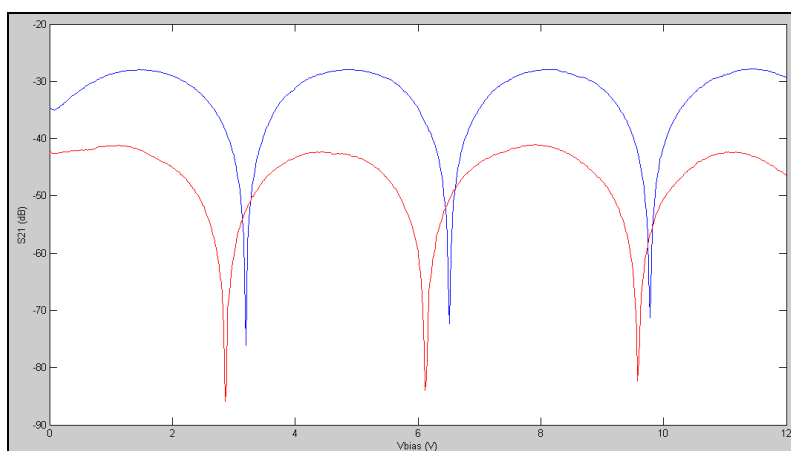


Fig. 5.10. Efecto del *bias drift* para el caso 1

Caso 2: El modulador realiza la primera de las gráficas sin haber estado funcionando antes y la segunda con una pausa entre las dos de aproximadamente una hora. Las dos gráficas realizadas en el mismo día.

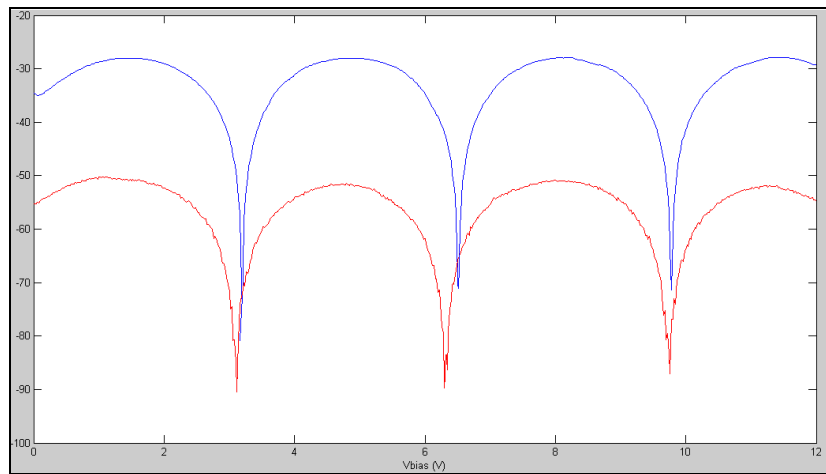


Fig. 5.11. Efecto del *bias drift* para el caso 2

Caso 3: El modulador realiza la primera de las gráficas sin haber estado funcionando antes y la segunda al día siguiente. Es decir, se realizan las dos funciones en días distintos.

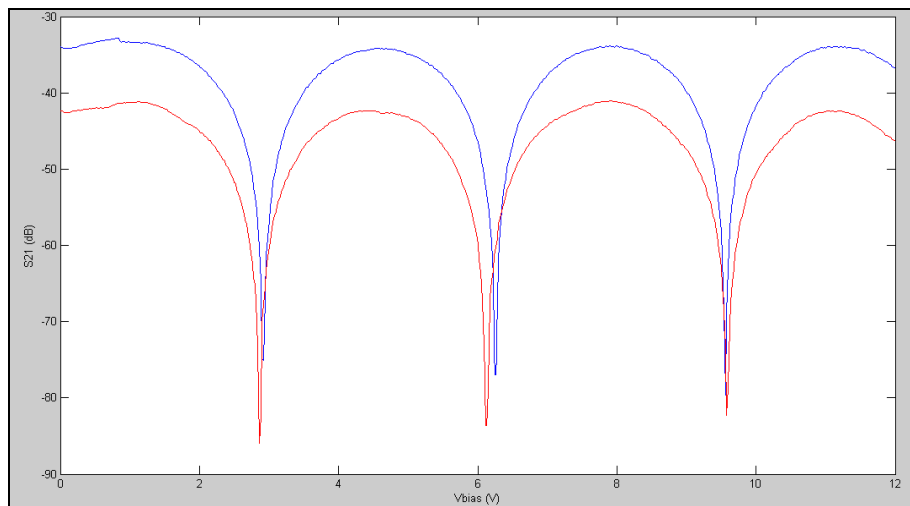


Fig. 5.12. Efecto del *bias drift* para el caso 3

Como podemos observar en las tres situaciones anteriores, con el mismo montaje es posible medir valores distintos según el funcionamiento del modulador.

En el **caso 1**: aparecen todos los ceros desplazados. Los parámetros para la medida eran los correctos y sin embargo el sobrecalentamiento del modulador provoca una variación en el punto de trabajo que no nos permite medir el valor

de la dispersión. En este caso, por tanto, deberíamos volver a calcular el valor de V_{π} y repetir la medida utilizando el valor correcto.

En el **caso 2**: utilizamos los mismos parámetros de los dispositivos que en el caso anterior, sin embargo ahora aparecen claramente un cero móvil y dos fijos. Esto es debido a que es la primera función que realiza el modulador y por tanto conserva el valor del punto de trabajo tal cual ha sido introducido inicialmente.

En el **caso 3**: con algo más de precisión que en el caso anterior, se observan un cero móvil y dos ceros fijos.

Es recomendable, pues, que se tenga en cuenta este efecto para conseguir unos resultados óptimos. Basta con dejar un tiempo de pausa entre medida y medida de manera que se le permita al modulador seguir manteniendo el punto de trabajo definido al inicio.

CAPÍTULO 6. RF SCAN

En este capítulo propondremos una nueva técnica de medida que combine las mejores prestaciones de los dos métodos anteriores y a su vez intente solventar las limitaciones mencionadas en cada caso. El objetivo es conseguir una manera más rápida y eficaz de calcular el valor de la dispersión. Lo llamaremos *RF Scan* ya que su principal característica es que se mide la dispersión en un margen de frecuencias óptico a partir de un barrido en radiofrecuencia de la frecuencia de la señal moduladora.

6.1 RF Scan

El método RF Scan permite explorar el espectro óptico a partir de un barrido en RF, lo que significa poder prescindir del láser sintonizable y conseguir una mejor resolución en frecuencia de RF. Por supuesto, el ancho de banda óptico que puede recorrerse estará limitado por la máxima frecuencia de RF a la que el analizador de redes pueda operar. Por ejemplo en nuestro caso el analizador de redes puede trabajar hasta 6 GHz, teniendo en cuenta que en tercera ventana la relación es aproximadamente: $125\text{MHz} \leftrightarrow 1\text{pm}$, equivaldrían a 48pm . Puesto que nuestro método permite hacer un barrido doble a banda y banda de la portadora óptica, se convertirían en 96pm .

Del mismo modo que en el ABCM se emplea también un modulador en modo *asimétrico*.

Hasta ahora hemos usado el analizador de redes en modo fijo (CW), es decir para una única frecuencia moduladora. Se aprovechará ahora la facultad del analizador de redes de realizar barridos de la frecuencia moduladora para identificar para cada tensión de *bias* utilizada las frecuencias a las que nos encontramos ceros de señal detectada.

De esa forma podremos obtener el valor del parámetro suma de fases para esas frecuencias. Si además consideramos que es posible obtener a esas mismas frecuencias valores de *bias* que aseguren un valor de amplitud suficiente, podemos conseguir la fase correspondiente en cada caso y por lo tanto el parámetro resta de fases ópticas. Combinando estos dos valores a dos frecuencias moduladoras cercanas podemos obtener el incremento de fases entre dos bandas laterales superiores por un lado, e inferiores por otro.

Estaremos entonces proporcionando valores de incremento de fases ópticas y por tanto de retardo de grupo a frecuencias ópticas diferentes de la portadora óptica utilizada (longitud de onda del láser). Es decir, estaremos obteniendo un barrido del espectro óptico mediante cambios en la frecuencia moduladora.

El esquema de montaje es el mismo que en el caso del ABCM, ya que en realidad los dos métodos se basan en la misma idea. Su objetivo es conseguir el valor de la dispersión a partir de la realización de medidas de amplitud basadas en la búsqueda de ceros. La única diferencia es que ahora, el RF Scan realiza además del barrido en *bias*, un barrido en frecuencia.

Si recordamos el capítulo 5 uno de los principales inconvenientes del ABCM es que su ejecución resulta demasiado larga debido a la lentitud de los saltos del *bias*. Este hecho también implica un mal funcionamiento del modulador electro-óptico debido al fenómeno *bias drift*. Con el RF Scan este problema queda resuelto, el barrido en frecuencia es mucho más rápido y eficaz y por tanto impedimos que se produzca un sobrecalentamiento del modulador, evitando en cierta medida el efecto del *bias drift*.

Como se observa en la figura 6.1 para llevar a cabo la medida necesitamos un láser que nos proporcione una longitud de onda fija, un modulador MZ de tipo *dual-drive*, el elemento dispersivo (DUT) que nos introduce la dispersión y el detector que nos permite enviar al analizador de redes la señal para que éste pueda medir la fase y la magnitud de la señal detectada.

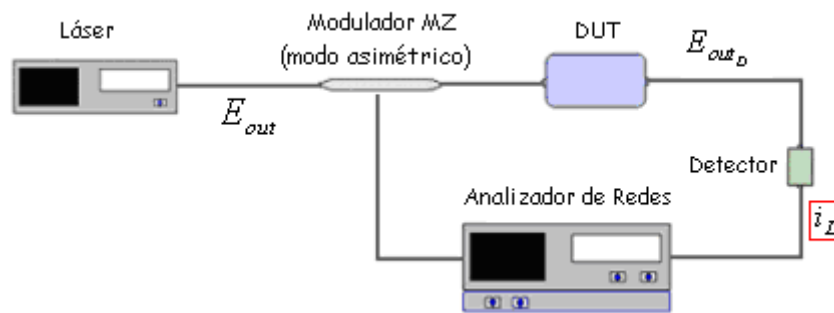


Fig. 6.1. Esquema básico del RF Scan

6.2 Análisis matemático del RF Scan

Para su análisis matemático consideramos de nuevo la expresión 5.5 correspondiente a la salida del modulador en modo *asimétrico*.

$$i_D = 4m \cdot \sin\left(\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2} - \frac{\theta_b}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\theta_b}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega_{m1} + \theta_m + \frac{\phi_1 - \phi_{-1}}{2}\right) \tag{6.1}$$

En este caso, el desarrollo se lleva a cabo considerando dos frecuencias distintas. Como se muestra en la figura 6.2 cada una de ellas nos proporciona un valor de fase diferente que en combinación con los demás nos permite calcular el retardo de grupo correspondiente.

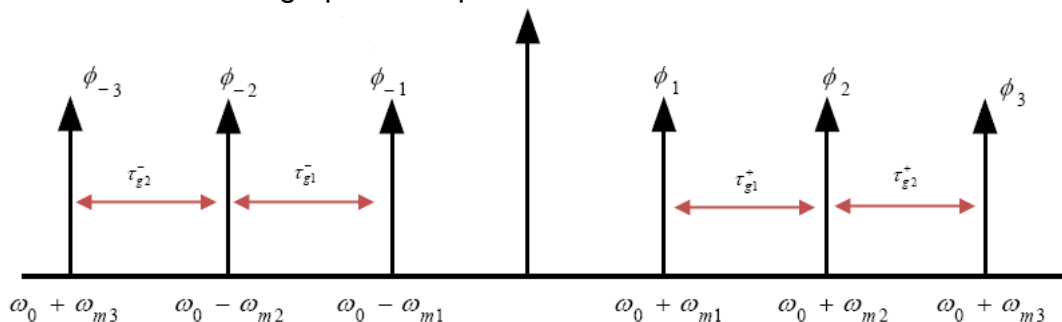


Fig. 6.2. Representación de los retardos de grupo

A partir de la expresión 6.1 deducimos la fase de la señal detectada para dos frecuencias distintas.

Frecuencia 1:	$\Delta\psi_1 = \frac{\phi_1 - \phi_{-1}}{2}$
Frecuencia 2:	$\Delta\psi_2 = \frac{\phi_2 - \phi_{-2}}{2}$

(6.2)

A continuación buscamos aquellos valores de tensión de *bias* en los que la amplitud se anula para determinar el término suma de fases:

$$\sin\left(\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2} - \frac{\theta_b}{2}\right)$$

$$\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2} - \frac{\theta_b}{2} = n\pi$$

(6.3)

Considerando dos frecuencias distintas:

Frecuencia 1:	$\frac{\phi_1 + \phi_{-1}}{2} - \frac{\theta_{1,fm1}}{2} = n\pi$	$\theta_{1,fm1} = -2n\pi + \phi_1 + \phi_{-1}$
Frecuencia 2:	$\frac{\phi_2 + \phi_{-2}}{2} - \frac{\theta_{2,fm2}}{2} = n\pi$	$\theta_{2,fm2} = -2n\pi + \phi_2 + \phi_{-2}$

(6.4)

Una vez obtenidos los dos parámetros podemos combinarlos de forma que obtengamos la diferencia de fases en las bandas superior e inferior:

$$\Delta\theta_b = \theta_{2,fm2} - \theta_{1,fm1} = (\phi_2 + \phi_{-2}) + (-\phi_1 - \phi_{-1})$$

$$\Delta\psi_e = \Delta\psi_2 - \Delta\psi_1 = \frac{(\phi_2 - \phi_{-2})}{2} - \frac{(\phi_1 - \phi_{-1})}{2}$$

(6.5)

Banda superior:

$$\Delta\phi^+ = \frac{(\phi_2 - \phi_{-2})}{2} - \frac{(\phi_1 - \phi_{-1})}{2} + \frac{(\phi_2 + \phi_{-2}) + (-\phi_1 - \phi_{-1})}{2} = \phi_2 - \phi_1 = \Delta\psi_2 - \Delta\psi_1 + \frac{\Delta\theta_b}{2}$$

(6.6)

Banda inferior:

$$\Delta\phi^- = \frac{(\phi_1 - \phi_{-1})}{2} - \frac{(\phi_2 - \phi_{-2})}{2} + \frac{(\phi_2 + \phi_{-2}) + (-\phi_1 - \phi_{-1})}{2} = \phi_{-2} - \phi_{-1} = \Delta\psi_1 - \Delta\psi_2 + \frac{\Delta\theta_b}{2}$$

(6.7)

A partir de estas dos expresiones podemos determinar el retardo de grupo τ_g^\pm :

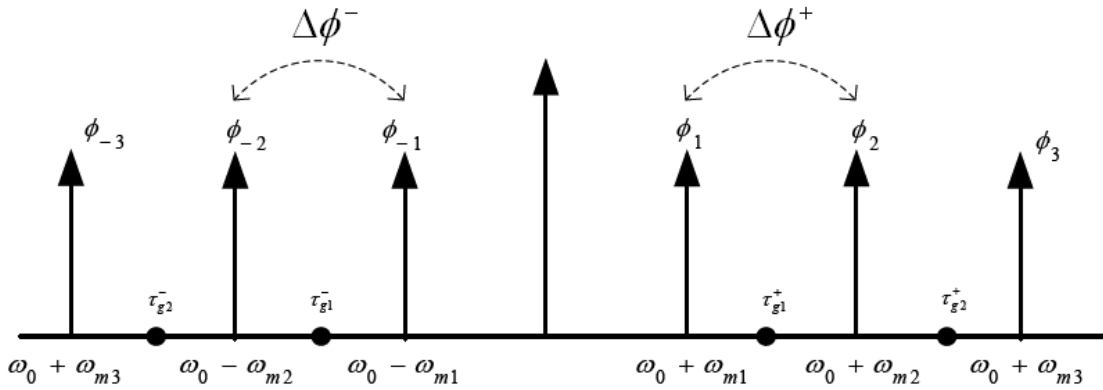


Fig. 6.3. Espectro óptico con 3 fm y 2 retardos de grupo

Banda superior:

Banda inferior:

$$\tau_{g1}^+ = -\frac{\Delta\phi^+}{\Delta\omega_m}$$

$$\tau_{g1}^- = -\frac{\Delta\phi^-}{\Delta\omega_m}$$

$$\tau_g^\pm = -\frac{\Delta\phi^\pm}{\Delta\omega_m}$$

(6.8)

donde $\Delta\omega = \omega_{m2} - \omega_{m1}$.

Finalmente, si aplicáramos el desarrollo anterior para otra frecuencias más, conseguiríamos otro retardo de grupo (τ_{g2}^+), que combinado con el τ_{g1}^+ nos permitiría obtener el valor de la dispersión del siguiente modo.

$$D(\rho s / nm) \approx \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} = \frac{\tau_{g2}^+ - \tau_{g1}^+}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

(6.9)

6.3 Análisis experimental del RF Scan

A continuación, se muestra el montaje experimental requerido para este método.

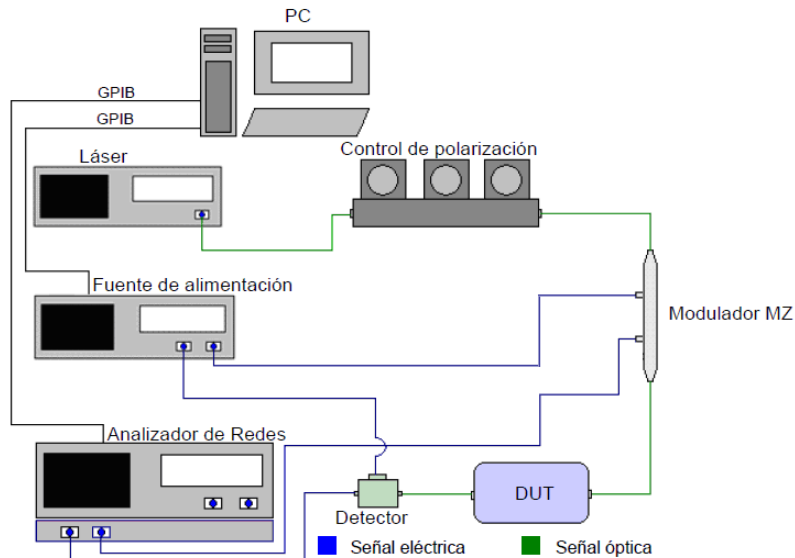


Fig. 6.4. Montaje experimental del RF Scan

El sistema sigue la misma estructura física que el método de medida descrito en el anterior capítulo, el ABCM. Como ya hemos comentado, la única diferencia radica en la forma de tratar las variables. En este caso fijamos una tensión de *bias* y realizamos un barrido en frecuencia. Es decir, a la hora de implementar el sistema experimentalmente únicamente varían los parámetros de entrada de la interfaz gráfica Fiber Test. Los campos a completar, en este caso, son la frecuencia inicial/final de barrido, la resolución por pantalla (*puntos*) y la potencia de la señal generada por el analizador de redes (ver apartado 3.1.1.4).

6.4 Implementación en Fiber Test

Al ser la primera versión de este método, hemos tenido que implementar todo su desarrollo en la interfaz gráfica Fiber Test. Su estudio teórico nos ha permitido saber cuáles son los parámetros necesarios para conseguir el valor del retardo de grupo. Como se ha visto en el apartado 6.2 el primer paso es obtener la diferencia de *bias* entre dos frecuencias en las que se produce un cero. Este procedimiento nos permite conseguir uno de los parámetros más importantes del cálculo, la suma de fases. Aprovechando el barrido en frecuencia también obtenemos las fases en los puntos en el que esas mismas frecuencias producen un máximo en amplitud. Así conseguimos el segundo término importante en la medida, la diferencia de fases. Finalmente combinando estos dos parámetros es posible obtener el valor del retardo de grupo y por lo tanto la dispersión.

A continuación se realiza el proceso de obtención de estos dos términos gráficamente.

Como muestra la matriz de la figura 6.5, durante todo el barrido de RF se toman cuatro valores: la tensión de *bias* a la que se está efectuando el barrido (V_{bias}), la frecuencia a la cual se ha producido un cero (f_z), la frecuencia a la cual se produce el máximo de amplitud (f_M) y la fase de cada f_M (ψ_{f_M}).

$$\begin{matrix}
 V_{bias_1} & f_{z_1} & f_{M_1} & \psi_{f_{M_1}} \\
 V_{bias_2} & f_{z_2} & f_{M_2} & \psi_{f_{M_2}} \\
 V_{bias_3} & f_{z_3} & f_{M_3} & \psi_{f_{M_3}} \\
 V_{bias_4} & f_{z_4} & f_{M_4} & \psi_{f_{M_4}} \\
 V_{bias_5} & f_{z_5} & f_{M_5} & \psi_{f_{M_5}} \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
 V_{bias_n} & f_{z_n} & f_{M_n} & \psi_{f_{M_n}}
 \end{matrix}$$

Fig. 6.5. Matriz generada en Fiber Test

Una vez cargados todos los datos en la matriz, se eligen tres frecuencias f_1 , f_2 y f_3 , que nos permiten calcular el retardo de grupo realizando los siguientes pasos:

PASO 1: localizar para que tensión de *bias* y para que frecuencia se ha producido un cero en amplitud.

V_{bias_1}	f_{z_1}	f_{M_1}	V_{bias_1}	f_{z_1}	f_{M_1}	V_{bias_1}	f_{z_1}	f_{M_1}
V_{bias_2}	f_{z_2}	f_{M_2}	V_{bias_2}	f_{z_2}	f_{M_2}	V_{bias_2}	f_{z_2}	f_{M_2}
V_{bias_3}	f_{z_3}	f_{M_3}	V_{bias_3}	f_{z_3}	f_{M_3}	V_{bias_3}	f_{z_3}	f_{M_3}
V_{bias_4}	f_{z_4}	f_{M_4}	V_{bias_4}	f_{z_4}	f_{M_4}	V_{bias_4}	f_{z_4}	f_{M_4}
V_{bias_5}	f_{z_5}	f_{M_5}	V_{bias_5}	f_{z_5}	f_{M_5}	V_{bias_5}	f_{z_5}	f_{M_5}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
V_{bias_n}	f_{z_n}	f_{M_n}	V_{bias_n}	f_{z_n}	f_{M_n}	V_{bias_n}	f_{z_n}	f_{M_n}
Fig. 6.6. Frecuencia 1			Fig. 6.7. Frecuencia 2			Fig. 6.8. Frecuencia 3		

Si observamos gráficamente el recorrido que efectúa el cero para diferentes *bias* obtenemos la gráfica siguiente.

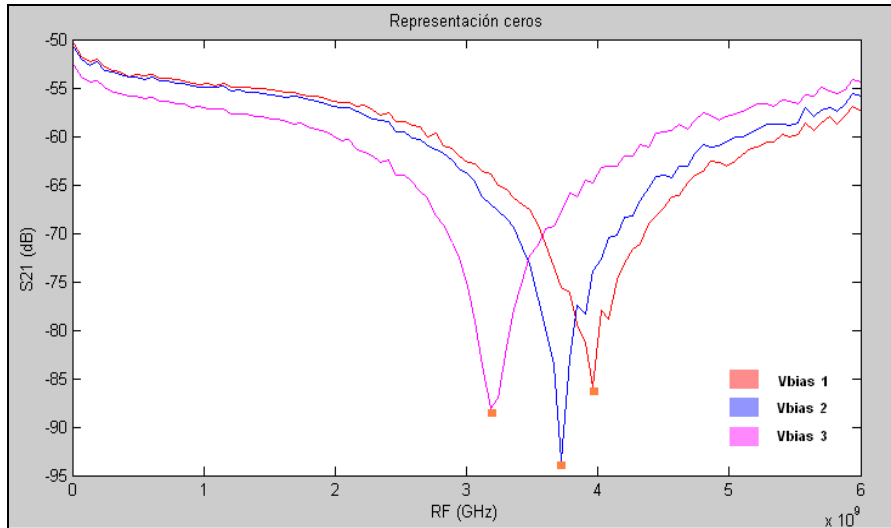


Fig. 6.9. Representación de los ceros en frecuencia

Como se muestra en la figura 6.9 el cero en amplitud se desplaza hacia la izquierda a medida que cambia el valor de la tensión de *bias*, esto es debido a que estamos introduciendo por ramas diferentes del modulador la tensión de *bias* y la tensión de RF. La idea es captar cada uno de estos *bias* para posteriormente hallar la diferencia entre ellos y poder obtener el parámetro suma de fases.

PASO 2: localizar cuando se produce un máximo en amplitud para las frecuencias anteriores, f_{z_1} , f_{z_2} y f_{z_3} .

Es importante recordar que f_{M_1} , f_{M_2} y f_{M_3} corresponden a f_{z_1} , f_{z_2} y f_{z_3} en el momento que el valor del *bias* hace que en ellas se produzca un máximo en vez de un mínimo ($f_{M_1} = f_{z_1}$, $f_{M_2} = f_{z_2}$, $f_{M_3} = f_{z_3}$).

V_{bias_1}	
f_{z_1}	f_{M_1}
f_{z_2}	f_{M_2}
f_{z_3}	f_{M_3}
f_{z_4}	f_{M_4}
f_{z_5}	f_{M_5}
\vdots	\vdots
f_{z_n}	f_{M_n}

Fig. 6.10. Frecuencia 1

V_{bias_2}	
f_{z_1}	f_{M_1}
f_{z_2}	f_{M_2}
f_{z_3}	f_{M_3}
f_{z_4}	f_{M_4}
f_{z_5}	f_{M_5}
\vdots	\vdots
f_{z_n}	f_{M_n}

Fig. 6.11. Frecuencia 2

V_{bias_3}	
f_{z_1}	f_{M_1}
f_{z_2}	f_{M_2}
f_{z_3}	f_{M_3}
f_{z_4}	f_{M_4}
f_{z_5}	f_{M_5}
\vdots	\vdots
f_{z_n}	f_{M_n}

Fig. 6.12. Frecuencia 3

Para efectuar el proceso de localización de máximos, debemos conseguir el valor de amplitud mayor correspondiente a las frecuencias comentadas anteriormente. Esto se puede ver gráficamente en la figura 6.13.

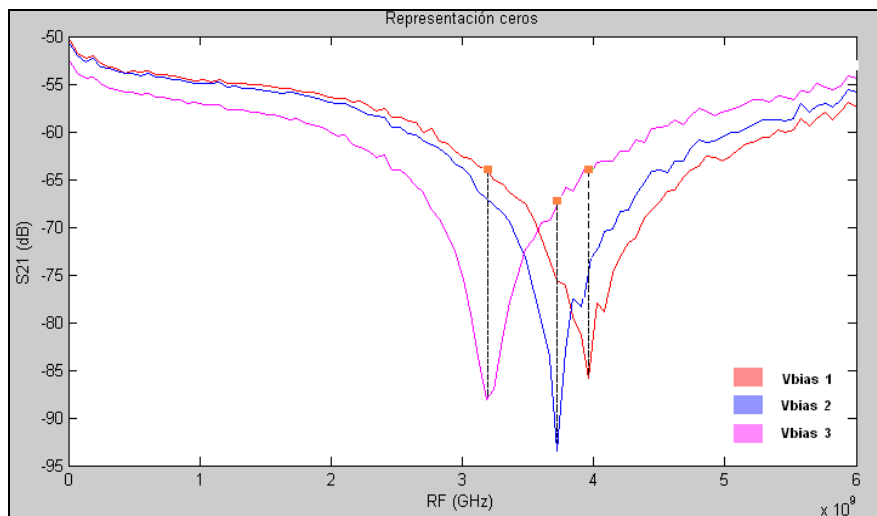


Fig. 6.13. Representación de los máximos en frecuencia

PASO 3: obtener las fases en los puntos en el que las frecuencias f_{M_1} , f_{M_2} y f_{M_3} producen un máximo en amplitud. Este dato es importante ya que nos permite obtener el parámetro diferencia de fases.

V_{bias_1}	V_{bias_2}	V_{bias_3}
f_{z_1} f_{M_1} $\Psi_{f_{M_1}}$	f_{z_1} f_{M_1} $\Psi_{f_{M_1}}$	f_{z_1} f_{M_1} $\Psi_{f_{M_1}}$
f_{z_2} f_{M_2} $\Psi_{f_{M_2}}$	f_{z_2} f_{M_2} $\Psi_{f_{M_2}}$	f_{z_2} f_{M_2} $\Psi_{f_{M_2}}$
f_{z_3} f_{M_3} $\Psi_{f_{M_3}}$	f_{z_3} f_{M_3} $\Psi_{f_{M_3}}$	f_{z_3} f_{M_3} $\Psi_{f_{M_3}}$
f_{z_4} f_{M_4} $\Psi_{f_{M_4}}$	f_{z_4} f_{M_4} $\Psi_{f_{M_4}}$	f_{z_4} f_{M_4} $\Psi_{f_{M_4}}$
f_{z_5} f_{M_5} $\Psi_{f_{M_5}}$	f_{z_5} f_{M_5} $\Psi_{f_{M_5}}$	f_{z_5} f_{M_5} $\Psi_{f_{M_5}}$
\vdots \vdots \vdots	\vdots \vdots \vdots	\vdots \vdots \vdots
f_{z_n} f_{M_n} $\Psi_{f_{M_n}}$	f_{z_n} f_{M_n} $\Psi_{f_{M_n}}$	f_{z_n} f_{M_n} $\Psi_{f_{M_n}}$

Fig. 6.14 Frecuencia 1

Fig. 6.15. Frecuencia 2

Fig. 6.16. Frecuencia 3

PASO 4: obtener el retado de grupo que nos permite calcular la dispersión a partir de los datos conseguidos en el desarrollo anterior.

En la siguiente matriz se muestra la relación entre cada uno de los datos obtenidos.

$$\begin{aligned} f_{z_1} & \Sigma \phi_1(V_{bias_1}) \quad \Delta \phi_1(V_{bias_3}, \psi_{f_{M_1}}) \\ f_{z_2} & \Sigma \phi_2(V_{bias_2}) \quad \Delta \phi_2(V_{bias_3}, \psi_{f_{M_2}}) \\ f_{z_3} & \Sigma \phi_3(V_{bias_3}) \quad \Delta \phi_3(V_{bias_1}, \psi_{f_{M_3}}) \end{aligned}$$

Las medidas necesarias para este método, es decir, el parámetro suma de fases y diferencia de fases dependen directamente de la frecuencia de modulación. Cuanto más alta sea ésta, mayores serán los términos a medir y por tanto mejor precisión obtendremos en los resultados. Para asegurarnos de que esto se cumple y no se provocan errores, asumimos que se empiezan a tomar medidas a partir de los 10 MHz, dejando así una **zona ciega** en la cual no se obtienen datos.

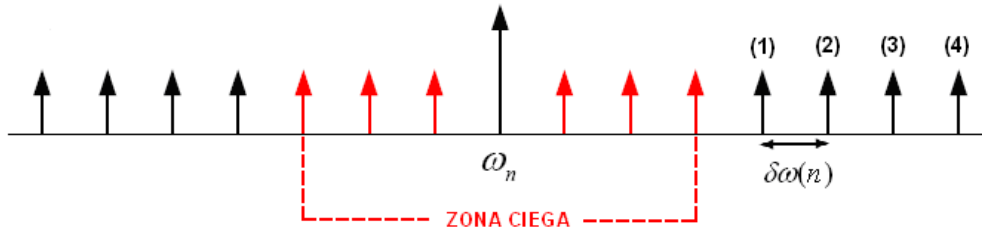


Fig. 6.17. Representación del barrido

Una vez determinado el rango de medida, realizamos el estudio previo que nos permite obtener los valores de $\Delta\phi_1^+$ y $\Delta\phi_2^+$.

<p><i>Formula general $\Delta\theta_b$:</i></p> $\Delta\theta_b = \theta_{bz_2} - \theta_{bz_1} = (\phi_2 + \phi_{-2}) + (-\phi_1 - \phi_{-1})$ <p style="text-align: right;">(6.10)</p>	<p><i>Formula general $\Delta\psi_e$:</i></p> $\Delta\psi_e = \Delta\psi_2 - \Delta\psi_1 = \frac{(\phi_2 - \phi_{-2})}{2} - \frac{(\phi_1 - \phi_{-1})}{2}$ <p style="text-align: right;">(6.11)</p>
---	--

Utilizando la expresión 4.1, explicada en el capítulo 4, podemos definir:

$$\theta_{bz_1} = \frac{\pi}{V_\pi} V_{bias_1} \qquad \theta_{bz_2} = \frac{\pi}{V_\pi} V_{bias_2} \qquad \theta_{bz_3} = \frac{\pi}{V_\pi} V_{bias_3} \qquad \text{(6.12)}$$

Particularizando para las tres frecuencias seleccionadas en el ejemplo, obtenemos:

Fórmulas para f_1 y f_2
$\Delta\theta_{b_1} = \theta_{bz_2} - \theta_{bz_1} = (\phi_2 + \phi_{-2}) + (-\phi_1 - \phi_{-1})$
$\Delta\psi_{e_1} = \Delta\psi_{f_{M_2}} - \Delta\psi_{f_{M_1}} = \frac{(\phi_2 - \phi_{-2})}{2} - \frac{(\phi_1 - \phi_{-1})}{2}$

(6.13)

Fórmulas para f_2 y f_3
$\Delta\theta_{b_2} = \theta_{b_{z3}} - \theta_{b_{z2}} = (\phi_3 + \phi_{-3}) + (-\phi_2 - \phi_{-2})$
$\Delta\psi_{e_2} = \Delta\psi_{f_{M3}} - \Delta\psi_{f_{M2}} = \frac{\phi_3 - \phi_{-3}}{2} - \frac{\phi_2 - \phi_{-2}}{2}$

(6.14)

Calculamos los valores de $\Delta\phi_1^+$ y $\Delta\phi_2^+$ según la expresión 6.6.

$$\Delta\phi_1^+ = \frac{(\phi_2 - \phi_{-2})}{2} - \frac{(\phi_1 - \phi_{-1})}{2} + \frac{(\phi_2 + \phi_{-2}) + (-\phi_1 - \phi_{-1})}{2} = \phi_2 - \phi_1 = \Delta\psi_{f_{M2}} - \Delta\psi_{f_{M1}} + \frac{\Delta\theta_{b_1}}{2}$$

(6.15)

$$\Delta\phi_2^+ = \frac{(\phi_3 - \phi_{-3})}{2} - \frac{(\phi_2 - \phi_{-2})}{2} + \frac{(\phi_3 + \phi_{-3}) + (-\phi_2 - \phi_{-2})}{2} = \phi_3 - \phi_2 = \Delta\psi_{f_{M3}} - \Delta\psi_{f_{M2}} + \frac{\Delta\theta_{b_2}}{2}$$

(6.16)

Utilizamos las expresiones obtenidas en las formulas 6.15 y 6.16 para calcular el retardo de grupo correspondiente en cada caso:

$$\tau_{g1}^+ = -\frac{\Delta\phi_1^+}{\Delta\omega_m} \quad \tau_{g2}^+ = -\frac{\Delta\phi_2^+}{\Delta\omega_m}$$

(6.17)

Finalmente, a partir de los dos retardos conseguidos y la diferencia de longitudes de onda, obtenemos el parámetro de la dispersión (ps/pm).

$$D = \frac{\Delta\tau_g}{\Delta\lambda} = \frac{\tau_{g2}^+ - \tau_{g1}^+}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

(6.18)

6.4.1 Recorrido de potencias

Como se ha justificado en el apartado 4.7.2, es conveniente realizar un recorrido de potencias antes de efectuar la medida.

A continuación, se muestra el correspondiente para el montaje experimental del RF Scan.

Realizado para la medida sin DUT y una potencia óptica de 6.9 dBm

Etapas	P_{in}	Pérdidas	P_{out}
Polarizador	6.9 dBm	0.4 dB	6.5 dBm
Modulador	6.5 dBm	11.75 dB	-5.25 dBm
Fibra intermedia	-5.25 dBm	0.3 dB	-5.55 dBm

Tabla 6.1. Recorrido de potencias sin DUT

Realizado para la medida con DUT y una potencia óptica de 6.9 dBm

Etapas	P_{in}	Pérdidas	P_{out}
Polarizador	6.9 dBm	0.4 dB	6.5 dBm
Modulador	6.5 dBm	11.75 dB	-5.25 dBm
Fibra intermedia	-5.25 dBm	0.3 dB	-5.55 dBm
DUT (DCF)	-5.55 dBm	-9.73 dB	-14.98 dBm

Tabla 6.2. Recorrido de potencias con DUT

6.4.2 Resultados obtenidos con la DCF

Siguiendo el desarrollo explicado en el apartado 6.4, a continuación se realizan las medidas experimentales con la DCF. Los parámetros introducidos en la interfaz gráfica Fiber Test son los siguientes:

- Potencia analizador de redes: 0 dBm
- Frecuencia inicial de barrido: 10 MHz
- Frecuencia final de barrido: 6 GHz
- Puntos (resolución NA): 101
- Sweep time: 2 s
- V_{bias} inicial: 4.05 V
- V_{bias} final: 6.75 V
- Resolución: 150 mV
- λ : 1559 nm
- V_{pi}: 4 V

Se han tomado medidas considerando tres frecuencias distintas ya que la dispersión se obtiene a partir de dos retardos de grupo y a su vez, cada uno de estos retardos de grupo debe obtenerse a partir de dos frecuencias distintas. Considerando esto, en primer lugar, obtenemos los valores de frecuencia y tensión de *bias* dónde se está produciendo un cero.

	V_{bias} (V)	f_z (GHz)
(1)	4.50	4.913865
(2)	5.25	3.910540
(3)	5.70	2.911408

Tabla 6.3. Datos obtenidos para V_{bias} y f_z

Gráficamente lo podemos observar en la siguiente figura.

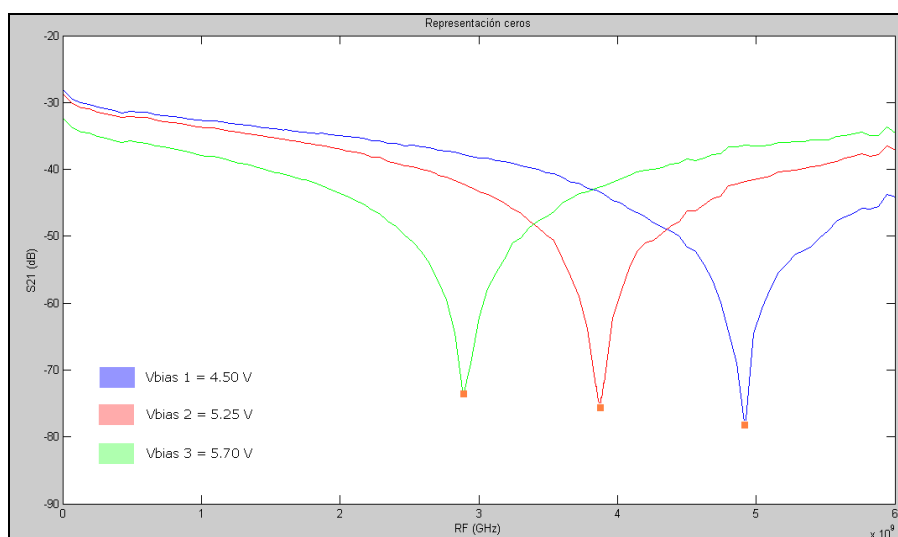


Fig. 6.18. Representación de ceros

Como vemos en la figura 6.18 encontramos ceros a las frecuencias 4.913865 GHz, 3.910540 GHz y 2.911408 GHz.

En segundo lugar, obtenemos las fases en los momentos en que en las frecuencias encontradas anteriormente ahora se está produciendo un máximo.

	V_{bias} (V)	f_z (GHz)	$\Delta\psi$ ($^\circ$)
(1)	4.50	4.913865	22.89
(2)	5.25	3.910540	-45.89
(3)	5.70	2.911408	-103.53

Tabla 6.4. Datos obtenidos para $\Delta\psi$

A continuación se muestra la gráfica correspondiente a los máximos encontrados.

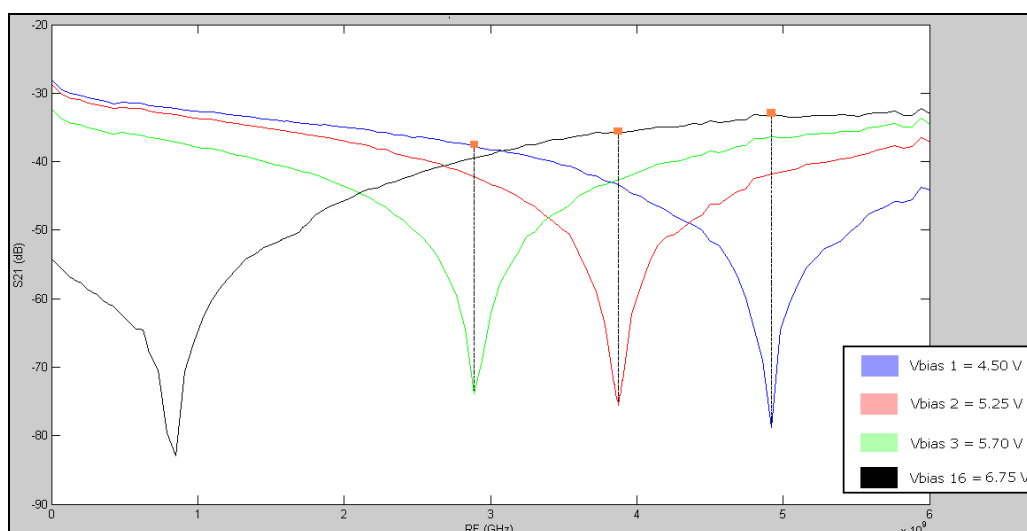


Fig. 6.19. Representación de máximos

Como se puede ver en la figura 6.19 en el momento que la tensión de *bias* hace que el valor de amplitud sea máximo medimos su fase correspondiente. En el primero caso ($V_{bias\ 1}$) se mide la fase cuando el barrido de tensión de *bias* ha llegado al $V_{bias\ 16}$ ya que en ese momento es cuando mayor amplitud toma la señal. Para el caso 2 ($V_{bias\ 2}$) ocurre exactamente lo mismo, el valor de la fase se mide cuando el V_{bias} se corresponde con el $V_{bias\ 16}$. Por último, para el $V_{bias\ 3}$ el máximo en amplitud se produce cuando la tensión de *bias* vale 4.50 V, es decir, cuando el barrido se encuentra en el $V_{bias\ 1}$.

Una vez encontradas las fases que nos permitirán obtener el parámetro diferencia de fases ($\Delta\phi$) sólo nos queda por conseguir la suma de fases ($\Sigma\phi$) para tener todos los datos necesarios para el cálculo de la dispersión.

Siguiendo la expresión 6.12 encontramos los valores concretos de $\Sigma\Phi$ para cada uno de los casos.

$$\Sigma\phi_1 = \frac{180^\circ}{4} \cdot 4.50 = 202.5^\circ \quad \Sigma\phi_2 = \frac{180^\circ}{4} \cdot 5.25 = 236.25^\circ \quad \Sigma\phi_3 = \frac{180^\circ}{4} \cdot 5.75 = 256.5^\circ$$

	V_{bias} (V)	f_z (GHz)	$\Delta\psi$ (°)	$\Sigma\Phi$ (°)
(1)	4.50	4.913865	22.89	202.5
(2)	5.25	3.910540	-45.89	236.25
(3)	5.70	2.911408	-103.53	256.5

Tabla 6.5. Datos obtenidos para $\Sigma\Phi$

Por último, con la tabla de datos completada, ya podemos realizar el cálculo de $\Delta\phi_{1-2}^+$ y $\Delta\phi_{2-3}^+$.

$$\Delta\phi_{1-2}^+ = (-45.89 - 22.89) + \frac{236.25 - 202.5}{2} = -51.905^\circ$$

$$\Delta\phi_{2-3}^+ = (-103.53 + 45.89) + \frac{256.5 - 236.25}{2} = -47.52^\circ$$

Con estos datos de las diferencias de fase ópticas, obtenemos el valor del retardo de grupo para cada uno de los casos (ver expresión 6.8).

$$\tau_{g1}^+ = -\frac{-51.905}{360 \cdot (1.003 \cdot 10^9)} = 143.74 ps$$

$$\tau_{g2}^+ = -\frac{-47.52}{360 \cdot (0.999 \cdot 10^9)} = 133.33 ps$$

Finalmente, aplicando la relación en tercera ventana de $125\text{MHz} \leftrightarrow 1\text{pm}$, se obtiene la diferencia de longitudes de onda como 8pm para 1GHz, correspondiente a la diferencia entre frecuencias. Con este valor, y considerando los resultados obtenidos anteriormente, ya podemos realizar el cálculo de la dispersión:

$$D = \frac{\tau_{g2} - \tau_{g1}}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{133.33 - 143.74}{8} = -1.30125 \text{ ps/pm} = -1301.25 \text{ ps/nm}$$

Si comparamos los valores obtenidos con el valor nominal de la dispersión, obtenemos la tabla siguiente.

	<i>Banda superior</i>
Valor medido	-1301.25ps/nm
Valor nominal	-1362 ps/nm
Error de medida	60.75 ps/nm

Tabla 6.6. Cálculo del error de medida

En este caso el error es mayor pero de igual manera que en los casos anteriores puede considerarse razonable. Hay que tener en cuenta que esta implementación del método es una prueba preliminar que ha servido para comprobar que es una técnica viable mediante la cual se pueden lograr valores de dispersión cercanos al valor nominal. En el futuro se deberá mejorar y optimizar todo el proceso propuesto para conseguir resultados todavía más óptimos.

Cabe destacar que una de las mejoras que perseguía este método era reducir el tiempo de ejecución de la medida. Una vez efectuado el análisis experimental, podemos asegurar que esta nueva técnica cumple este objetivo. Concretamente, se ha reducido el tiempo en unas 2.30h. Si recordamos, el ABCM tardaba en efectuar la medida aproximadamente 3h, con este nuevo método se ha reducido a 30min.

6.4.3 Problemas experimentales

Uno de los problemas con los que nos hemos encontrado a la hora de implementar el método experimentalmente ha sido la *lentitud de la respuesta del detector*. El barrido en RF fuerza que los cambios de frecuencia se produzcan demasiado rápido, sin dar tiempo al detector a asumir la variación. Este problema no nos permite observar ningún cero de amplitud y por lo tanto imposibilita de todas las maneras el cálculo de la dispersión.

El resultado obtenido considerando este inconveniente se muestra en la siguiente figura.

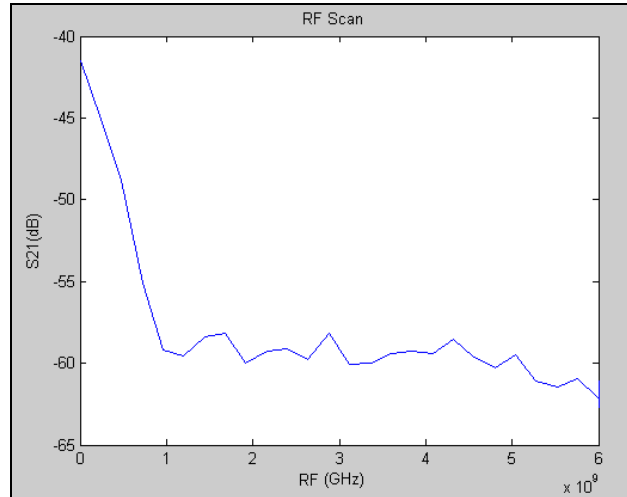


Fig. 6.20. Medida incorrecta del RF Scan

Para solventar esta dificultad se ha programado el analizador de redes para que trabaje con un **sweep time** de **2s** y una **resolución** de **101 puntos** por pantalla. Es importante considerar que si el valor del **sweep time** es demasiado rápido se mide la potencia de salida de los filtros del ancho de banda de resolución cuando su salida es todavía transitoria siendo, por tanto, incorrecta la medida. Si es demasiado lenta, a menos que la persistencia de pantalla sea alta, podrían perderse medidas antes de finalizar el barrido.

Existen otras posibles soluciones más para disminuir la gravedad de este problema. Una de ellas sería utilizar un analizador de redes que lleve incorporado el detector (Lightwave Component Analyzer), de esta manera los dos dispositivos están ya preparados para trabajar juntos y por tanto comparten la misma calibración.

Cambiando el valor del **sweep time** a 2s se obtiene la siguiente gráfica.

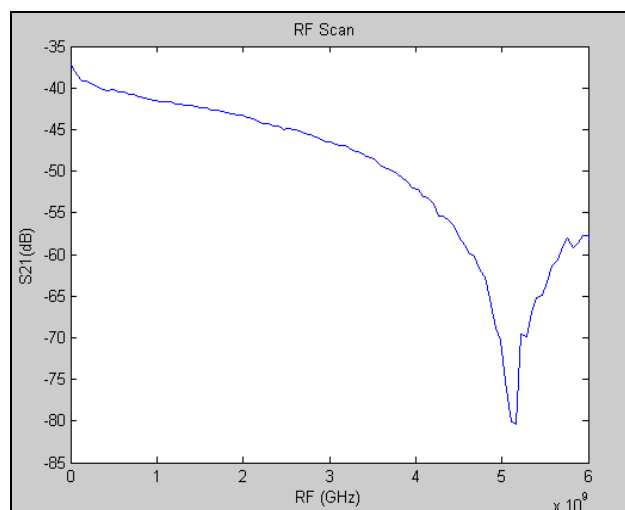


Fig. 6.21. Medida correcta del RF Scan

Comparando las dos gráficas vemos claramente la importancia de considerar el efecto del detector. En la gráfica 6.20 prácticamente no podemos ni observar el comportamiento que está tomando la señal y por tanto mucho menos el valor de los ceros. En cambio en la figura 6.21 se ve claramente que la señal se anula para un valor de frecuencia de aproximadamente de 5.15 GHz.

Es importante conocer muy bien las características de cada uno de los dispositivos del banco de pruebas, conocer sus limitaciones nos permitirá evitar este tipo de errores en la medida.

CONCLUSIONES Y LINEAS DE FUTURO

En este proyecto se han evaluado diferentes posibilidades para caracterizar el fenómeno de la dispersión cromática. Mediante el uso de la interfaz gráfica Fiber Test se han propuesto tres métodos de medida de dispersión, el *Modulation Phase Shift Method* (MPSM), el *Asymmetric Bias Controlled Method* (ABCM) y el RF Scan.

Se ha realizado un análisis teórico que en todos los casos ha partido de la expresión genérica del campo a la salida del modulador Mach Zehnder. Esta expresión permite analizar cualquier tipo de configuración en que se pueda utilizar este modulador. Concretamente, en este TFC se ha utilizado esta expresión para el análisis de las configuraciones *push-pull* y *asimétrica*, bajo la aproximación *small-signal*.

El análisis ha permitido estudiar las características básicas de los métodos convencionales basados en configuración *push-pull* como el MPSM y el método de Peucheret y en configuración *asimétrica* para los nuevos métodos, el ABCM y el RF Scan.

Una vez estudiado el concepto general de las técnicas propuestas hemos efectuado su comprobación realizando las medidas experimentales mediante el programa Fiber Test. Los resultados obtenidos en cada caso han permitido detectar las limitaciones de cada método y en consecuencia han permitido introducir mejoras que evitaran esas restricciones.

Por lo que se refiere a los métodos de medida básicos, *el MPSM y el método de Peucheret*, se ha probado que son métodos de medida sencillos y fáciles de implementar pero que presentan algunos inconvenientes.

En el caso del MPSM, se ha comprobado que sufre una dependencia indeseada entre los valores de la frecuencia moduladora y los saltos de longitud de onda. Nos interesa que los valores de la frecuencia sean lo suficientemente bajos como para que se cumpla las aproximaciones del retardo de grupo y de la dispersión pero al mismo tiempo nos interesan que sean suficientemente altos ya que la magnitud medida y por tanto sujeta al error experimental es la fase eléctrica. Además, el barrido óptico que se necesita para implementarlo hace que aparezcan algunas imprecisiones en la medida provocadas por la inexactitud de los saltos efectuados por el láser.

En el método de Peucheret, en cambio, el principal problema es que los ceros aparecen a frecuencias muy separadas lo que implica perder mucha resolución y tener que usar frecuencias moduladoras a valores que podrían ser demasiado elevados para nuestro banco de medidas.

No obstante, a pesar de sus inconvenientes la idea argumentada en cada una de las técnicas anteriores ha sido la base de los nuevos métodos de medida presentados. Por tanto, es importante comprender el funcionamiento de estos

dos métodos para realizar una correcta interpretación de las nuevas técnicas, el ABCM y el RF Scan.

El ABCM, es una mejora del método de Peucheret y por tanto la idea básica sigue siendo encontrar los puntos en los cuales la señal detectada se ha anulado. La diferencia básica está en que al usar una configuración *asimétrica* del modulador, en la aproximación *small-signal* sobre la que se ha trabajado, el nivel de *bias* aplicado al modulador permite aplicar una diferencia de fase adicional entre bandas que se une a la introducida por el DUT para provocar ceros de envolvente a la frecuencia moduladora que se desee utilizar en cada caso. El problema que aparece es que al efectuar un barrido en *bias* se ralentiza mucho el proceso de medida, cada salto de *bias* necesita mucho tiempo para efectuarse. Además, debido a esta lentitud aparece el fenómeno *bias drift* que provoca un mal funcionamiento del modulador electro-óptico. Esto obliga a calcular el punto de trabajo constantemente para hacer la medida de acuerdo al nuevo valor.

Con la idea de encontrar una técnica de medida más rápida y precisa, se han unido las mejores características de cada uno de los métodos comentados anteriormente. Esta combinación ha sido denominada RF Scan. En este caso, también se mantiene la idea de buscar ceros pero se cambia el proceso de medida de manera que se realice un barrido en frecuencia para cada valor de *bias*. Este cambio implica la reducción considerable del tiempo de ejecución (de 3h utilizando el ABCM a 30 min utilizando el RF Scan).

A nivel experimental se ha visto que en este método el tiempo de respuesta del detector es crítico para obtener buenos resultados. Es conveniente utilizar un detector rápido que nos permita obtener la respuesta instantáneamente, siguiendo la rapidez del barrido en frecuencia. Como solución óptima, sería idóneo utilizar un analizador de redes que lleve ya incluido el detector. Esto implicaría que los dos dispositivos están preparados para trabajar juntos y por lo tanto las prestaciones de uno están adaptadas a las del otro.

Por lo que se refiere a la interfaz gráfica Fiber Test, se ha optimizado y mejorado tanto en su diseño visual como en su estructura interna. En el primer prototipo la aplicación nos permitía realizar únicamente dos procesos de medida: la Función de Transferencia y el método MPSM. Con el objetivo de conseguir un programa más completo y fácil de utilizar en futuros estudios prácticos, se han incluido los dos nuevos métodos de medida estudiados, el ABCM y el RF Scan.

Además la estructura de menús no era muy amigable ni operativa, lo que dificultaba bastante la interacción con el usuario. En este TFC se ha reestructurado la jerarquía de menús ofreciendo un nuevo formato modular más amigable y flexible que permite ofrecer nuevas opciones e incorporar nuevos métodos de manera sencilla y eficaz.

Es importante destacar también que otra de las actualizaciones que se han llevado a cabo es la traducción de la interfaz. Actualmente está implementada

en inglés ya que creemos que en programas de este tipo es conveniente utilizar el idioma internacional.

En cuanto a líneas de futuro, proponemos mejorar el método RF Scan incluyéndole un barrido óptico. Dadas las limitaciones de los instrumentos de nuestro banco de medidas (frecuencia moduladora máxima 6 GHz), el máximo margen frecuencial que puede cubrirse mediante el RF Scan es del orden de 96 pm. Se propone entonces combinar barridos ópticos con eléctricos al objeto de cubrir márgenes frecuenciales mayores.

Los resultados de este TFC han permitido validar las ideas básicas del RF Scan y demostrar que es capaz de aproximar correctamente el valor de la dispersión. A partir de aquí se propone optimizar las medidas y automatizarlas para mejorar la opción de medida en la interfaz gráfica Fiber Test.

Tras la optimización de los algoritmos nos hemos dado cuenta que en prácticamente todos los métodos, y más en el ABCM, la función de transferencia del modulador juega un papel fundamental ya que sufre de variaciones importantes que afectan a las medidas. Consideramos conveniente que el programa permita automáticamente actualizar de forma rápida y sencilla los valores del nivel de polarización necesarios en el modulador en cada método de medida.

REFERENCIAS

- [1] **Libro:** España Boquera, M.C., “Propagación de señales en las fibras ópticas”, Cap. 1 en *Comunicaciones ópticas*, pp. 2-9, Díaz de Santos S.A., Madrid, 2005.
- [2] **Proyecto:** Ferrer Picon, X. y Moral Cerezo, F., *Diseño y puesta en marcha de un banco de medidas de dispersión a frecuencias ópticas*, TFC-UPC, (2009).
- [3] **Manual:** Hewlett Packard, *Programmer’s Guide HP8753D Network Analyzer*, 1997
- [4] **Artículo:** Weisstein, E. W., “Jacobi- Anger Expansion”
http://en.wikipedia.org/wiki/Jacobi-Anger_expansion
- [5] **Proyecto:** Carnero Tresseras, A. y Marti Sarri, A., *Mesures de dispersió cromàtica a freqüències òptiques amb detecció de segon harmònic*, TFC-UPC (2009).
- [6] **Artículo de revista:** Santos, M.C., De Bernardo-Rodi, S.P. and Mitre-Gutiérrez, M.A., “New Modulation Zero-Shift Method to Characterize Fast Group Delay Ripple of Dispersion-Compensating Fiber Bragg Gratings”, *IEEE Photonics Technology Letters*, 1298-1300, Vol. 19, N. 17, 2007.
- [7] **Proyecto:** Romero Vidal, C.M., y Garcia Villar, E., *Técnicas avanzadas de medida de dispersión cromática a frecuencias ópticas*, TFC-UPC, (2009).
- [8] **Proyecto:** De Benardo Rodi, S.P., *Group Delay Measures at optical frequencies standard MPSM and MZSM. Theoretical analysis and numerical simulations*, PFC – UPC, (2007).
- [9] **Manual:** The Math Works, Inc., *Creating Graphical User Interfaces*, MathWorks, (00 – 09).
- [10] **Manual:** Barragán Guerrero, D.O., *Manual de Interfaz Gráfica de usuario en Matlab*, 2008



**Escola Politècnica Superior
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ANEXOS

TÍTULO DEL TFC/PFC: Optimización de técnicas de medida de dispersión cromática a frecuencias ópticas

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicación especialidad en Sistemas de Telecomunicación

**AUTORES: Marina Moreno Ramos
Marta Vázquez Núñez**

DIRECTOR: Concepción Santos Blanco

FECHA: 13 de julio de 2010

ANEXO I: CÓDIGO EN MATLAB

Programa de la Función de Transferencia

Este programa nos permite obtener la función de transferencia del modulador, controlando la fuente de alimentación programable y el multímetro óptico:

```
% Esta función grafica la función de transferencia de un modulador
% óptico.
% Se sirve del HP8153A como medidor de potencia y del AG34970A como
% fuente de tensión de bias.
function Ejecutar_Callback(hObject, eventdata, handles)

clc
clear all

data=guidata(gcbo);
vstart = str2double(get(data.VbiasIn, 'String'));
if isnan(vstart)
    errordlg('The value must be numeric', 'ERROR')
    set(handles.VbiasIn, 'String', 0);
    vstart=0;
end

vstop=str2double(get(data.VbiasFi, 'String'));
if isnan(vstop)
    errordlg('The value must be numeric', 'ERROR')
    set(handles.VbiasFi, 'String', 0);
    vstop=0;
end

vpaso=str2double(get(data.Resolucion, 'String'));
if isnan(vpaso)
    errordlg('The value must be numeric', 'ERROR')
    set(handles.Resolucion, 'String', 0);
    vpaso=0;
end

%Creamos un fichero para guardar los datos
[fitxer,path]=uiputfile('* .dat', 'Save');

if isequal(fitxer,0)
    return
else
    fitxer=sprintf('%s%s', path, fitxer);
    fi=fopen(fitxer, 'wt');
    msgbox('Running...', 'Application');
end

%Creamos un contador para el vector de datos adquiridos
j=1;
k=1;
maximo=0;
minimo=2000;
vpaso=vpaso*1e-3;
```

```

%Bucle de adquisición de datos
for i=vstart:vpaso:vstop

    s1=serial('COM1');

    fopen(s1);

    v=i;

    fprintf(s1, 'CHAN1:VOLT %g ;CURR 1.0',v);
    pause(2)
    fprintf(s1, '*VOLT?');
    voltage = fscanf(s1);

    fclose(s1);
    delete(s1);
    clear s1;

    pause(5)
    potencia = HP8153A_pow1; % Medición de potencia en (W)
    potencia = potencia*1e3; % Medición de potencia en (µW)
    potencial=10*log10(potencia/1e3); %Medición de potencia en dBm
    pot(j) = potencia;
    pot1(k)=potencial;
    j=j+1;
    k=k+1;

    if(maximo<potencia)
        maximo=potencia;
        pos1=i;
    elseif(minimo>potencia)
        minimo=potencia;
        pos2=i;
    else
        maximo=maximo;
        minimo=minimo;
    end

end

set(data.Ejecutar,'UserData',pot1)

ER=(maximo/minimo);
ER2=10*log10(ER);
Vpi=(pos2-pos1);
QP=(Vpi/2);

%En el vector "pot" y "pot1" tenemos las medidas
%Se grafica las función de transferencia del Modulador en uW y dBm

vbias=[vstart:vpaso:vstop];

figure(1)
plot(vbias,pot)
title('Transfer Function uW');
zoom on
ylabel('Pout (uW)');
xlabel('Vbias (V)');
figure(2)

```

```

plot(vbias,pot1)
title('Transfer Function dBm');
zoom on
ylabel('Pout (dBm)');
xlabel('Vbias (V)');

%Se escriben en el fichero el rango de tensiones y el paso para el
voltaje de bias

fprintf(fi, 'Initial_Vbias (V):\t%g',vstart);
fprintf(fi, '\nFinal_Vbias (V):\t%g',vstop);
fprintf(fi, '\nResolution (V):\t%g',vpaso);
fprintf(fi, '\nER (dB):\t%g',ER2);
fprintf(fi, '\nVpi (V):\t%g',Vpi);
fprintf(fi, '\nQP (V):\t%g',QP);

fprintf(fi, '\n\n\t\t\tVbias (V) \tPout (µW) \tVbias (V) \tPout (dBm) \n');

tamano=length(vbias);
for h=1:tamano
    fprintf(fi, '\t\t\t%g\t\t',vbias(h));
    fprintf(fi, '%7.3f',pot(h));
    fprintf(fi, '\t\t\t%g\t\t',vbias(h));
    fprintf(fi, '%7.3f\n',pot1(h));
end

st=fclose(fi);
msgbox('Finalized','Application');

% Esta función entrega la potencia del multímetro HP8153A en Watts
function[Potencia]=HP8153A_pow1()
    %global HP8153A_pow1;

% Se crea un objeto gpib
multimeter=gpib('ni', 0, 22);

% Se abre el objeto
fopen(multimeter);

% Se pide la identificación del instrumento
fprintf(multimeter, '*idn?');
instrument=fscanf(multimeter);

%Se toman tres mediciones de potencia y se promedian
fprintf(multimeter, 'READ:pow?')
Potencia1=fscanf(multimeter, '%g');
    %Pasamos la medida de dbm a mW:
    PmW1=10^(Potencia1/10);

fprintf(multimeter, 'READ:pow?')
Potencia2=fscanf(multimeter, '%g');
    %Pasamos la medida de dbm a mW:
    PmW2=10^(Potencia2/10);

fprintf(multimeter, 'READ:pow?')
Potencia3=fscanf(multimeter, '%g');
    %Pasamos la medida de dbm a mW:
    PmW3=10^(Potencia3/10);

```

```
Potencia=(PmW1+PmW2+PmW3)/3; %Potencia en mW.
```

```
fclose(multimeter)  
delete(multimeter)  
clear multimeter
```

Programa del MPSM

El programa nos permite obtener medidas de fase en función de la longitud de onda entrante, usando el láser sintonizable y el analizador de redes:

```
%HP8703D(mesura): Esta función devuelve el resultado de la medida
realizada en el marker, que tiene que estar activada previamente.
% El parámetro medida es un string. Nos devuelve la fase.
function[resultat]=HP8753D(mesura)

%Se crea y se abre el objeto GBIP
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)

%Se define el tipo de medida a realizar (en este caso la fase).
%La medida será en formato ASCII (form4)

fprintf(g,'phas;form4;OUTPMARK;')
resultat=fscanf(g,'%s');

fclose(g)
delete(g)
clear g

%Esta función grafica sin DUT la fase de la señal detectada obtenida
por el analizador de redes.
function sindut_Callback(hObject, eventdata, handles)
%clc
%clear all

data=guidata(gcbo);
lstart = str2double(get(data.LongInicial,'String'));
lstop=str2double(get(data.LongFinal,'String'));
lpaso=str2double(get(data.Resol,'String'));
frf=str2double(get(data.rf,'String'));
frf1=frf*1e6;
pow=str2double(get(data.power,'String'));

%Creamos un fichero para guardar los datos
[fitxer,path]=uiputfile('*.dat','Save');

if isequal(fitxer,0)
    return
else
    fitxer=sprintf('%s%s',path,fitxer);
    fi=fopen(fitxer,'wt');
    msgbox('Running...','Application');
end

%Configuramos el analizador de redes
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)
fprintf(g,'CWFREQ') %frecuencia moduladora que proporcionara
fprintf(g,'cwfreq;%g',frf1)
fprintf(g,'POWER') % nivel de potencia deseada por el usuario
fprintf(g,'power;%g',pow)
```

```

fprintf(g, 'poin;100')           %número de puntos por pantalla
fprintf(g, 'MARK1')            %se crea un marker

%Se sitúa el marker en el centro de la pantalla

fprintf(g, 'STAR?')
TSTAR=fscanf(g, '%g');

fprintf(g, 'STOP?')
TSTOP=fscanf(g, '%g');

centro=(TSTOP-TSTAR)/2;
fprintf(g, 'mark1;%g',centro)

fclose(g)
delete(g)
clear g

%bucle de adquisición de datos

for i=lstart:lpaso:lstop

    h=gpib('ni',0,16);
    fopen(h)

    l=i;

    fprintf(h, ':WAVE %g',l);
    pause(5)

    fclose(h);
    delete(h);
    clear h;

    pause(5)

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, '\n%s',modul);
    pause(0.02)

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, ',%s',modul);
    pause(0.02)

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, ',%s',modul);
    pause(0.02)

end

st=fclose(fi);

%Se guardan la primera, la cuarta y la séptima columnas en los
vectores fmodul1, fmodul2 y fmodul3.

[fmodul1,fmodul2,fmodul3]=textread(fitxer,'%n%n%n%n%n%n%[\n]',
'delimiter',' ');
%Se realiza la media de las tres medidas

```

```

fmodul_sindut=(fmodul1+fmodul2+fmodul3)./3;

set(handles.sindut,'UserData',fmodul_sindut);

l=[lstart:lpaso:lstop];

figure(1)
plot(l,fmodul_sindut)
title('Phase without DUT')
zoom on
ylabel('Phase (°)');
xlabel('Wavelength (nm)');

%por ultimo reescribimos el fichero para que quede accesible
fi=fopen(fitxer,'wt'); %se pierde todo lo que había
fprintf(fi,'Initial_Wavelength(nm):\t%g',lstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Wavelength(nm):\t%g',lstop);
fprintf(fi,'\nResolution(nm):\t%g',lpaso);
fprintf(fi,'\nFrequency_RF(GHz):\t%g',frf);
fprintf(fi,'\nPower_level(dBm):\t%g',pow);

%creamos dos columnas de datos, la primera el valor de longitud de
onda y la segunda para el valor de fase correspondiente

fprintf(fi,'\n\n\t\t\tWavelength(nm):');
fprintf(fi,'\t\tPhase(°):');

%Bucle que imprime los datos al fichero

tamano=length(l);
for h=1:tamano
    fprintf(fi,'\n\t\t\t%g',l(h));
    fprintf(fi,'\t\t\t%g',fmodul_sindut(h));
end

st=fclose(fi);

%Esta función grafica con DUT la fase de la señal detectada obtenida
por el analizador de redes.
function condut_Callback(hObject, eventdata, handles)

%clc
%clear all

data=guidata(gcbo);
lstart = str2double(get(data.LongInicial,'String'));
lstop=str2double(get(data.LongFinal,'String'));
lpaso=str2double(get(data.Resol,'String'));
frf=str2double(get(data.rf,'String'));
frfl=frf*1e6;
pow=str2double(get(data.power,'String'));

%Creamos un fichero para guardar los datos

[fitxer,path]=uiputfile('*.*.dat','Save');

if isequal(fitxer,0)
    return

```



```

else
    fitxer=sprintf('%s%s',path,fitxer);
    fi=fopen(fitxer,'wt');
    msgbox('Running...','Application');
end

%Configuramos el analizador de redes
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)
fprintf(g,'CWFREQ') %frecuencia moduladora
fprintf(g,'cwfreq;%g',frfl)
fprintf(g,'POWER') % nivel de potencia deseada por el usuario
fprintf(g,'power;%g',pow)
fprintf(g,'poin;100') %número de puntos por pantalla
fprintf(g,'MARK1') %se crea un marker

%Se sitúa el marker en el centro de la pantalla
fprintf(g,'STAR?')
TSTAR=fscanf(g,'%g');

fprintf(g,'STOP?')
TSTOP=fscanf(g,'%g');

centre=(TSTOP-TSTAR)/2;
fprintf(g,'mark1;%g',centre)

fclose(g)
delete(g)
clear g

%Bucle de adquisición de datos

for i=lstart:lpaso:lstop

    h=gpib('ni',0,16);
    fopen(h)

    l=i;

    fprintf(h, ':WAVE %g',l);
    pause(5)

    fclose(h);
    delete(h);
    clear h;

    pause(5)

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi,'\n%s',modul);
    pause(0.02)

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi,'%s',modul);
    pause(0.02)

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi,'%s',modul);

```

```

    pause(0.02)

end

st=fclose(fi);

%Se guardan la primera, cuarta y séptima columnas en los vectores
fmodul1, fmodul2 y fmodul3.

[fmodul1,fmodul2,fmodul3]=textread(fitxer,'%n%n%n%n%n%n%[\n]',
'delimiter',' ');

%Se realiza la media de las tres medidas

fmodul_condut=(fmodul1+fmodul2+fmodul3)./3;
fmodul_condut1=(180/pi)*unwrap((fmodul_condut*pi)/180);

set(handles.conduit,'UserData',fmodul_condut1);

l=[lstart:lpaso:lstop];
%close all
figure(2)
plot(l,fmodul_condut1);
title('Phase with DUT')
zoom on
ylabel('Phase (°)');
xlabel('Wavelength (nm)');

%Por ultimo rescribo el fichero para que quede accesible
fi=fopen(fitxer,'wt') ; %se pierde todo lo que había
fprintf(fi,'Initial_Wavelength(nm):\t%g',lstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Wavelength(nm):\t%g',lstop);
fprintf(fi,'\nResolution(nm):\t%g',lpaso);
fprintf(fi,'\nFrequency_RF(MHz):\t%g',frf);
fprintf(fi,'\nPower_level(dBm):\t%g',pow);

%Creamos dos columnas de datos, la primera con el valor de longitud de
onda y la segunda para el valor de fase correspondiente

fprintf(fi,'\n\n\t\t\tWavelength(nm):');
fprintf(fi,'\t\t\tFase(°):');

%Bucle que imprime los datos al fichero
tamano=length(l);
for h=1:tamano
    fprintf(fi,'\n\t\t\t\t%g',l(h));
    fprintf(fi,'\t\t\t\t%g',fmodul_condut1(h));
end
st=fclose(fi);

%Esta función nos da las gráficas del retardo de grupo, fase calibrada
y dispersión.
function calculargraficas_Callback(hObject, eventdata, handles)

data=guidata(gcbo);
lstart = str2double(get(data.LongInicial,'String'));
lstop=str2double(get(data.LongFinal,'String'));
lpaso=str2double(get(data.Resol,'String'));

```

```
frf=str2double(get(data.rf, 'String'));
frf2=frf*1e-3;

%Cogemos los vectores de los dos callbakcs

fmodul_sindutH=get(handles.sindut, 'UserData');
fmodul_condutH=get(handles.condut, 'UserData');

%Calculamos y representamos la fase calibrada

l=[lstart:lpaso:lstop];
fmodul_calibrado=fmodul_condutH-fmodul_sindutH;
figure(3)
plot(l, fmodul_calibrado);
title('Calibrated Phase')
ylabel('Phase (°)');
xlabel('Wavelength (nm)');

%Calculamos y representamos el retardo de grupo (Group Delay)

tg=-((fmodul_calibrado/(frf2*360))*(10^3));
figure(4)
plot(l, tg);
title('Group Delay')
ylabel('Group delay (ps)');
xlabel('Wavelength (nm)');

%Calculamos y representamos la dispersión (D)

D=(tg(2:length(tg))-tg(1:length(tg)-1))/lpaso;
figure(5)
plot(l(1:(length(tg)-1)), D);
title('Dispersion')
ylabel('Dispersion (ps/nm)');
xlabel('Wavelength (nm)');

clc
clear all
```

Programa del ABCM

El programa nos permite obtener medidas de amplitud en función del voltaje de *bias* entrante, usando la fuente programable y el analizador de redes:

```
%HP8703D(mesura): Esta función devuelve el resultado de la medida
realizada en el marker, que tiene que estar activada previamente.
% El parámetro medida es un string. Nos devuelve la amplitud.
function[resultat]=HP8753D(mesura)

%Se crea y se abre el objeto GBIP
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)

%Se define el tipo de medida a realizar (en este caso la amplitud).
%La medida será en formato ASCII (form4)

fprintf(g,'logm;form4;OUTPMARK;')
resultat=fscanf(g,'%s');

fclose(g)
delete(g)
clear g

%Esta función grafica sin DUT la amplitud de la señal detectada
obtenida por el analizador de redes.
function sin_DUT_Callback(hObject, eventdata, handles)

%clc
%clear all

data=guidata(gcbo);
vstart=str2double(get(data.VbiasIni,'String'));
vstop=str2double(get(data.VbiasFin,'String'));
vpaso=str2double(get(data.Resol,'String'));
frf=str2double(get(data.f_rf,'String'));
frf1=frf*1e9;
pow=str2double(get(data.power,'String'));

%Creamos un fichero para guardar los datos
[fitxer,path]=uiputfile('*.dat','Save');

if isequal(fitxer,0)
    return
else
    fitxer=sprintf('%s%s',path,fitxer);
    fi=fopen(fitxer,'wt');
    msgbox('Running...','Application');
end

%Configuramos el analizador de redes
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)
fprintf(g,'CWFREQ') %frecuencia moduladora que proporcionara
fprintf(g,'cwFreq;%g',frf1)
```

```

fprintf(g, 'POWER')           % nivel de potencia deseada por el usuario
fprintf(g, 'power;%g', pow)
fprintf(g, 'poin;100')       % número de puntos por pantalla
fprintf(g, 'MARK1')         % se crea un marker

```

%Se sitúa el marker en el centro de la pantalla

```

fprintf(g, 'STAR?')
TSTAR=fscanf(g, '%g');

```

```

fprintf(g, 'STOP?')
TSTOP=fscanf(g, '%g');

```

```

centro=(TSTOP-TSTAR)/2;
fprintf(g, 'mark1;%g', centro)

```

```

fclose(g)
delete(g)
clear g

```

%bucle de adquisición de datos

```

vpaso=vpaso*1e-3;

```

```

for i=vstart:vpaso:vstop

```

```

    s1=serial('COM1');

```

```

    fopen(s1);

```

```

    v=i;

```

```

    fprintf(s1, 'CHAN1:VOLT %g ;CURR 1.0', v);
    pause(2)
    fprintf(s1, '*VOLT?');
    voltage = fscanf(s1);

```

```

    fclose(s1);
    delete(s1);
    clear s1;

```

```

    pause(5)

```

```

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, '\n%s', modul);
    pause(0.02)

```

```

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, ', %s', modul);
    pause(0.02)

```

```

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, ', %s', modul);
    pause(0.02)

```

```

end

```

```

st=fclose(fi);

%Se guardan la primera, la cuarta y la séptima columnas en los
vectores fmodul1, fmodul2 y fmodul3.

[fmodul1,fmodul2,fmodul3]=textread(fitxer,'%n%n%n%n%n%n%n%[^\\n]',
'delimiter',' ');

%Se realiza la media de las tres medidas
fmodul_sindut=(fmodul1+fmodul2+fmodul3)./3;

set(handles.sin_DUT,'UserData',fmodul_sindut);

vbias=[vstart:vpaso:vstop];
figure(1)
plot(vbias,fmodul_sindut)
title('Amplitud measures regarding Vbias (1559nm, 4dBm)')
zoom on
ylabel('S21(dB)');
xlabel('Vbias (V)');

%por último rescribo el fichero para que quede accesible

fi=fopen(fitxer,'wt'); %se pierde todo lo que había
fprintf(fi,'Initial_Vbias(V):\t%g',vstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Vbias(V):\t%g',vstop);
fprintf(fi,'\nResolution(V):\t%g',vpaso);
fprintf(fi,'\nFrequency_RF(GHz):\t%g',frf);
fprintf(fi,'\nPower_level(dBm):\t%g',pow);

%creamos dos columnas de datos, la primera con el valor de Vbias y la
segunda para el valor de amplitud correspondiente

fprintf(fi,'\n\n\t\t\tVbias(V)');
fprintf(fi,'\t\tS21(dB)');

%Bucle que imprime los datos al fichero
tamano=length(vbias);
for h=1:tamano
    fprintf(fi,'\n\t\t\t%g',vbias(h));
    fprintf(fi,'\t\t\t%g',fmodul_sindut(h));
end
st=fclose(fi);

%Esta función grafica con DUT la amplitud de la señal detectada
obtenida por el analizador de redes.
function with_DUT_Callback(hObject, eventdata, handles)

%clc
%clear all

data=guidata(gcbo);
vstart = str2double(get(data.VbiasIni,'String'));
vstop=str2double(get(data.VbiasFin,'String'));
vpaso=str2double(get(data.Resol,'String'));
frf=str2double(get(data.f_rf,'String'));
frf1=frf*1e9;

```

```

pow=str2double(get(data.power,'String'));
%Creamos un fichero para guardar los datos

[fitxer,path]=uiputfile('*.dat','Save');

if isequal(fitxer,0)
    return
else
    fitxer=sprintf('%s%s',path,fitxer);
    fi=fopen(fitxer,'wt');
    msgbox('Running...','Application');
end

%Configuramos el analizador de redes

g=gplib('ni',0,19);
fopen(g)
fprintf(g,'CWFREQ') %frecuencia moduladora
fprintf(g,'cwfreq;%g',frfl)
fprintf(g,'POWER') % nivel de potencia deseada por el usuario
fprintf(g,'power;%g',pow)
fprintf(g,'poin;100') %número de puntos por pantalla
fprintf(g,'MARK1') %se crea un marker

%Se sitúa el marker en el centro de la pantalla

fprintf(g,'STAR?')
TSTAR=fscanf(g,'%g');

fprintf(g,'STOP?')
TSTOP=fscanf(g,'%g');

centre=(TSTOP-TSTAR)/2;
fprintf(g,'mark1;%g',centre)

fclose(g)
delete(g)
clear g

%Bucle de adquisición de datos
vpaso=vpaso*1e-3;

for i=vstart:vpaso:vstop

    s1=serial('COM1');

    fopen(s1);

    v=i;

    fprintf(s1,'CHAN1:VOLT %g ;CURR 1.0',v);
    pause(2)
    fprintf(s1,'*VOLT?');
    voltage = fscanf(s1);

    fclose(s1);
    delete(s1);
    clear s1;

```

```

    pause(5)
    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, '\n%s',modul);
    pause(0.02)

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, ',%s',modul);
    pause(0.02)

    modul=HP8753D('mesura');
    fprintf(fi, ',%s',modul);
    pause(0.02)

end

st=fclose(fi);

%Se guardan la primera, cuarta y séptima columnas en los vectores
fmodul1, fmodul2 y fmodul3.

[fmodul1,fmodul2,fmodul3]=textread(fitxer,'%n%n%n%n%n%n%n%[^\\n]',
'delimiter',' ');

%Se realiza la media de las tres medidas
fmodul_condut=(fmodul1+fmodul2+fmodul3)./3;

set(handles.with_DUT,'UserData',fmodul_condut);

vbias=[vstart:vpaso:vstop];
figure(2)
plot(vbias,fmodul_condut);
title('Amplitud measures regarding Vbias (1559nm, 4dBm)')
zoom on
ylabel('S21 (dB)');
xlabel('Vbias (V)');

%Por último rescribo el fichero para que quede accesible
fi=fopen(fitxer,'wt'); %se pierde todo lo que había
fprintf(fi, 'Initial_Vbias(V):\t%g',vstart);
fprintf(fi, '\nFinal_Vbias(V):\t%g',vstop);
fprintf(fi, '\nResolution(V):\t%g',vpaso);
fprintf(fi, '\nFrequency_RF(MHz):\t%g',frf);
fprintf(fi, '\nPower_level(dBm):\t%g',pow);

%Creamos dos columnas de datos, la primera con el valor de Vbias y la
segunda para el valor de amplitud correspondiente

fprintf(fi, '\n\n\t\t\t\t\tVbias(V):');
fprintf(fi, '\t\t\t\t\tS21(dB):');

%Bucle que imprime los datos al fichero
tamano=length(vbias);
for h=1:tamano
    fprintf(fi, '\n\t\t\t\t\t%g',vbias(h));
    fprintf(fi, '\t\t\t\t\t%g',fmodul_condut(h));
end
st=fclose(fi);
%Esta función grafica las funciones con DUT y sin DUT sobre un mismo
eje de coordenadas.

```



```

function visualizar_Callback(hObject, eventdata, handles)
data=guidata(gcbo);
vstart=str2double(get(data.VbiasIni, 'String'));
vstop=str2double(get(data.VbiasFin, 'String'));
vpaso=str2double(get(data.Resol, 'String'));
vpaso=vpaso*1e-3;

%Cogemos los vectores de los dos callbakcs
fmodul_sindutH=get(handles.sin_DUT, 'UserData');
fmodul_condutH=get(handles.with_DUT, 'UserData');

%Dibujamos las dos graficas

vbias=[vstart:vpaso:vstop];
figure(3)
plot(vbias, fmodul_sindutH, 'b', vbias, fmodul_condutH, 'r');
title('Medidas...')
ylabel('S21 (dB)');
xlabel('Vbias (V)');

%Esta función nos da el valor de la dispersión
function Ejecutar_Callback(hObject, eventdata, handles)

data=guidata(gcbo);
vstart=str2double(get(data.VbiasIni, 'String'));
vstop=str2double(get(data.VbiasFin, 'String'));
vini=str2double(get(data.Vbias_start, 'String'));
vfin=str2double(get(data.Vbias_fin, 'String'));
vpaso=str2double(get(data.Resol, 'String'));

%Cogemos los vectores de los dos callbakcs
fmodul_sindutH=get(handles.sin_DUT, 'UserData');
fmodul_condutH=get(handles.with_DUT, 'UserData');

%Bucle de adquisición de datos

vpaso=vpaso*1e-3;

vbias=[vini:vpaso:vfin];
tamano=length(vbias);
minimo=50.00;
minimo1=60.00;
vini2=vini;

for h=1:tamano
    h1=int32(vini2/vpaso);
    fmodulsin(h)=fmodul_sindutH(h1);
    fmodulcon(h)=fmodul_condutH(h1);
    vini2=vini2+vpaso;

    if(minimo>fmodulsin(h))
        minimo=fmodulsin(h);
        pos1=h1;
    elseif(minimo1>fmodulcon(h))
        minimo1=fmodulcon(h);
        pos2=h1;
    else
        minimo=minimo;

```

```
        minimol=minimol;
    end
end

%calculamos la dispersión

pos1_=double(pos1);
pos3=(pos1_*vpaso);
pos2_=double(pos2);
pos4=(pos2_*vpaso);

vpi=str2double(get(data.vpi, 'String'));
long=str2double(get(data.longitud_onda, 'String'));
rf=str2double(get(data.f_rf, 'String'));

long_=(long*1e-9)^2;
rf2=(rf*1e9)^2;

vb=(pos4-pos3);
c=3*1e8;
D=-(c*vb)/(2*vpi*(long_)*rf2);
D1=D*1000;
set(handles.mostrar_dispersion, 'String', (D1));
```

Programa del RF Scan

El programa nos permite obtener medidas de amplitud y fase en función del voltaje de *bias* entrante y su frecuencia de RF, usando la fuente programable y el analizador de redes:

```
%HP8703D(mesura): Esta función devuelve el resultado de la medida
realizada en el marker, que tiene que estar activada previamente.
% El parámetro medida es un string. Nos devuelve la amplitud.
function[resultat]=HP8753D(mesura)

%Se crea y se abre el objeto GBIP
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)

%Se define el tipo de medida a realizar.
%La medida será en formato ASCII (form4)

fprintf(g,'chan2;S21;logm;form4;OUTPMARK;')
resultat=fscanf(g,'%s');

fclose(g)
delete(g)
clear g

%HP8703D(mesura): Esta función devuelve el resultado de la medida
realizada en el marker, que tiene que estar activada previamente.
% El parámetro medida es un string. Nos devuelve la fase.
function[resultat2]=HP8753D_2(mesura)

%Se crea y se abre el objeto GBIP
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)

%Se define el tipo de medida a realizar (en este caso la fase).
%La medida será en formato ASCII (form4)

fprintf(g,'chan1;S21;phase;form4;OUTPMARK;')
resultat2=fscanf(g,'%s');

fclose(g)
delete(g)
clear g

%Esta función nos calcula el valor de Vbias a la frecuencia a la que
se producen los ceros, su amplitud máxima y su fase.
function ejecutar_Callback(hObject, eventdata, handles)

%clc
%clear all

data=guidata(gcbo);
vstart=str2double(get(data.vbias_ini,'String'));
vstop=str2double(get(data.vbias_fin,'String'));
```

```

vpaso=str2double(get(data.resol,'String'));
rfstart=str2double(get(data.rf_ini,'String'));
rfstop=str2double(get(data.rf_final,'String'));
pow=str2double(get(data.power,'String'));
swet=str2double(get(data.sweep,'String'));
point=str2double(get(data.points,'String'));
long=str2double(get(data.longitud_onda,'String'));
vpi=str2double(get(data.Vpi,'String'));

vpaso=vpaso*1e-3;
rf_start1=rfstart*1e3;
rf_stop1=rfstop*1e6;

%Creamos un fichero para guardar los datos
[fitxer,path]=uinputfile('*.dat','Save');

if isequal(fitxer,0)
    return
else
    fitxer=sprintf('%s%s',path,fitxer);
    fi=fopen(fitxer,'wt');
    msgbox('Running....','Application');
end

%Configuramos el analizador de redes
g=gpib('ni',0,19);
fopen(g)
fprintf(g,'POWER') % nivel de potencia deseada por el usuario
fprintf(g,'power;%g',pow)
fprintf(g,'SWET')
fprintf(g,'swet;%g',swet)
fprintf(g,'DUACON')
fprintf(g,'LINFREQ;START')
fprintf(g,'start;%g',rf_start1)
fprintf(g,'STOP')
fprintf(g,'stop;%g',rf_stop1)
fprintf(g,'chan2;S21;logm;form4;OUTPform;')
fprintf(g,'chan1;S21;phase;form4;OUTPform;')
fprintf(g,'poin;%g',point) %número de puntos por pantalla
fprintf(g,'Poin?')
npoint=fscanf(g);
npoint1=str2double(npoint);

%Se calcula la frecuencia correspondiente a cada punto
pas=(rf_stop1-rf_start1)/((npoint1)-1);
freq=[rf_start1:pas:rf_stop1];

fclose(g)
delete(g)
clear g

%bucle de adquisición de datos
m=1;

for i=vstart:vpaso:vstop

    fi=fopen(fitxer,'wt');
    s1=serial('COM1');

```

```

fopen(s1);

v=i;

fprintf(s1, 'CHAN1:VOLT %g ;CURR 1.0',v);
pause(2)
fprintf(s1, '*VOLT?');
voltage = fscanf(s1);

fclose(s1);
delete(s1);
clear s1;

pause(2)

volt=str2double(voltage);
volt1(m)=volt;

g=gpib('ni',0,19);
set(g, 'InputBufferSize',25000)
fopen(g)
InputBufferSize=get(g, 'InputBufferSize');

for j=1:3

    fprintf(g, 'SING')
    fprintf(g, 'chan2;S21;logm;form4;OUTPform;')
    modul=fscanf(g);
    pause(0.02)
    fprintf(fi, '%s',modul);

end

fclose(g)
delete(g)
clear g

st=fclose(fi);

%Se guarda la primera columna, que es la que tiene los datos de
%las amplitudes. Hay otra columna de datos que retorna el
%instrumento(ceros) que no nos interesa.
[modul]=textread(fitxer, '%n%*[\n]', 'delimiter', ',');

f=1;

for k=1:npoint1
    modul1=modul(k);
    modul1_(f)=modul1;
    f=f+1;
end

k1=k+npoint1;
f=1;

for k=k+1:k1
    modul2=modul(k);
    modul2_(f)=modul2;

```

```

        f=f+1;
    end

    k1=k+npoint1;
    f=1;

    for k=k+1:k1
        modul3=modul(k);
        modul3_(f)=modul3;
        f=f+1;
    end

    %Se realiza la media de las tres medidas
    modul_logm=(modul1_+modul2_+modul3_)./3;

    %Calculamos el valor de la frecuencia a la que se produce un cero
    leng= length(modul_logm);
    minimo=-60.00;

    for h=1:leng
        if(minimo>modul_logm(h))
            minimo=modul_logm(h);
            pos=h;
            fz=freq(h);
        end
    end

    fzeros(m)=fz;
    pos1(m)=pos;
    valorz(m)=minimo;
    fmodul1(m)=-70.00;

    if(m~=1)
        for l=1:l:leng1-1
            fi=fopen(fitxer,'wt');
            g=gpiib('ni',0,19);
            fopen(g)
            fprintf(g,'MARK1')           %se crea un marker
            fprintf(g,'mark1;%g',fzeros(l))
            fclose(g)
            delete(g)
            clear g
            pause(2)

            fzeros1(l)=fzeros(l);

            modulmax=HP8753D('mesura');
            fprintf(fi,'\n%s',modulmax);
            pause(0.02)

            phase=HP8753D_2('mesura');
            fprintf(fi,'\n%s',phase);
            pause(0.02)

            st=fclose(fi);

            [fitxer1]=textread(fitxer,'%n*[\n]','delimiter',' ');
            fmodul(1)=fitxer1(1);
            if(fmodul(1)>fmodul1(1))

```

```

        fmodul1(1)=fmodul(1);
        fphase(1)=fitxer1(2);
    else
        fmodul1(1)=fmodul1(1);
    end
    fmodul1(1)=fmodul1(1);

    end
end
m=m+1;
end

figure(1)
plot(fzeros1,fphase);
title('RF Scan')
ylabel('Phase (°)');
xlabel('RF (GHz)');

fphase1=(180/pi)*unwrap((fphase*pi)/180); %deg

figure(2)
plot(fzeros1,fphase1);
title('RF Scan')
ylabel('Phase (°)');
xlabel('RF (GHz)');

%Calculamos los valores de la diferencia de fase eléctrica en la banda
superior, a partir de los datos obtenidos anteriormente
m1=(m-3);

for n=1:m1
    phasebias=(180/pi)*unwrap((volt1(n)*pi)/vpi); %deg
    phasebias1=(180/pi)*unwrap((volt1(n+1)*pi)/vpi); %deg
    difbias=(phasebias1-phasebias);
    increfase_sup(n)=((fphase(n+1)-fphase(n))/2)-(difbias/2);
end

increase_sup1(1)=(180/pi)*unwrap((increase_sup(1)*pi)/180);
s=1;
faseelec_sup(s)=0;

for s=2:(m-2)
    faseelec_sup(s)=faseelec_sup(s-1)+(increfase_sup1(s-1)*
(360*(fzeros(s)-fzeros(s-1)))); %deg
end

%Calculamos los valores de la diferencia de fase eléctrica en la banda
inferior, a partir de los datos obtenidos anteriormente
m2=(m-3);

for n=1:m2
    phasebias=(180/pi)*unwrap((volt1(n)*pi)/vpi); %deg
    phasebias1=(180/pi)*unwrap((volt1(n+1)*pi)/vpi); %deg
    difbias=(phasebias1-phasebias);
    increfase_inf(n)=((fphase(n+1)-fphase(n))/2)+(difbias/2);
end

increase_inf1(1)=(180/pi)*unwrap((increase_inf(1)*pi)/180);
s=1;

```

```

faseelec_inf(s)=0;

for s=2:(m-2)
    faseelec_inf(s)=faseelec_inf(s-1)+(increfase_inf1(s-1)*
(360*(fzeros(s)-fzeros(s-1)))); %deg

end

%Visualización de la gráfica de la fase eléctrica en la banda superior
e inferior

figure(3)
plot(fzeros1,faseelec_sup);
title('RF Scan')
ylabel('Phase (°)');
xlabel('RF (GHz)');

figure(4)
plot(fzeros1,faseelec_inf);
title('RF Scan')
ylabel('Phase (°)');
xlabel('RF (GHz)');

%Calculamos el retardo de grupo (Group Delay)
t=1;
tg(t)=0;

for t=2:(m-2)
    tg(t)=(faseelec_sup(t)-faseelec_sup(t-1))/(360*(fzeros1(t)-
fzeros1(t-1)));
end

figure(5)
plot(fzeros1,tg);
title('Group Delay')
ylabel('Group Delay (ps)');
xlabel('RF (GHz)');

fmodul1(m)=0;
fphase(m)=0;

%rescribimos el fichero para que quede accesible
fi=fopen('fitxer','wt'); %se pierde todo lo que había
fprintf(fi,'Initial_RF(KHz):\t%g',rfstart);
fprintf(fi,'\nFinal_RF(MHz):\t%g',rfstop);
fprintf(fi,'\nPower_level(dBm):\t%g',pow);
fprintf(fi,'\nPoints:\t%g',npoint1);
fprintf(fi,'\nSweep_Time(s):\t%g',swet);
fprintf(fi,'\nInitial_Vbias(V):\t%g',vstart);
fprintf(fi,'\nFinal_Vbias(V):\t%g',vstop);
fprintf(fi,'\nResolution(V):\t%g',vpaso);
fprintf(fi,'\nWavelength(nm):\t%g',long);
fprintf(fi,'\nVpi(V):\t%g',vpi);

%creamos cuatro columnas de datos, la primera con el valor de Vbias,
la segunda con la frecuencia del cero, la tercera con la frecuencia
del máximo y una cuarta con el valor de la fase en su máximo.

fprintf(fi,'\n\n\t\t\t\t\tVbias(V)');
fprintf(fi,'\t\t\t\t\tFrequency_zeros(MHz)');

```



```
fprintf(fi, '\t\tS21(dB)');  
fprintf(fi, '\t\t\tPhase(°)');  
  
%Bucle que imprime los datos en el fichero  
tamano=length(volt1);  
for h=1:tamano  
    fprintf(fi, '\n\t\t\t\t%7.3f', volt1(h));  
    fprintf(fi, '\t\t\t\t%7.3f', fzeros(h));  
    fprintf(fi, '\t\t\t\t%7.3f', fmodul1(h));  
    fprintf(fi, '\t\t\t\t%7.3f', fphase(h));  
end  
st=fclose(fi);
```

ANEXO II: DATASHEETS DE LOS DISPOSITIVOS