



UNIVERSITAT  
POLITÀCNICA  
DE VALÈNCIA



Tesis Doctoral

**Estructuras de generación, reescritura y  
detección de paquetes ópticos con tecnología  
de multiplexación por subportadora de etiqueta  
basadas en moduladores electro-ópticos  
y redes de difracción de Bragg**

Departamento de Comunicaciones

Universitat Politècnica de València

Autor

**Alfonso Martínez García**

Director

**Dr. Daniel Pastor Abellán**

Valencia, Julio 2012



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA  
DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES

**Estructuras de generación, reescritura y  
detección de paquetes ópticos con tecnología  
de multiplexación por subportadora de  
etiqueta basadas en moduladores  
electro-ópticos y redes de difracción de  
Bragg**

**TESIS DOCTORAL**

Autor:

Alfonso Martínez García  
Ingeniero de Telecomunicación

Director:

Daniel Pastor Abellán  
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

Valencia, Julio 2012



*A mis padres Pepe y Cari,  
y hermanos Pepe y Venancio.*



# Agradecimientos.

Quiero mostrar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que me han ayudado y apoyado durante los años de realización de este trabajo de tesis.

En primer lugar a mi director de tesis, Daniel Pastor Abellán, por la confianza depositada en mí a la hora de realizar este trabajo, su inestimable ayuda y comprensión a lo largo del periodo de investigación, sobre todo en los momentos más difíciles.

También quiero dar las gracias a los miembros del Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas, por crear un ambiente laboral idóneo. Especialmente a José Capmany por sus sabios consejos y reflexiones. A Victor, David Calvo, Pepe, Juan Sancho y Joan Lloret porque además de excelentes profesionales he encontrado a magníficos amigos.

A mis amigos Bernardo, Toni, Jaime, Miguel Ángel, Javi, Nacho y Miguel Ferrer, por estar ahí cuando los necesitaba.

Por último a mi familia por confiar, animar y apoyarme incondicionalmente en todos mis retos profesionales y personales. Gracias a ellos soy lo que soy.



# Resumen

El rápido crecimiento del tráfico y la heterogeneidad de servicios ofrecidos en las redes de paquetes actuales ha impulsado durante la última década el desarrollo de nuevas estrategias tecnológicas como son las redes todo ópticas de intercambio de etiquetas (All-Optical Label Swapping, AOLS) con multiplexación por subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta (SubCarrier Multiplexed Label, SCML) y multiplexación en longitud de onda (Wavelength Division Multiplexed, WDM), que permiten el enrutado de varios paquetes de forma simultánea y directamente en el dominio óptico, así como satisfacer las necesidades de gran ancho de banda, flexibilidad, escalabilidad y transparencias de servicios y formatos de los datos transmitidos.

En este contexto se enmarca esta tesis doctoral que propone, modela y valida experimentalmente estructuras encargadas de la generación, reescritura y detección por prefiltrado óptico de paquetes ópticos SCML basados en moduladores electroópticos (Electro Óptical Modulator, EOM) y redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) para este tipo de redes AOLS WDM-SCML. Se ha desarrollado unos modelos analíticos que permiten evaluar la calidad tanto de las señales que integran un paquete óptico SCML (factor de calidad, apertura de ojo y relación de extinción) como del paquete en su conjunto (figura de mérito del paquete  $FM_{SCML}$ ) cuando se utilizan estructuras de generación con un único EOM o dos EOMs con la configuración de combinación óptica paralela con FBG, así como la detección del paquete mediante la técnica de prefiltrado óptico con FBG. Esto ha permitido evaluar la bondad de las estructuras analizadas, así como determinar y cuantificar las fuentes de degradación originadas por las interferencias entre las señales que integran el paquete, estableciendo estrategias de diseño en las FBGs empleadas que permitan minimizarlas e incluso eliminarlas dependiendo de la estructura empleada. También se han propuesto y demostrado experimentalmente estrategias para reducir el ancho de banda requerido para transmitir un paquete óptico SCML en las distintas configuraciones de la estructura de combinación óptica paralela. Por último, se ha diseñado e implementado un demostrador de red de conmutación de paquetes óptico AOLS WDM-SCML empleando la estructura de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con FBGs de altas prestaciones basadas en configuraciones tipo tandem o array para implementar la generación, reescritura y detección de paquetes ópticos, donde se ha evaluado la calidad de los paquetes en distintos puntos del sistema, así como la verificación del funcionamiento de enrutado óptico de varios paquetes de forma simultánea.



# Abstract

The never-ending increase of the throughput, together with the heterogeneity of the services offered in the actual data networks has fostered over the last decade the development of novel technology strategies, such as All-Optical Label Swapping (AOLS) with Sub-carrier Multiplexed Label (SCML) and Wavelength Division Multiplexed (WDM). These strategies allow for the simultaneous routing of multiple packets in the optical domain, as well as high bandwidth, flexibility, scalability and transparency with respect to the service and data format.

In this context, the thesis proposes, analytically model and experimentally validates optical structures aiming of generating, re-writing and detecting by means of SCML optical packets prefiltering based on an Electro-Optical Modulator (EOM) and Fiber Bragg grating (FBG). The development of analytical models with the goal of assessing the quality of both signals involving the SCML optical packets in terms of the quality factor, eye opening and extinction ratio, as well as for evaluating the packets as a whole using the figure of merit  $FM_{SCML}$  has been accomplished. The models consider structures using a single EOM or two EOMs parallelly combined, as well as the FBG prefiltering based detection technique. This fact has allowed to evaluate the goodness of the analyzed structures, as well as identify and quantify the degradation sources caused by interference among the signals that involve the packet. Consequently, this fact has paved the way to the desing of custom FBGs properly tailored for the purpose of minimizing or even eliminating the mentioned interferences. A novel strategy for the purpose of reducing the demanding bandwidth by the SCML optical packets has been proposed and experimentally demonstrated attending to different configurations based on the so-called optical parallel combination structure. Finally, a WDM-SCML AOLS network demonstrator involving the optical parallel combination and optical prefiltering with high-performance FBGs based on tandem or array configurations has been designed and implemented. The demonstrator leads to the generation, re-writing and detection of SCML optical packets and enables the evaluation of the packet quality in different points of the system, as well as the verification as a simultaneous multi-packet router.



# Resum

El ràpid creixement del tràfic i l'heterogeneïtat dels servicis suportats a les xarxes de paquets actuals ha impulsat durant l'última dècada, el desenvolupament de noves estratègies tecnològiques com ara les xarxes tot òptiques d'intercanvi d'etiquetes (All-Optical Label Swapping, AOLS) amb multiplexació per subportadora de radiofreqüència de l'etiqueta (SubCarrier Multiplexed Label, SCML) i multiplexació en longitud d'ona (Wavelength Division Multiplexed, WDM). Aquestes estratègies permeten l'enrutat de diversos paquets de forma simultània i directament en el domini òptic, a més de satisfer les necessitats de gran ample de banda, flexibilitat, escalabilitat i transparència respecte als servicis i formats de les dades transmiseses.

En aquest context s'emmarca aquesta tesi doctoral que proposa, modela i valida experimentalment estructures encarregades de la generació, reescriptura i detecció per prefiltrat òptic de paquets SCML fent servir moduladors electro-òptics (Electro-óptical Modulator, EOM) i xarxes de difracció de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) en xarxes de dades AOLS WDM-SCML. S'ha desenvolupat una sèrie de models analítics que permeten avaluar la qualitat tant dels senyals que integren un paquet òptic SCML (factor de qualitat, obertura d'ull i relació d'extinció) com del paquet en el seu conjunt (figura de mèrit del paquet,  $FM_{SCML}$ ) quan es fan servir estructures de generació amb un únic EOM o dos EOMs. En aquest segund cas, el dos EOMs s'operen sota la configuració paral·lela en combinació and FBGs. D'altra banda, la detecció del paquets és mitjançant la tècnica de prefiltrat òptica, fent servir FBGs. Açò ha permès avaluar la bondat de les estructures analitzades, així com determinar i quantificar les fonts de degradació originades per les interferències entre els senyals que integren el paquet, establint estratègies de disseny en les FBGs emprades que permeten minimitzar-les i fins i tot eliminar-les depenent de l'estructura. Tanmateix s'han proposat i demostrat experimentalment estratègies per a reduir l'ample de banda requerit per a transmetre un paquet òptic SCML en les diferents configuracions de l'estructura de combinació òptica paral·lela. Finalment, s'ha dissenyat i implementat un demostrador de xarxa de commutació de paquets òptics AOLS WDM-SCML emprant l'estructura de combinació òptica paral·lela i prefiltrat òptic amb FBGs d'altres prestacions basades en configuracions tipus tandem o array. Aquest demostrador ha fet possible la implementació de tasques de generació, reescriptura i detecció de paquets òptics, on s'ha avaluat la qualitat dels paquets en diferents punts del sistema, així com la verificació del funcionament d'enrutat òptic de diversos paquets de forma simultània.



# Índice general

<b>1. Introducción.</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción a las redes de paquete ópticos con intercambio de etiqueta. . .	1
1.2. Motivación. . . . .	4
1.3. Objetivos de la tesis. . . . .	4
1.4. Estructura de la tesis. . . . .	5
<b>2. Modelado de paquetes ópticos basados en la técnica de Multiplexación por Subportadora de etiqueta para redes todo ópticas de intercambio de etiquetas.</b>	<b>7</b>
2.1. Modelado analítico del paquete óptico SCML empleando estructuras basadas en un único EOM y prefiltrado óptico con FBG. . . . .	8
2.1.1. Obtención de la fotocorriente detectada del paquete óptico SCML.	8
2.1.2. Cálculo de la calidad del paquete óptico SCML . . . . .	15
2.1.3. Configuraciones de interés para la estructura basada en un único Modulador Electro-Óptico . . . . .	19
2.1.4. Inclusión de las respuestas reales de los dispositivos empleados en el sistema SCML: Filtros eléctricos, FBG y fibra óptica. . . . .	26
2.1.5. Evaluación del modelo para las configuraciones de interés . . . . .	32
2.2. Modelado analítico del paquete óptico SCML empleando la estructura de combinación óptica paralela basada en EOM y FBG y detección basada en prefiltrado óptico con FBG. . . . .	47
2.2.1. Obtención de la fotocorriente detectada del paquete óptico SCML para la estructura general de combinación óptica paralela. . . . .	47
2.2.2. Configuraciones de interés para la estructura de combinación óptica paralela. . . . .	54
2.2.3. Inclusión de las respuestas reales de los dispositivos empleados en el sistema: Dispositivos eléctricos del transmisor y receptor, FBGs y fibra óptica . . . . .	61
2.2.4. Evaluación del modelo para el esquema de combinación óptica paralela . . . . .	62
2.3. Conclusiones . . . . .	72
<b>3. Diseño de las características de las FBGs en la estructura de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con FBGs.</b>	<b>75</b>
3.1. Estructura de combinación óptica paralela basada en FBG. . . . .	76
3.1.1. Penalización por batido de la portadora óptica en la estructura de combinación óptica paralela. . . . .	77

3.1.2. Penalización por interferencias entre las señales de carga y etiqueta en la estructura de combinación óptica paralela. . . . .	79
3.2. Diseño de las FBGs para la estructura de combinación óptica paralela: 2EOMP . . . . .	81
3.2.1. Estructura 2EOMP-RR . . . . .	81
3.2.2. Estructura 2EOMP-TR . . . . .	93
3.2.3. Estructura 2EOMP-TT. . . . .	106
3.3. Conclusiones. . . . .	115
<b>4. Compactación espectral del paquete SCML en la estructura de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con FBGs. . . . .</b>	<b>117</b>
4.1. Compactación espectral del paquete SCML en la estructura 2EOMP. . . . .	117
4.2. Incremento de la compactación espectral del paquete SCML en la estructura 2EOMP. . . . .	124
4.2.1. Incremento del FOM en la estructura 2EOMP-RR. . . . .	124
4.2.2. Incremento del FOM en la estructura 2EOMP-TR. . . . .	130
4.2.3. Incremento del FOM en la estructura 2EOMP-TT. . . . .	133
4.3. Conclusiones . . . . .	134
<b>5. Diseño e implementación de un demostrador de red de conmutación de paquetes ópticos AOLS WDM-SCML. . . . .</b>	<b>137</b>
5.1. Red de conmutación de paquetes ópticos AOLS WDM-SCML. . . . .	137
5.2. Estructuras de generación, reescritura y detección de paquetes SCML con FBG tipo Array y Tándem. . . . .	141
5.2.1. Estructuras de generación y reescritura de paquetes en redes AOLS WDM-SCML con FBG Array. . . . .	141
5.2.2. Estructura de detección de paquetes en redes AOLS WDM-SCML con FBG Tándem. . . . .	150
5.3. Demostrador de red de conmutación de paquetes ópticos AOLS WDM-SCML. . . . .	153
5.3.1. Verificación de la calidad de carga y etiqueta. . . . .	157
5.3.2. Prueba de concepto de la conmutación de paquetes. . . . .	160
<b>6. Conclusiones y líneas futuras. . . . .</b>	<b>165</b>
6.1. Conclusiones. . . . .	165
6.2. Líneas abiertas. . . . .	167
<b>A. Señal digital con formato NRZ . . . . .</b>	<b>169</b>
A.1. Características de una señal digital NRZ. . . . .	169
A.2. Cálculo de los parámetros de calidad en una señal digital NRZ . . . . .	170
<b>B. Cálculo de coeficientes de corrección por efecto de las respuestas de los dispositivos empleados en el sistema SCML . . . . .</b>	<b>173</b>
B.1. Configuración basada en un único EOM . . . . .	173
B.1.1. Determinación de los coeficientes de corrección de la fotocorriente detectada . . . . .	175
B.2. Configuración basada en dos EOM: Combinación óptica paralela . . . . .	177
B.2.1. Determinación de los coeficientes de corrección de la fotocorriente detectada para la estructura de combinación óptica paralela . . . . .	179

---

<b>C. Publicaciones científicas del autor.</b>	<b>183</b>
C.1. Publicaciones científicas relacionadas con la tesis en revistas internacionales	183
C.2. Publicaciones científicas relacionadas con la tesis en congresos internacionales	184
C.3. Publicaciones científicas relacionadas con la tesis en congresos nacionales	185



# Capítulo 1

## Introducción.

### 1.1. Introducción a las redes de paquete ópticos con intercambio de etiqueta.

El exponencial crecimiento del tráfico en Internet está impulsando el desarrollo de nuevas alternativas tecnológicas a las redes de paquetes actuales para dar respuesta al gran ancho de banda demandado, así como intentar erradicar los cuellos de botella que se originan en el proceso de enrutamiento electrónico de dichos paquetes. Una alternativa tecnológica empleando las redes ópticas es la llamada red todo óptica de intercambio de etiqueta (All-Optical Label Swapping, AOLS) ([1], [2]), que permite el enrutamiento de paquetes IP directamente en el dominio óptico, aprovechando el gran potencial de las redes ópticas en lo que respecta a gran ancho de banda, flexibilidad, escalabilidad y transparencia de servicios y formatos de datos transmitidos [3]. AOLS combina técnicas de ingeniería de tráfico como MPLS o GMPLS [4] con técnicas de conmutación fotónica de paquetes para hacer las funciones de enrutamiento de paquetes IP directamente en el dominio óptico. Esta tecnología está basada en el principio de enviar simultáneamente la información de enrutamiento óptico (etiqueta) junto con la carga (paquete IP) dentro del mismo canal óptico.

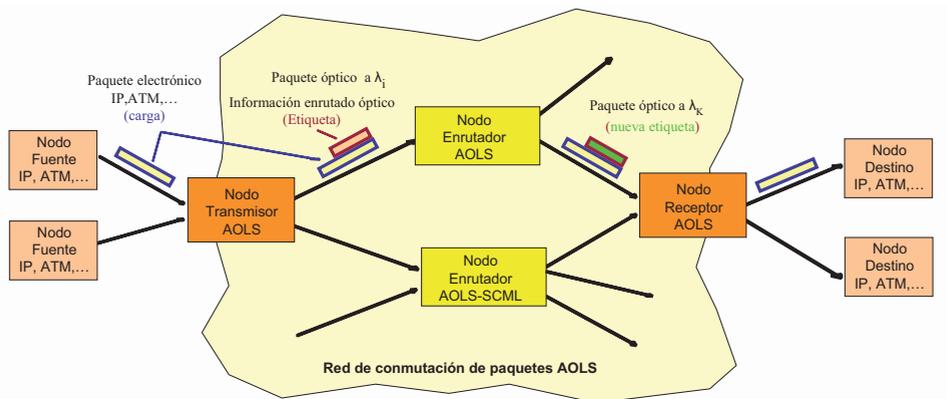


Figura 1.1: Red de conmutación de paquetes ópticos AOLS.

En la figura 1.1 se muestra la estructura y principio de funcionamiento de una red de paquetes AOLS. Concretamente, un paquete IP es insertado a la red óptica AOLS a través

del nodo Transmisor AOLS, encargado de generar en un paquete óptico compuesto por el paquete IP (carga) multiplexado con información de enrutamiento óptico (etiqueta). Éste se propagará por la red, siendo en los nodos de conmutación de paquetes ópticos (nodo enrutador AOLS) donde se extraerá la etiqueta del paquete óptico, se decidirá en función de ella por qué salida del nodo debe enrutarse, y se cambiará la etiqueta por una nueva en el paquete óptico para tal fin. Será en el nodo de salida de la red AOLS (nodo receptor AOLS), donde se extraerá la carga (paquete IP) del paquete óptico.

La técnica de multiplexación de la etiqueta en el paquete óptico repercutirá en el ancho de banda requerido, la calidad de la carga y etiqueta del paquete óptico, así como en la complejidad a la hora de extraer e insertar la etiqueta en el paquete óptico en el nodo enrutador o receptor AOLS. Concretamente, las técnicas propuestas hasta la actualidad son: multiplexación por división en el tiempo (TDM), multiplexación por subportadora de radiofrecuencia (SCM), multiplexación por división en longitud de onda (WDM), multiplexación por división código óptico (OCDM), y multiplexación por modulaciones ortogonales. A continuación se pasa a describir cada una de dichas técnicas, así como las ventajas e inconvenientes que presentan:

- *Multiplexación por división en el tiempo (TDM)*. En este caso, la etiqueta se combina con la carga (paquete IP) en tiempo [5], [6], dejando un tiempo de guarda entre ambas. Este tiempo de guarda se emplea para poder extraer/insertar fácilmente la etiqueta del paquete óptico en los nodos enrutadores, así como la carga en el nodo detector. El principal inconveniente de esta técnica está en el estricto nivel de sincronización que debe haber a la hora de extraer e insertar la etiqueta del paquete óptico en el nodo enrutador como en detección.
- *Multiplexación por subportadora de radiofrecuencia (SCM)*. La etiqueta se modula sobre una portadora de radiofrecuencia y luego se combina con la carga (paquete IP) que se encuentra en banda base [7], [8]. En este caso, la carga y etiqueta del paquete óptico viajan simultáneamente a diferencia de la multiplexación TDM, pero requieren un ancho de banda superior al emplear la técnica SCM (dependiendo si se emplea banda lateral única o doble banda lateral de etiqueta). No necesitan tener una rigurosa sincronización entre carga y etiqueta a la hora de extraer/insertar la etiqueta del paquete en el nodo enrutador AOLS ni de carga en el nodo receptor. Una posible desventaja se encuentra en el efecto de supresión de portadora de la etiqueta por interacción de la subportadora de radiofrecuencia y la dispersión cromática de la fibra. Sin embargo, este efecto se puede eliminar mediante técnicas de filtrado óptico en las que se logra una eliminación suficiente de la portadora óptica en el proceso de extracción [9].
- *Multiplexación por división en longitud de onda (WDM)*. La etiqueta del paquete óptico se transmite por un canal óptico dedicado específicamente para este propósito en una [10] o múltiples longitudes de onda [11]. La ventaja que reporta esta técnica es la simplicidad a la hora de extraer/insertar la etiqueta en el nodo de conmutación de la red AOLS. Sin embargo como inconveniente está el incremento de ancho de banda al emplear varios canales ópticos para transmitir un paquete óptico.
- *Multiplexación por división de código óptico (OCDM)*. La etiqueta se inserta en el paquete óptico añadiendo separado en el tiempo la información de carga con un código específico que contiene la información de la etiqueta, tal como se propuso

en [12], [13]. Como desventaja está en que en el caso de que un canal soporte  $N$  OCDM códigos, se requiere de un banco de  $N$  autocorreladores por canal y una réplica del canal para cada uno de los autocorreladores. Además, el ancho de banda de transmisión se incrementa considerablemente debido a la propia anchura de banda de las señales OCDMA.

- *Multiplexación por modulaciones ortogonales.* Esta técnica se basa en insertar la etiqueta en la fase [14] o la frecuencia de la portadora óptica [15], mientras que la carga está modulada en amplitud. De este modo se aprovecha la ortogonalidad de la fase, la amplitud y la frecuencia de la señales del paquete óptico transmitido sobre la misma portadora óptica. Una de las desventajas de esta técnica es que la relación de extinción de la carga está limitado y no puede exceder de un cierto límite (3-4dB), a costa de que la modulación ortogonal afecte negativamente a la información de etiqueta, existiendo un compromiso entre la calidad de las señales de carga y etiqueta del paquete óptico.

Por tanto, la técnica de multiplexación de subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta (Subcarrier Multiplexed Label, SCML) es la que mejores prestaciones presenta de las anteriores en cuanto a: 1) sincronización temporal no crítica entre la carga y etiqueta del paquete óptico, 2) buena eficiencia espectral, 3) simplicidad de extracción de la etiqueta y/o carga del paquete óptico basándose en estructuras de prefiltrado óptico.

En la última década se han propuesto diferentes esquemas para poder llevar a cabo las funciones de generación de paquetes ópticos, extracción de etiqueta y/o carga del paquete, así como reescritura de la etiqueta, realizadas en los diferentes nodos que integran una red AOLS con tecnología SCML. Concretamente, se han propuesto estructuras basadas en moduladores electro-ópticos (EOM) ([5], [16], [17], [18], [19]) o de electroabsorción (EAM) ([20], [21]) para poder combinar la carga y la etiqueta eléctrica u ópticamente dentro de un paquete SCML. En lo que respecta a la reescritura de la etiqueta, se han propuesto esquemas basados en EOM [22], EAM [23] o amplificadores ópticos de semiconductor (Semiconductor Optical Amplifier, SOA) [24] para poder reescribir la nueva etiqueta en el paquete óptico. Por último, se han propuesto las técnicas de detección directa [25] y prefiltrado óptico para poder extraer la etiqueta y/o carga del paquete óptico. Se destaca que la técnica de prefiltrado óptico presenta mejores prestaciones respecto a la de detección directa ya que: 1) elimina completamente el efecto de supresión de portadora de la etiqueta, 2) reduce e incluso elimina las interferencias entre las señales de carga y etiqueta detectadas, 3) simplifica el esquema de detección al obtener las señales de carga y etiqueta directamente en banda base (en detección directa es necesario un proceso de demodulación de la etiqueta situada sobre la subportadora de radiofrecuencia para convertirla a banda base). Se han propuesto estructuras basadas en interferómetros Sagnac [26], filtro óptico Fabry Perot [25] y red de difracción de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) [27], [28] para poder realizar el prefiltrado óptico. La facilidad de diseño e implementación de FBG de altas prestaciones, junto a la flexibilidad a la hora de combinar electrónica u ópticamente las señales de carga y etiqueta del paquete a través del EOM sin chirp, hace que sean muy interesantes implementar estructuras de generación/escritura basadas en EOM y FBG, que consigan de forma simultánea generar varios paquetes con gran compactación espectral y eliminando las interferencias entre las señales que integran éstos.

## 1.2. Motivación.

Las redes de paquetes AOLS están siendo centro de atención y de investigación en los últimos años a través de proyectos de investigación tales como OPERA [29], KEOPS [5], IST-STOLAS [30], etc. En todos ellos se pretende el diseño e implementación de los nodos (transmisor, enrutador y detector) que integran la red AOLS empleando una de la técnicas de multiplexación de la carga y etiqueta del paquete óptico mencionadas previamente, así como la evaluación de las prestaciones de la mismo y verificación de las capacidades de enrutado de paquetes directamente en el dominio óptico para diversos servicios y formatos de paquete.

Es en este ámbito donde el grupo de comunicaciones ópticas y cuánticas (Optical and Quantum Communication Group, OQCG) de la Universidad Politécnica de Valencia ha liderado el proyecto IST-LABELS (Lightwave Architectures for the Processing of Broadband electronics Signals) cuyo objetivo es el diseño e implementación de un demostrador real de paquetes ópticos basado en tecnología SCML que permita enrutar directamente en el dominio óptico paquetes de datos eléctricos de 10Gb/s codificado en NRZ (carga) sobre una red todo óptica con conversión de longitud de onda. Concretamente, el trabajo de investigación realizado en esta tesis se enmarca dentro del paquete de trabajo 3 del proyecto IST-LABELS encargado del diseño, modelado e implementación de estructuras de generación, reescritura y detección de paquetes ópticos SCML, así como el diseño, implementación y validación de las funcionalidades de enrutado de paquetes ópticos del demostrador real AOLS WDM-SCML empleando dichas estructuras. En el proyecto LABELS se postulan una serie de hipótesis que han sido tenidas en cuenta a la hora de realizar esta tesis: 1) el empleo de la técnica SCML para multiplexar la información de carga y etiqueta en el paquete óptico, 2) uso del modulador electro-óptico como dispositivo encargado de realizar la modulación de la portadora óptica por la señal de datos y etiqueta para la generación/reescritura de paquetes ópticos SCML, 3) utilización de la técnica de prefiltrado óptico basado en FBG para la separación de la información de carga y etiqueta del paquete SCML en el nodo enrutador o en el nodo receptor de la red AOLS.

## 1.3. Objetivos de la tesis.

El objetivo general de la Tesis doctoral a desarrollar consiste en la propuesta, modelado matemático y validación experimental de estructuras de generación, reescritura y detección con prefiltrado óptico de paquetes ópticos basadas en la técnica de multiplexación por subportadora de radiofrecuencia para la etiqueta óptica del paquete (SCML), y que emplean moduladores electro-ópticos y redes de difracción de Bragg.

La consecución de dicho objetivo general conlleva la ejecución de una serie de objetivos de carácter más específico detallados a continuación:

- Desarrollo de un modelado analítico genérico de la fotocorriente detectada para estructuras de generación y reescritura de paquetes ópticos SCML basadas en EOM-FBG y detección por prefiltrado óptico basada en FBG. Obtención de los parámetros de calidad (Tasa de Error por Bit, Factor de Calidad, Apertura de ojos, Relación de Extinción) de la señales de carga y etiqueta que constituyen el paquete óptico

SCML detectado a partir de la expresión genérica de fotocorriente deducida en el modelo.

- Evaluación del modelo analítico genérico en el entorno Matlab® para configuraciones de interés, así como la validación del mismo contrastándolo con los resultados obtenidos mediante experimentos de laboratorio y el programa de simulación numérica comercial de sistemas ópticos VPI System<sup>TM</sup>.
- Propuesta y validación experimental de la mejora del factor de compactación espectral del paquete SCML a partir de la relación de la tasa de transmisión de la carga, frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta y ancho y desintonía de la FBG.
- Propuesta, diseño, fabricación y validación experimental de redes de difracción de Bragg de altas prestaciones basadas en configuraciones tipo Tandem y Array que permitan en las estructuras de generación, reescritura y detección de paquetes ópticos SCML: 1) minimizar las interferencias entre las señales que constituyen el paquete óptico SCML (carga y etiqueta) originadas en los procesos de generación y detección del mismo, 2) permitir la generación y reescritura de paquetes ópticos SCML que requieran un ancho de banda menor basándose en la transmisión de banda lateral única de etiqueta (Single Side Band - SCML, SSB-SCML), 3) permitir la generación, reescritura y detección de varios paquetes ópticos de forma simultánea.
- Diseño e implementación de un demostrador real de paquetes ópticos con tecnología SCML basado en estructuras de generación, reescritura y detección propuestas previamente.

## 1.4. Estructura de la tesis.

La estructura de la memoria de esta tesis se encuentra dividida en seis capítulos, organizados de la siguiente forma:

En el capítulo 1 *Introducción* se presenta el escenario donde se va a realizar la tesis, introduciendo las redes de paquetes todo ópticas con intercambio de etiqueta por multiplexación por subportadora de radiofrecuencia. A continuación se indica cual ha sido la motivación que ha originado la realización de esta tesis. Por último se muestra los objetivos perseguidos en esta tesis.

En el capítulo 2 *Modelado de paquetes ópticos basados en la técnica de Multiplexación por Subportadora de etiqueta para redes todo ópticas de intercambio de etiquetas* se realiza el estudio de las estructuras empleadas en la generación de paquetes ópticas basadas en un único modulador electroóptico o dos moduladores electroópticos con la configuración óptica paralela empleando la red de difracción de Bragg, así como detección empleando la técnica de prefiltrado óptico con FBG. Concretamente, se ha desarrollado un modelo matemático analítico de cada una de las configuraciones propuestas que permite determinar y cuantificar las degradaciones que sufre el paquete, así como evaluar la calidad de cada una de las señales que integran el paquete una vez detectadas en detección. Posteriormente se ha evaluado cada modelo para las configuraciones típicas de los moduladores electro-ópticos, así como la validación de los mismos comparando los resultados obtenidos con el modelo y con simulaciones realizadas a través del programa comercial VPI system<sup>TM</sup>.

En el *capítulo 3 Diseño de las características de las FBGs en la estructura de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con FBGs* se han obtenido las ecuaciones de diseño de las FBGs que permitan eliminar las distorsiones por la interferencia de las señales que integran el paquete óptico empleando la estructura de generación de paquetes de combinación óptica paralela con FBG.

En el *capítulo 4 Compactación espectral del paquete SCML en la estructura de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con FBGs* se realiza un estudio del grado de compactación espectral del paquete SCML empleando la estructura de generación por combinación óptica paralela con FBG, proponiendo estrategias que permitan aumentar dicho factor de compactación actuando sobre las características de la FBGs empleadas.

En el *capítulo 5 Diseño e implementación de un demostrador de red de conmutación de paquetes ópticos AOLS WDM-SCML* se ha diseñado e implementado un demostrador de red de conmutación de paquetes óptico AOLS WDM-SCML empleando la estructura de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con redes de difracción de Bragg de altas prestaciones basadas en configuraciones tipo tandem o array para implementar la generación, reescritura y detección de paquetes ópticos, donde se ha evaluado la calidad de los paquetes en distintos puntos del sistema, así como la verificación del funcionamiento de enrutado óptico de varios paquetes de forma simultánea.

Por último, en el *capítulo 6 Conclusiones y líneas futuras* se describe las conclusiones extraídas por el autor sobre este trabajo de tesis, así como las líneas futuras de trabajo originadas a partir del mismo.

## Capítulo 2

# Modelado de paquetes ópticos basados en la técnica de Multiplexación por Subportadora de etiqueta para redes todo ópticas de intercambio de etiquetas.

Este capítulo describe el modelado analítico de la fotocorriente detectada del paquete óptico SCML para diferentes estructuras de generación de paquetes ópticos SCML empleando el modulador electro-óptico (Electro-Optical Modulator, EOM) y la red de difracción de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG), así como detección por prefiltrado óptico basado en red de difracción de Bragg. También se obtiene los parámetros de calidad (factor de calidad, tasa de error por bit, apertura de ojos, relación de extinción) de las señales de carga y etiqueta que integran dicho paquete óptico SCML detectado, así como un parámetro de calidad del paquete a nivel global a partir de la expresión de la fotocorriente calculada anteriormente.

Para poder alcanzar este propósito, se proponen y analizan diferentes estructuras de nodo transmisor de paquetes SCML en función del número y configuración del modulador electro-óptico, así como de la forma en que las señales de carga y etiqueta son aplicadas a este dispositivo para que la combinación de ambas señales en el proceso de generación del paquete óptico SCML se realice en el dominio eléctrico u óptico. Concretamente, en la sección 2.1 se realiza el estudio de la estructura más simple de toda ellas consistente en el empleo de un único EOM en el nodo transmisor SCML. Posteriormente, otra estructura más compleja basada en la configuración paralelo de dos EOMs es analizada en la sección 2.2 para la obtención de paquetes SCML combinando la etiqueta y carga directamente en el dominio óptico. Una vez obtenida la expresión analítica cerrada para la fotocorriente detectada en cada una de las configuraciones, se procede a obtener los parámetros de calidad.

El estudio desarrollado en ambas estructuras toma como hipótesis de partida que los filtros eléctricos y la red de difracción de Bragg son ideales y con el ancho de banda necesario para no degradar la forma de la señal del paquete óptico SCML. Con esta primera aproximación, se pretende vislumbrar el origen y cuantificación de la degradación de la señal detectada, asociada fundamentalmente a la no linealidad de la respuesta P-V del modulador electro-óptico. Posteriormente, se realiza una ampliación del modelo

incluyendo los efectos de los filtros eléctricos y FBG no ideales, que originan la degradación de la señal detectada y alteran la forma de los bits de las señales de carga y etiqueta recuperadas.

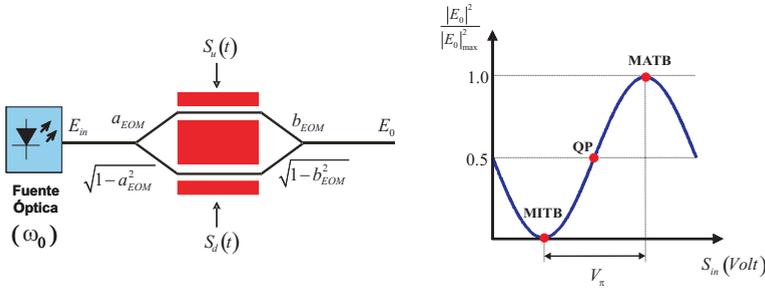
## 2.1. Modelado analítico del paquete óptico SCML empleando estructuras basadas en un único EOM y prefiltrado óptico con FBG.

### 2.1.1. Obtención de la fotocorriente detectada del paquete óptico SCML.

Esta sección describe la expresión analítica de la fotocorriente detectada cuando se emplea un único modulador electro-óptico para generar un paquete óptico SCML y una red de difracción de Bragg, mediante la técnica de técnica de prefiltrado óptico, para separar las informaciones de carga y etiqueta del paquete en el nodo receptor SCML.

Se parte de la expresión del campo eléctrico de la portadora óptica sin modular del canal óptico SCML en el puerto óptico de entrada del modulador electro-óptico (EOM) descrita como:

$$E_{in}(t) = |E_{in}|e^{j\omega_0 t} + c.c. \quad (2.1)$$



**Figura 2.1:** Esquema del modulador electro-óptico (EOM) y respuesta de la potencia óptica de salida frente a la tensión eléctrica aplicada (MITB: MInimum Transmission Bias, QP: Quadrature Point, MATB: MAXimum Transmission Bias)

El EOM se encarga de modular la portadora óptica por las señales aplicadas en sus terminales eléctricos de entrada. Así pues, ésta se puede expresar a la salida óptica del mismo de la siguiente forma [31]:

$$E_o(t) = \frac{|E_{in}|}{\sqrt{L_{EOM}}} [F_u e^{j\phi_u(t)} + F_d e^{jM\phi_d(t)}] e^{j\omega_0 t} + c.c \quad (2.2)$$

donde  $F_u = a_{EOM} \cdot b_{EOM}$  y  $F_d = \sqrt{1 - a_{EOM}^2} \cdot \sqrt{1 - b_{EOM}^2}$ , siendo los coeficientes  $a_{EOM}^2$  y  $b_{EOM}^2$  las fracciones de potencia óptica que son acoplados en cada uno de los brazos del EOM. El parámetro  $M$  hace mención a la configuración de los electrodos del EOM de forma que el cambio de fase en ambos brazos sea del mismo signo ( $M = 1$ ) u opuesto

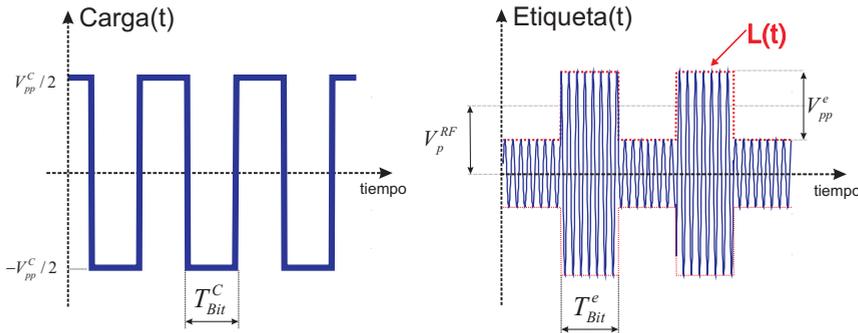
( $M = -1$ ). El parámetro  $\phi_i(t)$ , con  $i^1 = u$  o  $d$ , es el desfase óptico que sufre la portadora en el brazo superior o inferior del EOM, respectivamente. Éste está compuesto por dos términos, uno empleado para polarizar al EOM en un punto de su respuesta P-V,  $V_{Bias,i}$ , y otro asociado a la señal de información eléctrica a transmitir,  $S_i(t)$ , tal como viene descrito en la siguiente expresión:

$$\phi_i(t) = \frac{\pi}{V_{\pi DC}} V_{Bias,i} + \frac{\pi}{V_{\pi RF}} S_i(t) \quad (2.3)$$

En los sistemas que emplean tecnología SCML, la señal de información está compuesta por una señal de banda base (carga) y una señal banda base de enrutado óptico del paquete que se encuentra modulada en amplitud sobre una subportadora de radio-frecuencia (etiqueta) [Ref]. Éstas pueden describirse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Carga(t) &= V_{pp}^C \cdot (P(t) - 0,5) \\ Etiqueta(t) &= V_p^{RF} [1 + 2m_L (L(t) - 0,5)] \cos(w_{RF}t + \varphi) \end{aligned} \quad (2.4)$$

donde  $Carga(t)$  y  $Etiqueta(t)$  representan las señales de carga y etiqueta del paquete SCML aplicadas al EOM (ver figura 2.2).  $V_{pp}^C$  y  $V_{pp}^e$  son las tensiones de pico a pico de la señales de carga y etiqueta banda base respectivamente,  $m_L = V_{pp}^e / 2V_p^{RF}$  es el índice de modulación eléctrico de la etiqueta sobre la subportadora de radiofrecuencia,  $V_p^{RF}$ ,  $w_{RF}$  y  $\varphi$  son la amplitud de pico, frecuencia angular y fase de la subportadora de radiofrecuencia.  $P(t)$  y  $L(t)$  corresponden con las señales de datos de carga y etiqueta banda base que se transmiten en el paquete óptico. En este estudio se emplea un formato de no retorno a cero (Not Return to Zero, NRZ) para ambas señales, donde cada bit corresponde con un pulso cuadrado de amplitud 1 (bit uno) o 0 (bit cero) y duración para la carga,  $T_{Bit}^C$ , o etiqueta,  $T_{Bit}^e$ .



**Figura 2.2:** Señales de carga (izquierda) y etiqueta (derecha) del paquete óptico SCML aplicadas al EOM.

En una configuración general, ambas señales son aplicadas en los dos brazos (electrodos o puertos eléctricos) del EOM. Por tanto, la señal  $S_i(t)$  puede expresarse como:

$$S_i(t) = Carga_i(t) + Etiqueta_i(t) \quad (2.5)$$

<sup>1</sup> Para todas las expresiones empleadas en esta tesis, el subíndice "i" hace referencia al brazo o electrodo de la estructura interferométrica Mach-Zehner del EOM, siendo u (brazo superior) o d (brazo inferior)

siendo  $Carga_i(t) = C_{p,i} \cdot Carga(t)$  y  $Etiqueta_i(t) = C_{L,i} \cdot Etiqueta(t)$ , donde  $C_{p,i}$  y  $C_{L,i} \in [0, 1]$  son los coeficientes que representan la fracción de señal de carga y etiqueta que se aplica al puerto eléctrico de entrada "i" del EOM. Así por ejemplo, si se aplica la carga y etiqueta únicamente en el puerto eléctrico superior del EOM, los valores de dichos coeficientes para la carga son  $C_{p,u} = 1$  (brazo superior) y  $C_{p,d} = 0$  (brazo inferior), y para la etiqueta:  $C_{L,u} = 1$  (brazo superior) y  $C_{L,d} = 0$  (brazo inferior).

Sustituyendo la expresión 2.5 en la 2.3, la fase del brazo "i" del EOM se puede reescribir como:

$$\phi_i(t) = \pi \frac{V_{Bias,i}}{V_{\pi DC}} + \pi \cdot C_{p,i} \cdot A_{Pay}(t) + \pi \cdot C_{L,i} \cdot A_{Label}(t) \cdot \cos(w_{RF}t + \varphi_i) \quad (2.6)$$

donde

$$A_{Pay}(t) = OMI_p \cdot (P(t) - 0,5) \quad (2.7)$$

$$A_{Label}(t) = OMI_L \cdot [1 + 2m_L (L(t) - 0,5)] / [2(1 + m_L)] \quad (2.8)$$

Se define  $OMI_p = (V_{pp}^C / V_{\pi RF})$  como el índice de modulación óptica de la señal de carga aplicada al EOM. De forma análoga, se define un índice de modulación óptica para la señal de etiqueta como  $OMI_L = (2V_p^{RF} / V_{\pi RF}) [1 + m_L]$ . Se ha de puntualizar que las señales de carga y etiqueta compiten por el rango dinámico del EOM, por lo que debe existir el compromiso entre ambas,  $OMI_p + OMI_L \leq 1$ , para que no exista distorsiones adicionales por recorte de la señal (clipping [32]) cuando esta supera el total del margen dinámico del modulador,  $V_{\pi}$ , suponiendo que el EOM está polarizado en el punto de cuadratura,  $QP$ , de su respuesta P-V (ver figura 2.1). En la figura 2.2 se observa como las señales  $P(t)$  y  $L(t)$  varían con el tiempo. Sin embargo se toma como hipótesis en esta sección que ambas se modelan por dos valores constantes 0 o 1, asociados al bit cero o uno respectivamente. El objetivo de este estudio es obtener el valor de la fotocorriente detectada en el instante de muestreo óptimo, que en el caso de emplear un formato NRZ corresponde con la mitad del tiempo de bit. Si se supone que los dispositivos empleados presentan unas respuestas frecuenciales ideales que no alteran la forma de los pulsos de las señales de carga y etiqueta, éstos continuarán siendo cuadrados y el valor de cada pulso en dicho instante de muestreo corresponderá con los valores constantes asociados a los bits uno o cero. De esta forma queda justificada la hipótesis de partida de considerar valores constantes para las señales de carga y etiqueta. Posteriormente, en la subsección 2.1.4 se incorporan las respuestas frecuenciales no ideales de los dispositivos, completando el modelo desarrollado en esta sección con la inclusión de unos coeficientes correctores que permitan modelar los efectos originados por este hecho, tales como la interferencia entre símbolos (Inter Symbol Interference, ISI).

Sustituyendo la expresión 2.6 en la 2.2 obtenemos que el campo eléctrico del canal óptico SCML en el puerto óptico de salida del EOM (puerto de salida de la etapa de generación de paquetes SCML en el nodo transmisor SCML) puede describirse en el dominio del tiempo como:

$$E_o(t) = \frac{|E_{in}| e^{j\omega_o t}}{\sqrt{L_{EOM}}} \left\{ \begin{aligned} &F_u e^{jA_u} e^{j\pi \cdot C_{L,u} \cdot A_{Label} \cos(w_{RF}t + \varphi_u)} + \\ &+ F_d e^{jM A_d} e^{jM \pi \cdot C_{L,d} \cdot A_{Label} \cos(w_{RF}t + \varphi_d)} \end{aligned} \right\} + c.c. \quad (2.9)$$

siendo  $A_i = A_{Bias,i} + \pi \cdot C_{p,i} \cdot A_{Pay}$  el desfase asociado a la tensión de polarización ( $A_{Bias,i} = \pi V_{Bias,i} / V_{\pi DC}$ ) y señal de carga ( $\pi \cdot C_{p,i} \cdot A_{Pay}$ ) aplicadas por el brazo "i" del EOM. En la expresión 2.9 únicamente se puede identificar que las fases de los campos eléctricos propagados sobre los brazos superior e inferior de la estructura interferométrica del

EOM son modulados por las señales de carga y etiqueta aplicadas en los puertos eléctricos de entrada del EOM simultáneamente. Sería interesante poder extraer información de la expresión 2.9 sobre cómo las señales de carga y etiqueta se encuentran distribuidas espectralmente respecto a la portadora del canal óptico. Una buena estrategia para conseguirlo es a través de la utilización de las funciones de Bessel (identidad de Jacobi-Anger [33], [34]) y transformada de Fourier. Así pues, utilizando la identidad de Jacobi-Anger, la ecuación 2.9 se puede reescribir como:

$$E_o(t) = \frac{|E_{in}| e^{j\omega_o t}}{\sqrt{L_{EOM}}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k [F_u e^{jA_u} J_{k,u} e^{jk(w_{RF}t + \varphi_u)} + F_d e^{jMA_d} M^k J_{k,d} e^{jk(w_{RF}t + \varphi_d)}] + c.c. \quad (2.10)$$

donde  $J_{k,i} = J_k(\pi \cdot C_{L,i} \cdot A_{Label})$  es la función de Bessel de primera especie de orden  $k$  ( $k$  es un número entero). Este término representa la contribución de la etiqueta aplicada en el puerto eléctrico "i" del EOM y situado a la frecuencia angular  $k w_{RF}$  respecto a la central del canal SCML,  $w_0$ . Si a continuación se aplica la transformación de Fourier a la expresión 2.10, se obtiene dicho campo en el dominio de la frecuencia:

$$E_o(w) = \frac{2\pi |E_{in}|}{\sqrt{L_{EOM}}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k [F_u J_{k,u} e^{j(A_u + k\varphi_u)} + F_d M^k J_{k,d} e^{j(MA_d + k\varphi_d)}] \delta(w - (w_0 + k w_{RF})) + c.c \quad (2.11)$$

En la ecuación 2.11 se muestra el caso general del espectro del paquete óptico modulado sobre la portadora del canal óptico SCML,  $w_0$ . Se puede identificar la existencia de términos localizados sobre la propia portadora  $w_0$  (términos del sumatorio cuando  $k=0$ ) como en múltiplos de la frecuencia angular de la subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta  $w_0 + k w_{RF}$ , con  $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ , respecto de la frecuencia angular central del canal óptico SCML. Cada uno de los mismos está compuesto por las contribuciones de los datos de carga ( $A_i$ ) y etiqueta ( $J_{k,i}$ ) aplicados en los dos brazos del EOM (ver figura 2.3)<sup>2</sup>. Tal como se analizará en la subsección 2.1.3, en función de la configuración concreta empleada a la hora de aplicar las señales de carga y etiqueta en los terminales eléctricos del EOM, las contribuciones de carga y etiqueta, que integran cada uno de los términos situados en las frecuencias angulares  $w_0 + k w_{RF}$  del canal óptico, podrán existir o no, así como la combinación de los mismos originarán una modulación de amplitud y/o fase (chirp) de los datos de carga y/o etiqueta sobre cada término situado en  $w_0 + k w_{RF}$ .

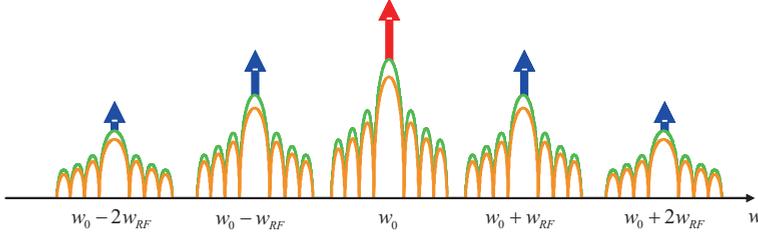
El campo eléctrico de salida del EOM es transmitido a lo largo del enlace óptico de fibra óptica hasta el nodo receptor SCML. Así pues, el campo eléctrico del canal óptico SCML en la entrada óptica de la etapa de detección del nodo receptor SCML puede ser expresado como:

$$E_{Rx}(w) = E_o(w) \cdot H_{fibra}(w) \quad (2.12)$$

donde  $H_{fibra}(w) = e^{(\alpha(w)/2 + j\beta(w)z)}$  es la respuesta frecuencial del enlace de fibra óptica.  $\alpha(w) [Np/Km]$ <sup>3</sup> es el coeficiente de atenuación óptico de la fibra óptica a la frecuencia

<sup>2</sup> Los paquetes espectrales de carga y etiqueta localizados sobre las frecuencias angulares  $w_0 + k w_{RF}$ , con  $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ , se convierten en deltas en el espectro del canal óptico al haber tomado como hipótesis que las señales de carga  $P(t)$  y etiqueta  $L(t)$  toman únicamente valores constantes 1 o 0, según sea el bit transmitido uno o cero.

<sup>3</sup>  $\alpha [dB/Km] = 10 \log_{10}(e) \cdot \alpha [Np/Km]$



**Figura 2.3:** Distribución espectral del campo eléctrico de un paquete óptico SCML a la salida de un EOM en su configuración general. Portadora óptica (rojo) en  $w_0$ , términos compuesto por las componentes de carga y etiqueta aplicadas en el brazo superior  $e^{jA_u} \cdot J_{k,u} \cdot e^{j(w_0 + kw_{RF})t}$  (naranja) e inferior  $e^{jMA_d} \cdot J_{k,d} \cdot e^{j(w_0 + kw_{RF})t}$  (verde) situados sobre múltiplos de la subportadora de etiqueta  $w_0 + kw_{RF}$ , con  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

angular  $w$ ,  $\beta(w)$ <sup>4</sup> es la constante de propagación de la fibra a la frecuencia angular  $w$  y  $z$ [Km] es la longitud del enlace de fibra.

A continuación, dos procesos son necesarios para recuperar los datos de carga y etiqueta banda base del paquete óptico SCML en el nodo receptor SCML. Concretamente, estas dos etapas son: 1) la etapa de prefiltrado óptico encargada de separar ópticamente los datos de carga y etiqueta del paquete óptico SCML mediante la técnica de prefiltrado óptico basada en la red de difracción de Bragg [27], [9]. 2) la etapa de detección directa de la señal óptica de entrada mediante dispositivos fotodetectores, PIN o APD. Posteriormente, se realiza un filtrado eléctrico paso bajo de la señal fotodetectada para quedarse únicamente con la componente banda base de la misma.

El campo eléctrico del canal óptico SCML a la salida del módulo de prefiltrado óptico se expresa a través de la respuesta de la FBG de la siguiente forma:

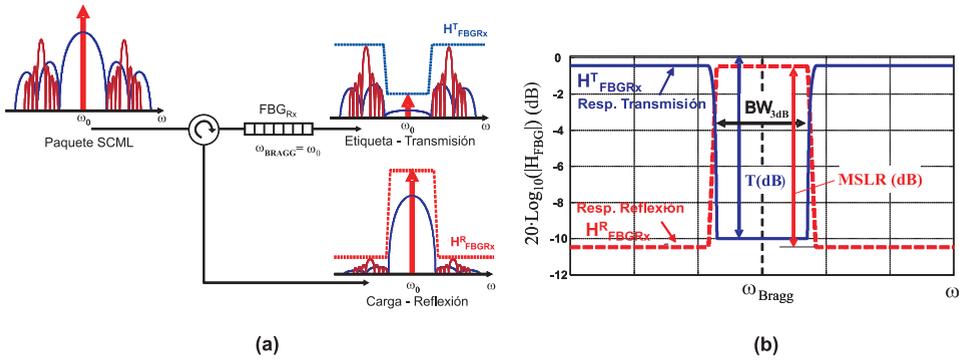
$$E_{ph}^{in}(w) = E_{Rx}(w) \cdot H_{FBG_{Rx}}(w) \quad (2.13)$$

donde  $H_{FBG_{Rx}}(w) = |H_{FBG_{Rx}}(w)| e^{j\phi_{FBG_{Rx}}(w)}$  es la respuesta en frecuencia de la FBG empleada en el receptor,  $FBG_{Rx}$ . En la parte de la izquierda de la figura 2.4 se representa el módulo de las respuestas de reflexión y transmisión de la  $FBG_{Rx}$  ideal. Se definen los siguientes parámetros de la  $FBG_{Rx}$  que serán de interés en el estudio posterior: frecuencia angular central de la banda de paso en reflexión o de rechazo en transmisión ( $w_{BRAGG}$ ), anchura de la banda de paso cuando la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  cae 3dB ( $BW_{3dB}$ ), pendiente del flanco de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la FBG (*Roll-off*), coeficiente de rechazo en el centro de la banda eliminada de la respuesta de transmisión de la FBG ( $T$ ) y el coeficiente  $MSLR$  (Main to Secondary Lobe Ratio) definido como el cociente entre la respuesta dentro y fuera de la banda de paso en reflexión. Por último, cabe recordar que existe una relación entre las respuestas de reflexión ( $H_{FBG}^R(w)$ ) y transmisión ( $H_{FBG}^T(w)$ ) para cualquier frecuencia angular de una FBG, tal que  $H_{FBG}^R(w) + H_{FBG}^T(w) = 1$  [35].

La recuperación de los datos de la señal eléctrica de carga o etiqueta del paquete SCML depende del puerto de salida del módulo de prefiltrado óptico basado en FBG que se elija

<sup>4</sup> La constante de propagación de la fibra óptica se puede expresar a través del desarrollo de Taylor centrada en la pulsación  $w_0$ , considerando que  $w - w_0 \ll w_0$ , como  $\beta(w) \approx \beta_0 + \beta_1 \cdot (w - w_0) + 1/2 \cdot \beta_2 \cdot (w - w_0)^2 + 1/6 \cdot \beta_3 \cdot (w - w_0)^3 + \dots$ , donde  $\beta_m = (d^m \beta / dw^m)_{w=w_0}$

(transmisión o reflexión). Para un caso general, la señal de carga es recuperada a través del puerto de salida de reflexión (respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ ,  $H_{FBG_{Rx}}(w) = H_{FBG_{Rx}}^R(w)$ ) y la señal de etiqueta mediante el puerto de transmisión (respuesta de transmisión de la FBG,  $H_{FBG_{Rx}}(w) = H_{FBG_{Rx}}^T(w)$ ) de la  $FBG_{Rx}$ , tal como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4:** (a) Esquema del módulo de prefiltrado óptico basado en red de difracción de Bragg ( $FBG_{Rx}$ ) y (b) respuesta frecuencial de la  $FBG_{Rx}$  en transmisión y reflexión ( $T = 10dB$ ,  $MSLR = 10dB$ ).

El campo eléctrico del canal óptico a la entrada del fotodetector se obtiene sin más que sustituir las expresiones 2.11 y 2.12 en 2.13, tal como se describe en 2.14:

$$E_{ph}^{in}(w) = \frac{2\pi |E_{in}|}{\sqrt{L_{EOM}}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k \left\{ \begin{aligned} & [F_u J_{k,u} e^{j(A_u+k\varphi_u)} + F_d M^k J_{k,d} e^{j(MA_d+k\varphi_d)}] \cdot \\ & \cdot H_{Opt,k} \cdot \delta(w - (w_0 + kw_{RF})) \end{aligned} \right\} + c.c \quad (2.14)$$

donde  $H_{Opt,k}$  es la función de transferencia de la cascada de las respuestas frecuenciales del enlace de fibra óptica y la  $FBG_{Rx}$  ( $H_{Opt}(w) = H_{fibra}(w) \cdot H_{FBG_{Rx}}(w)$ ) a la frecuencia angular  $w = w_0 + kw_{RF}$ . A continuación se aplica la Transformada Inversa de Fourier a la ecuación 2.14 para expresarla en el dominio del tiempo, consiguiendo en este caso:

$$E_{ph}^{in}(t) = \frac{|E_{in}|}{\sqrt{L_{EOM}}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k [F_u J_{k,u} e^{j(A_u+k\varphi_u)} + F_d M^k J_{k,d} e^{j(MA_d+k\varphi_d)}] \cdot H_{Opt,k} \cdot e^{j(w_0+kw_{RF})t} + c.c \quad (2.15)$$

Por último, el fotodetector convierte el campo eléctrico del canal óptico SCML (ec. 2.15) en una corriente eléctrica. Ésta se puede obtener a través del proceso de conversión optoelectrónica descrito a través de la siguiente expresión:

$$i_{ph}(t) = \Re \left\{ |E_{ph}^{in}(t)|^2 \right\} \quad (2.16)$$

donde  $\Re$  es la Responsividad del fotodetector. Tal como ha sido explicado previamente en el capítulo, únicamente es necesaria la componente banda base de la fotocorriente obtenida para recuperar los datos de carga y/o etiqueta del paquete óptico SCML detectado cuando se emplea la técnica de prefiltrado óptico. Así pues, sustituyendo la ecuación 2.15 en 2.16 se obtiene la siguiente expresión de la componente banda base de la fotocorriente :

$$i_{ph}(t_n)|_{BB} = \frac{\Re|E_{in}|^2}{L_{EOM}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} [F_u^2 |J_{k,u}|^2 + F_d^2 |J_{k,d}|^2 + 2F_u F_d J_{k,u} J_{k,d} \cos(\psi_A)] \cdot |H_{Opt,k}|^2 \quad (2.17)$$

donde  $\psi_A = \pi A_{Pay}(C_{p,u} - M \cdot C_{p,d}) + \pi V_{Bias}/V_{\pi DC} + k(\Delta\varphi_{ud} + (1-M)\pi/2)$ , siendo  $V_{Bias} = V_{Bias,u} - M \cdot V_{Bias,d}$  la tensión total de polarización aplicada al EOM y  $\Delta\varphi_{ud} = \varphi_u - \varphi_d$  el desfase eléctrico de la subportadora de RF de etiqueta aplicada entre las entradas eléctricas superior ( $\varphi_u$ ) e inferior ( $\varphi_d$ ) del EOM. Así pues, la ecuación 2.17 presenta una expresión analítica de la componente banda base de la fotocorriente eléctrica detectada, muestreada en un instante  $t_n$  (mitad del tiempo de bit para señales con formato NRZ), para la configuración general de un transmisor de paquetes SCML basado en un único modulador electro-óptico (las señales de carga y etiqueta del paquete óptico son aplicadas en ambos puertos eléctricos de entrada del EOM) y detección del mismo empleando la técnica de prefiltrado óptico basada en FBG en el receptor. Ésta se encuentra compuesta por una serie de términos que serán necesarios analizar para determinar cuales corresponden a la señal que se desea recuperar (carga o etiqueta), o por lo contrario, si contribuyen a la degradación de la misma. A continuación se extraen las siguientes conclusiones generales:

1. El proceso de detección origina que la componente de banda base de la fotocorriente esté compuesta tanto por los datos que se encontraban modulados en banda base sobre la portadora óptica del canal,  $w_0$ , como aquellos que se localizaban en múltiplos de la subportadora de radiofrecuencia con respecto a la misma,  $w_0 + kw_{RF}$ , con  $k \neq 0$ . Concretamente, éstos corresponden con los términos de la expresión 2.17 cuando  $k = 0$  y  $k \neq 0$  respectivamente.
2. Cada término descrito en la ecuación 2.17 contiene información sobre el tipo de señal (carga o etiqueta), la configuración empleada a la hora de aplicarlas en el EOM de la etapa de generación del transmisor SCML y la procedencia del mismo. Concretamente, en cada término se tiene:
  - Las contribuciones de los datos de carga y etiqueta vienen identificados a través de  $C_{p,i}A_{pay}$  y  $J_{k,i}$  respectivamente. Además, el índice 'i' muestra que dichos datos han sido aplicados en el puerto eléctrico de entrada 'i' del EOM.
  - Las contribuciones  $J_{k,i}$  representan los datos de etiqueta modulados a la frecuencia angular  $kw_{RF}$  respecto a la central del canal  $w_0$  a la salida del EOM. Así pues, los términos de los datos de etiqueta modulados sobre la frecuencia angular fundamental de la subportadora de radiofrecuencia respecto a la portadora del canal óptico  $w_0 \pm w_{RF}$  ( $J_{\pm 1,i}$ ) aparecen en la expresión 2.17. Sin embargo, aparecen otras contribuciones de etiqueta adicionales que contribuyen a distorsionar la señal recuperada y originadas por la no linealidad de la respuesta P-V del modulador electro-óptico. Concretamente éstas corresponden con los términos de etiqueta localizados en banda base sobre la propia portadora del canal óptico en  $w_0$  ( $J_{0,i}$ ), y otros términos situados en múltiplos de la frecuencia angular fundamental de la subportadora de radiofrecuencia respecto a la central del canal óptico  $w_0 + kw_{RF}$  ( $J_{k,i}$ ) con  $k = \pm 2, \pm 3, \dots, \infty$ .
  - Las contribuciones de los datos de carga,  $C_{p,i}A_{pay}$ , se encuentran combinadas con las contribuciones de etiqueta,  $J_{k,i}$ , localizadas en múltiplos de la subportadora de radiofrecuencia  $kw_{RF}$ , con  $k = \pm 1, \pm 2, \dots, \infty$  respecto a portadora

del canal SCML. Tal como se verá en la subsección 2.1.3, esto puede originar que en determinadas configuraciones aparezcan interferencias entre la carga y la etiqueta imposibles de eliminar con la técnica de prefiltrado óptico.

3. La recuperación de los datos de carga o etiqueta del paquete óptico se consigue seleccionando uno de los dos puertos de salida de la etapa de prefiltrado óptico basada en FBG (reflexión o transmisión), tal como se ha mencionado previamente. Así pues, los coeficientes  $H_{Opt,k}$  toman unos valores concretos en función de la respuesta asociada al puerto seleccionado de la  $FBG_{Rx}$  (reflexión o transmisión). Esto ocasiona que algunos de los términos que aparecen en la expresión general se reduzcan, o incluso eliminen, minimizando la interferencia en los datos recuperados. Así pues:
  - La señal de datos de carga se recupera empleando el puerto de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ , tal como se muestra en la figura 2.4. Ésta corresponde con el tercer término de la expresión 2.17 cuando  $k = 0$ . En este caso, existen unos términos asociados a la etiqueta que contribuyen a degradar la señal de carga detectada. Concretamente, éstos corresponden con las contribuciones de etiqueta localizados sobre la propia portadora óptica,  $J_{0,i}$ , así como en las frecuencias angulares  $w_0 + kw_{RF}$ ,  $J_{k,i}$ , con  $k \neq 0$ , incluidos en todos los términos de la ecuación 2.17 cuando  $k = 0$  y  $k \neq 0$  respectivamente. Analizando dichos términos, se deduce que los primeros no pueden ser eliminados al encontrarse mezclados con la información de carga detectada. Sin embargo, los términos  $J_{k,i}$ , con  $k \neq 0$ , si se pueden eliminar en el caso de emplear una  $FBG_{Rx}$  cuya respuesta de reflexión sea tal que  $H_{FBG_{Rx},k}^R \Rightarrow 0$  para  $k \neq 0$ .
  - Los datos de la señal de etiqueta son recuperados a través del puerto de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ , tal como se muestra en la figura 2.4. En este caso, las contribuciones de carga banda base que se encuentran mezcladas con los de etiqueta (tercer de la expresión 2.17) originan una degradación sobre la etiqueta detectada. De todos ellos, únicamente es factible eliminar aquel que se encuentra modulado en banda base sobre la portadora óptica  $w_0$  (tercer término cuando  $k = 0$ ) sin más que emplear una  $FBG_{Rx}$  cuya respuesta en transmisión sea tal que  $H_{FBG_{Rx},k}^T \Rightarrow 0$  para  $k = 0$ . Como se estudiará en la subsección 2.1.3, los términos interferentes de carga modulados en  $w_0 + kw_{RF}$ , cuando  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , pueden no existir en función de cómo se apliquen las señales de carga y etiqueta en los terminales eléctricos de entrada del EOM.

Como conclusión se puede afirmar que la elección de las características de las respuestas de reflexión y transmisión de la  $FBG_{Rx}$  son cruciales para minimizar las interferencias existentes entre la carga y etiqueta en el proceso de detección.

### 2.1.2. Cálculo de la calidad del paquete óptico SCML

A la hora de determinar la viabilidad de un sistema de telecomunicación es necesario realizar un diseño de todos sus componentes de forma que la información transmitida satisfaga determinados parámetros de calidad cuando es procesada en el receptor. Los parámetros de calidad analizados dependerán de la naturaleza de la señal transmitida por el sistema. En el caso de las redes de paquetes ópticos con tecnología SCML, cada paquete SCML está compuesto por una señal de datos de carga o payload (información a transmitir por la red óptica AOLS-SCML) multiplexada en frecuencia con una señal

de datos de etiqueta o label (información requerida para el enrutado del paquete de carga a lo largo de la red AOLS-SCML). En este estudio se ha considerado que ambas señales emplean un formato digital NRZ con unas tasas de velocidad  $BR_p = 1/T_{Bit}^C$  y  $BR_L = 1/T_{Bit}^e$  bit/seg. respectivamente. Aunque el estudio se ha realizado para la señal NRZ, se puede generalizar este estudio a otro formato como por ejemplo Retorno a Cero (Return to Zero, RZ), siempre que se elija en detección los instantes de muestreo óptimos asociados al formato utilizado.

La evaluación de la calidad del paquete óptico SCML se va a realizar tanto individualmente para cada una de las dos señales (carga y etiqueta) que integran el paquete óptico como globalmente para todo el paquete óptico. El sentido de esta doble evaluación radica en la necesidad de ser capaz de: 1) determinar la calidad de cada una de las señales y la evolución de las mismas por separado en función de cada uno de los parámetros asociados a los dispositivos del sistema, 2) disponer de un parámetro de calidad del paquete SCML global que identifique la configuración de los dispositivos del sistema tal que permita conseguir la calidad óptima del paquete. Se procede de esta forma, ya que puede darse el caso de que la calidad óptima no coincida con el máximo de las calidades de las dos señales del paquete por separado o que incluso una de las señales detectadas cumpla los requisitos de calidad mientras que la otra no.

La calidad individual de las señales de carga y etiqueta que integran el paquete óptico SCML se realiza a través de los parámetros de calidad definidos para señales digitales [36]: Probabilidad de Error (Bit Error Rate, BER), Factor de calidad (Quality Factor, QF), Relación de Extinción (Extinction Rate, ER) o Apertura del Ojo (Eye Opening, EO)<sup>5</sup>. Para el caso de la calidad global del paquete SCML, se define un nuevo parámetro conocido como Figura de Mérito del paquete SCML,  $FM_{SCML}$ , a partir de los factores de calidad de carga y etiqueta individuales.

En este apartado se describe el proceso seguido para la obtención de los parámetros de calidad mencionados en el párrafo anterior a partir de la expresión de la fotocorriente detectada,  $i_{ph-BB}$ , deducida en la ecuación 2.17. Ésta está compuesta por términos asociados a las contribuciones de carga y etiqueta.

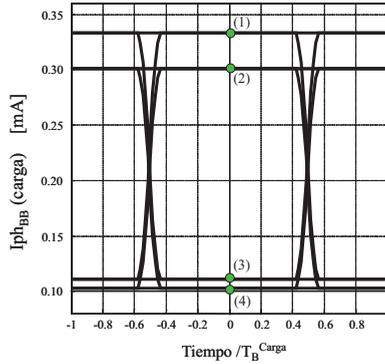
En la figura 2.5 se muestra el diagrama de ojos genérico de  $i_{ph-BB}$  para la señal de carga recibida (empleando la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ ) en función de los valores que tomen las señales de carga y etiqueta en ese instante de muestreo  $t = t_n$ . Por lo tanto, ésta puede describirse en ese instante de la siguiente forma:

$$i_{ph-BB}|_{P=a}^{L=b} \quad (2.18)$$

donde  $P$  y  $L$  corresponden a las dos señales digitales NRZ de carga y etiqueta del paquete SCML genérico. Las constantes  $a$  y  $b$  son los valores de los bits de las señales  $P$  y  $L$  en ese instante, respectivamente.

En el modelo estadístico empleado para determinar el parámetro de calidad de la señal de carga o etiqueta, se ha considerado una señal de datos (fotocorriente  $i_{ph-BB}$ ) compuesta por la suma de dos señales digitales NRZ,  $P$  y  $L$ , independientes e incorrelados entre sí y con funciones de densidad de probabilidad discreta compuesta por dos símbolos (0 o 1) equiprobables, a la que se le añade una señal de ruido en el receptor asociado a varias fuentes de ruido adicionales, independientes entre sí y con función de densidad de probabilidad gaussiana. Siguiendo el estudio típico para estos casos [37], se procede a determinar los siguientes parámetros de calidad para cada una de las señales que integran

<sup>5</sup> En el anexo A.2 se detalla el proceso seguido para la obtención de las expresiones que definen estos parámetros en el caso de señales con formato NRZ.



**Figura 2.5:** Diagrama de Ojos de la fotocorriente detectada para la señal carga (sin fuentes de ruido adicionales). Los valores obtenidos con la expresión en el instante de muestreo a mitad de bit  $t = 0$  cuando la carga y etiqueta son: (1)  $P=1$  y  $L=0$ , (2)  $P=1$  y  $L=1$ , (3)  $P=0$  y  $L=0$ , (4)  $P=0$  y  $L=1$ .

el paquete SCML. A continuación se va a calcular los parámetros de calidad de la señal de carga,  $P$ , siendo el cálculo para los de la etiqueta  $L$ , de forma similar.

**Factor de Calidad (QF) y Probabilidad de Error por Bit el (BER) de la señal de carga del paquete óptico SCML**

Para el cálculo del factor de calidad QF de la señal de carga se va a hacer uso de la expresión deducida en el anexo A.2<sup>6</sup>. En el caso de un paquete SCML, el factor de calidad de la señal de carga detectada del paquete SCML recibido se puede obtener a través de la siguiente expresión:

$$QF_p = \frac{\langle I_{p,1} \rangle - \langle I_{p,0} \rangle}{\sigma_{p,1} + \sigma_{p,0}} \tag{2.19}$$

donde  $\langle I_{p,k} \rangle$  y  $\sigma_{p,k}$ , con  $k = 0$  o  $1$ , representan el valor medio y la desviación típica de la fotocorriente detectada cuando el bit transmitido de la señal de carga  $P$  toma el valor  $k$  ( $k = 0$  o  $1$ ). La expresión que describe a  $\langle I_{p,k} \rangle$  se puede obtener a partir del diagrama de ojos como:

$$\langle I_{p,k} \rangle = \frac{i_{ph-BB}|_{P=k}^{L=1} + i_{ph-BB}|_{P=k}^{L=0}}{2} \tag{2.20}$$

donde  $k$  representa al valor del bit de la señal de carga,  $P$ , transmitida (1 o 0).

Para el cálculo de la varianza  $\sigma_{p,k}^2$  hay que tener en cuenta que en el caso que el bit  $P$  de la señal de carga transmitida tome el valor  $k$  ( $k = 0$  o  $1$ ), la señal de etiqueta  $L$  es una señal NRZ aleatoria discreta donde cada bit puede tomar los valores 0 o 1. Tal como se ha mencionado anteriormente, adicionalmente se han añadido varias fuentes de ruido en el receptor (ruido shot, ruido térmico y ruido de oscuridad del fotodetector). Así pues, ésta se puede expresar como:

<sup>6</sup> Se han considerado que todas las fuentes de ruido tienen distribución gaussiana y son independientes, las señales son NRZ aleatorias con símbolos equiprobables y se ha elegido un nivel óptimo de umbral en el comparador empleado al muestrear en el receptor.

$$\sigma_{p,k}^2 = \sigma_{XTalk-p,k}^2 + \sigma_{Th-p,k}^2 + \sigma_{Shot-p,k}^2 + \sigma_{Osc-p,k}^2 \quad (2.21)$$

donde:

- $\sigma_{XTalk-p,k}$  representa la contribución de ruido asociado a la interferencia que produce la señal de etiqueta  $L$  sobre la carga  $P$  del paquete óptico. Esta se define matemáticamente como:

$$\sigma_{XTalk-p,k} = \frac{|i_{ph-BB}|_{P=k}^{L=1} - i_{ph-BB}|_{P=k}^{L=0}|}{2} \quad (2.22)$$

- $\sigma_{Th-p,k}$  es la contribución asociado al ruido térmico de los dispositivos electrónicos del receptor. Ésta se puede expresar a través de la siguiente fórmula:

$$\sigma_{Th-p,k} = NEP\sqrt{BW_{Rx}} \quad (2.23)$$

donde  $NEP$  representa a la Densidad Espectral de Ruido asociado al receptor [  $A/\sqrt{Hz}$  ] y  $BW_{Rx}$  [Hz] el ancho de banda eléctrico del receptor empleado.

- $\sigma_{Shot-p,k}^2$  corresponde a la contribución por el ruido shot asociado al propio proceso de detección óptica en el fotodetector y que viene expresada de la siguiente forma:

$$\sigma_{Shot-p,k} = 2e < I_{p,k} > BW_{Rx} \quad (2.24)$$

donde  $e$  representa la carga del electrón  $e = 1,60217646 \cdot 10^{-19}$  C y  $BW_{Rx}$  [Hz] el ancho de banda eléctrico del receptor.

El cálculo de la Probabilidad de Error por Bit, BER, de la señal de carga del paquete SCML detectado se puede obtener a partir del parámetro  $QF_p$  utilizando la expresión A.13.

### Relación de Extinción de la señal de carga del paquete óptico SCML

Para el cálculo de la Relación de Extinción, ER, de la señal de carga se va a hacer uno de la expresión A.15 deducida en el anexo A. En este caso, ésta se puede expresar como:

$$ER_p = \frac{< I_{p,0} >}{< I_{p,1} >} \quad (2.25)$$

### Apertura del Ojo de la señal de carga del paquete óptico SCML

El cálculo se la Apertura del Ojo, OE, de la señal de carga se puede obtener directamente a partir la siguiente expresión:

$$OE_p = \min \left( i_{ph-BB}|_{P=1}^{L=1}, i_{ph-BB}|_{P=1}^{L=0} \right) - \max \left( i_{ph-BB}|_{P=0}^{L=1}, i_{ph-BB}|_{P=0}^{L=0} \right) \quad (2.26)$$

### Figura de Mérito del paquete SCML.

En un paquete óptico SCML se transmiten simultáneamente dos señales (carga y etiqueta), de forma que se debe asegurar que ambas señales cumplen individualmente unos umbrales de calidad. Como se verá posteriormente, puede darse la circunstancia de que cuando se configuran los parámetros del transmisor y/o receptor del sistema, como por ejemplo los niveles de las señales de carga o etiqueta, origine una mejora de la calidad de una de las señales en contraposición con el empeoramiento de la calidad de la otra, estableciéndose relaciones de compromiso. Esto origina la necesidad de definir un parámetro que recoja simultáneamente la calidad de ambas señales, permita identificar de forma rápida si ambas señales cumplen sus mínimos de calidad, así como determinar cuáles son los valores óptimos de los niveles de carga y etiqueta que permite maximizar la calidad del paquete globalmente. Para tal fin, se ha definido el parámetro Figura de Mérito del paquete SCML,  $FM_{SCML}$ , descrita a través de la siguiente expresión:

$$FM_{SCML} = \left[ \left( \frac{Q_{F_P}}{Q_{F_P}^{m\acute{a}x}} \right) u(Q_{F_P} - Q_{F_P}^u) \right] \left[ \left( \frac{Q_{F_L}}{Q_{F_L}^{m\acute{a}x}} \right) u(Q_{F_L} - Q_{F_L}^u) \right] \quad (2.27)$$

Este parámetro está constituido por dos miembros asociados a la calidad individual de cada una de las dos señales que integran el paquete óptico. Concretamente, el miembro correspondiente a la señal  $x$  ( $x = P$  o  $L$ , según sea la señal de carga o etiqueta respectivamente) está integrado por:

- El factor de calidad de la señal  $x$ ,  $Q_{F_x}$ , definido en la expresión 2.19, normalizado al valor máximo del mismo,  $Q_{F_x}^{m\acute{a}x}$ , siendo éste último con el obtenido en el caso de transmitir únicamente dicha señal por el sistema. Este cociente permite cuantificar la degradación que produce la otra señal del paquete sobre la señal  $x$ .
- La función  $u(Q_{F_x} - Q_{F_x}^u)$  que toma valor uno cuando su argumento es mayor o igual a cero, y cero en caso contrario. Esta servirá para discernir cuando la señal  $x$  supera un umbral de calidad, definido a través de  $Q_{F_x}^u$ . En esta tesis se tomará como umbral  $Q_{F_x}^u = 6$ , que corresponde con un  $BER = 10^{-9}$  [36].

Así pues, el parámetro  $FM_{SCML}$  está definido en el margen  $[0,1]$ , siendo cero cuando alguna o ambas señales del paquete SCML presentan una calidad menor a su umbral definido.

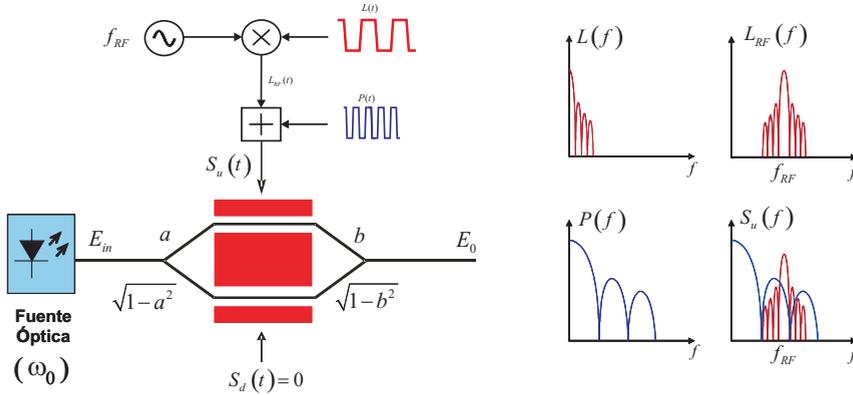
### 2.1.3. Configuraciones de interés para la estructura basada en un único Modulador Electro-Óptico

En este apartado se analizan varias configuraciones de interés del caso general desarrollado en la subsección 2.1.1, atendiendo a la forma en que las señales de datos (carga y etiqueta) del paquete óptico SCML son aplicadas a los diferentes puertos eléctricos del modulador electro-óptico. A continuación se procede a describir cada una de ellas.

#### Configuración Single Drive

Esta primera configuración consiste en el empleo de únicamente uno de los dos puertos eléctricos de entrada del modulador electro-óptico, de ahí el nombre con el que se conoce "Single Drive" [27], [9], [18]. En este caso, la señal aplicada a dicho puerto es la combinación

de la señal eléctrica banda base del paquete de datos de carga junto con los datos de etiqueta que previamente han sido modulados en amplitud sobre una subportadora de radiofrecuencia, tal como se muestra en la figura 2.6.



**Figura 2.6:** Configuración de un EOM Single-Drive para generación de paquetes ópticos SCML.

Por lo tanto, la combinación de la señal de datos de carga y de etiqueta del paquete óptico se realiza directamente en el dominio eléctrico a través de un acoplador eléctrico. Esta técnica de generación es sencilla, aunque necesita una serie de dispositivos eléctricos adicionales al propio modulador electro-óptico, tales como: un generador de subportadora de radiofrecuencia, un mezclador, un amplificador y un combinador de radiofrecuencia. La elección de dichos dispositivos es crítica, de forma que las características de rizado del módulo y retardo de sus respuestas en el rango de trabajo no deben generar degradaciones de las señales de datos del paquete antes de transmitirlos por el sistema.

Todo el estudio para este caso se obtiene particularizando el modelo general desarrollado en la subsección 2.1.1 cuando la señal de información aplicada en uno de los brazos, p.e. inferior, sea igual a cero. En concreto, se debe sustituir en el modelo anterior los valores de carga:  $Carga_d = 0$  ( $C_{p,d} = 0$ ) y  $Carga_u = Carga$  ( $C_{p,u} = 1$ ), así como de etiqueta:  $Etiqueta_d = 0$ , ( $C_{L,d} = 0$ , luego  $J_{0,d} = 1$ ,  $J_{k,d} = 0$  para  $k > 0$ ) y  $Etiqueta_u = Etiqueta$  ( $C_{L,u} = 1$ , luego  $J_{k,u} = J_k (\pi \cdot A_{Label}) = J_k$ ).

El campo eléctrico del canal óptico SCML a la entrada del detector (ec. 2.14) en esta configuración se puede expresar de la siguiente forma:

$$E_{ph}^{in}(w)|^{SD} = \frac{2\pi |E_{in}|}{\sqrt{L_{EOM}}} \left\{ \begin{aligned} & [F_u J_0 e^{jA_u} + F_d e^{jMA_{Bias,d}}] \cdot H_{Opt,0} \cdot \delta(w - w_0) + \\ & + \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} j^k F_u J_k e^{j(A_u + k\varphi_u)} \cdot H_{Opt,k} \cdot \delta(w - (w_0 + kw_{RF})) \end{aligned} \right\} + c.c \quad (2.28)$$

De la expresión anterior se extraen una serie de características espectrales cuando se emplea esta configuración de generación SCML:

- El espectro es de tipo doble banda lateral (Double Side Band, DSB), ya que presenta componentes situadas a frecuencias angulares múltiplos de la fundamental de

la subportadora de radiofrecuencia  $kw_{RF}$ , con  $k = \pm 1, \pm 2, \dots, \infty$ , respecto a la portadora óptica del canal,  $w_0$ . Se puede ver cómo cada uno de ellos se encuentra modulados tanto por la componente de etiqueta  $J_k$  como de carga  $A_u$ .

- Tal como se obtuvo para el caso general, la portadora está modulada en banda base por la carga, así como por el término interferente de etiqueta,  $J_0$ .
- La señal de carga se encuentra modulada tanto en amplitud como en fase (chirp) sobre la portadora óptica, tal como se puede extraer del grupo de términos localizados sobre la portadora óptica (primer grupo de términos de la expresión 2.28). También existe una modulación de fase de la carga no deseada en cada uno de los múltiplos de la subportadora de radiofrecuencia, ocasionando éstos últimos interferencias sobre la etiqueta.

La componente banda base de la fotocorriente detectada (ec. 2.17) se reescribe de la siguiente forma:

$$i_{ph}(t_n)|_{BB}^{SD} = \frac{\Re |E_{in}|^2}{L_{EOM}} \left\{ \begin{aligned} & \left[ F_u^2 |J_0|^2 + F_d^2 + 2F_u F_d J_0 \cos \left( \pi A_{Pay} + \pi \frac{V_{Bias}}{V_{\pi DC}} \right) \right] \cdot |H_{Opt,0}|^2 + \\ & + \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} F_u^2 |J_k|^2 \cdot |H_{Opt,k}|^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

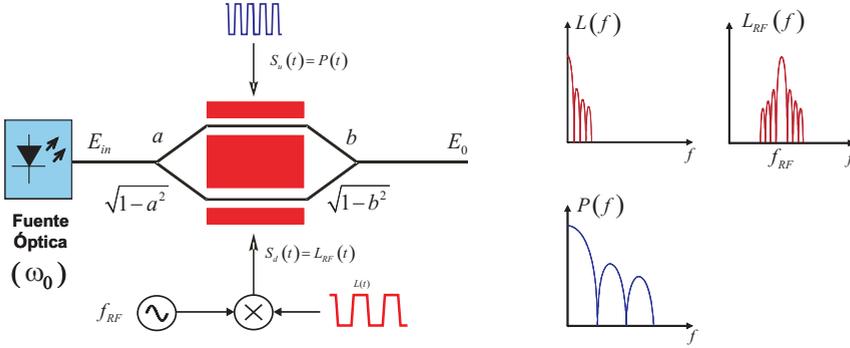
donde  $J_k = J_k(\pi \cdot A_{Label})$ . Analizando la expresión 2.29 se pueden extraer una serie de conclusiones en el caso de que se detecte la señal de datos de carga o etiqueta con esta configuración:

- Los datos de carga recuperados se obtienen de la ecuación 2.29 cuando se emplea el puerto de salida de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ , tal como se ha descrito en las conclusiones de la expresión 2.17. En esta configuración, se puede eliminar las contribuciones de etiqueta localizadas a las pulsaciones angulares  $w_0 \pm kw_{RF}$ , con  $k=1,2,\dots$ , (segundo grupo de términos de la ecuación 2.29) si se emplea una  $FBG_{Rx}$  cuya respuesta de reflexión sea  $H_{FBG_{Rx}}^R(w = w_0 \pm kw_{RF}) \Rightarrow 0$  cuando  $k \neq 0$ . Sin embargo, siempre existe la distorsión asociada a los términos de etiqueta localizados en banda base sobre la portadora óptica ( $J_0$ ) e imposible de eliminar mediante la  $FBG_{Rx}$ .
- La recuperación de los datos de etiqueta se consigue mediante el empleo del puerto del módulo de prefiltrado óptico que conecta con la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ . Para esta configuración, éstos corresponden con los  $J_k$ , con  $k \neq 0$ , del segundo grupo de términos de la ecuación 2.29. En este caso, dichos términos no se encuentran distorsionados por la contribución de carga. Únicamente existe un término de carga situado sobre la portadora óptica (tercer término del primer grupo de la expresión 2.29) que interfiere a la etiqueta recuperada. Éste se puede eliminar totalmente sin más que emplear una  $FBG_{Rx}$  cuya respuesta de transmisión tenga una forma tal que  $H_{FBG_{Rx}}^T(w = w_0) \Rightarrow 0$ , tal como se comentó en las conclusiones de la expresión 2.17.

### Configuración Dual Drive - Diferencial

En este caso se emplea un modulador electro-óptico dual drive, de forma que se pueda aplicar la señal eléctrica en ambos brazos del mismo a través de sus respectivos puertos

de entrada eléctricos. En concreto, se aplica cada una de las dos señales (carga o etiqueta) que conforman el paquete óptico en un puerto de entrada eléctrico del EOM diferente [38], [29], [39], [17], tal como se muestra en la figura 2.7.



**Figura 2.7:** Configuración diferencial de un EOM Dual-Drive para generación de paquetes ópticos SCML.

Cabe puntualizar unas diferencias respecto a la configuración "Single Drive":

- Se emplea un modulador electro-óptico dual-drive.
- La combinación de la señal de datos de carga y de etiqueta se realiza directamente en el dominio óptico a través del modulador electro-óptico.
- Esta estructura es más simple que la anterior, ya que no se requiere disponer de un acoplador eléctrico que nos permita multiplexar las señales de carga y etiqueta previamente a su aplicación en los brazos del EOM. Sin embargo, seguirá siendo necesario del resto de dispositivos eléctricos necesarios para generar la etiqueta modulada sobre al subportadora de RF (generador de subportadora de radiofrecuencia, mezclador y amplificador).

Para esta configuración, las señales  $S_u(t)$  y  $S_d(t)$  empleadas en el modelo general desarrollado en 2.1.1 corresponden únicamente con la señal de carga y etiqueta respectivamente. Por lo tanto, se debe sustituir en el modelo anterior los valores de carga:  $Carga_d = 0$  ( $C_{p,d} = 0$ ) y  $Carga_u = Carga$  ( $C_{p,u} = 1$ ), así como de etiqueta:  $Etiqueta_u = 0$ , ( $C_{L,u} = 0$ , luego  $J_{0,u} = 1$ ,  $J_{k,u} = 0$  para  $k > 0$ ) y  $Etiqueta_d = Etiqueta$  ( $C_{L,d} = 1$ , luego  $J_{k,d} = J_k (\pi \cdot A_{Label}) = J_k$ ).

La expresión del campo electromagnético del canal óptico SCML a la entrada del detector (ec. 2.14) para esta técnica se puede expresar de la siguiente forma:

$$E_{ph}^{in}(w)|^{Dif} = \frac{2\pi |E_{in}|}{\sqrt{L_{EOM}}} \left\{ \begin{aligned} & [F_u e^{jA_u} + F_d J_0 e^{jMA_{Bias,d}}] \cdot H_{Opt,0} \cdot \delta(w - w_0) + \\ & + \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} j^k \left[ \begin{aligned} & M^k F_d J_k e^{j(MA_{Bias,d} + k\varphi_d)} \cdot H_{Opt,k} \cdot \delta(w - (w_0 + kw_{RF})) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} + c.c \quad (2.30)$$

De la expresión anterior se extraen una serie de características espectrales para esta configuración de generación SCML:

- El espectro de la etiqueta es de tipo doble banda lateral, al igual que la configuración Single Drive. Sin embargo, cada uno de ellos está modulado por la componente de etiqueta  $J_k$  únicamente, por lo que no existirá contribuciones de carga interfiriendo a la información de etiqueta, tal como sucedía en la configuración Single-Drive.
- La propia portadora está modulada en banda base por la carga  $A_u$ , así como por el término interferente de etiqueta,  $J_0$ , originando que esta modulación sea tanto de amplitud como de fase al igual que sucede con la configuración Single Drive.

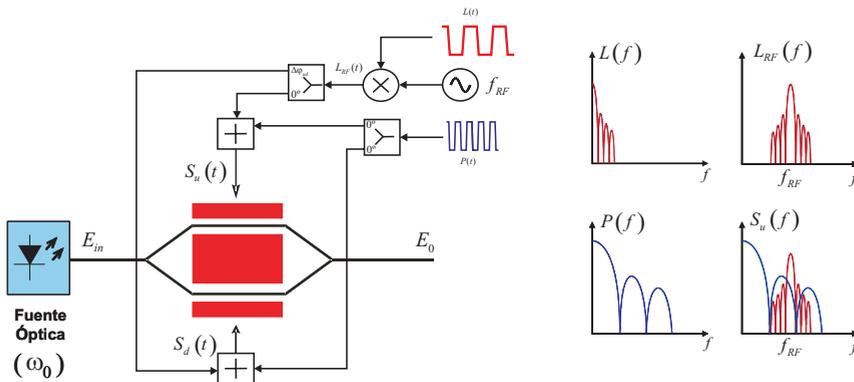
La expresión de la componente en banda base de la fotocorriente detectada (ec. 2.17) se expresa en esta configuración como:

$$i_{ph}(t_n)|_{BB}^{Dif} = \frac{\Re |E_{in}|^2}{L_{EOM}} \left\{ \left[ F_u^2 + F_d^2 |J_0|^2 + 2F_u F_d J_0 \cos\left(\pi A_{Pay} + \pi \frac{V_{Bias}}{V_{\pi DC}}\right) \right] \cdot |H_{Opt,0}|^2 + \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} F_d^2 |J_k|^2 \cdot |H_{Opt,k}|^2 \right\} \quad (2.31)$$

donde  $J_k = J_k(\pi \cdot A_{Label})$ . Tal como se muestra 2.31, la expresión de la fotocorriente es idéntica al caso de emplear el modulador en configuración Single-Drive (ec. 2.29), por lo que se obtienen las mismas conclusiones.

### Configuración Dual Drive - Push-Pull

Al igual que en la técnica de generación diferencial, esta configuración emplea un modulador dual-drive. Sin embargo, las señales de carga y etiqueta se aplican en ambos brazos del modulador electro-óptico simultáneamente. Concretamente, la señal de carga se aplica desfasada 180 grados entre los brazos, mientras la etiqueta tiene un desfase adicional ( $\Delta\varphi_{ud} = \varphi_u - \varphi_d$ ) en ambos brazos del EOM [17], [25], tal como se muestra en la figura 2.8.



**Figura 2.8:** Configuración Push Pull del EOM Dual-Drive ( $M = -1$ ) para generación de paquetes ópticos SCML.

En esta configuración cabe destacar lo siguiente:

- La combinación de la señal de datos de carga y de etiqueta se realiza en el dominio eléctrico a través de un acoplador antes de ser aplicada en cada uno de los brazos del EOM. El desfase de 180 grados entre las entradas eléctricas del EOM, se puede realizar ópticamente (EOM con un parámetro de simetría entre brazos ( $M$ ) igual a -1) o eléctricamente (desfasador eléctrico de 180 grados en el rango de trabajo y un EOM con  $M = 1$ ).
- La señal de carga aplicada tiene igual amplitud pero desfasada 180 grados entre ambos brazos del EOM. De esta forma, se consigue únicamente una modulación de amplitud de la misma si además se dispone de un EOM diseñado tal que los coeficientes  $F_d$  y  $F_u$  sean iguales. En este caso, no existirá la modulación de fase (chirp) de carga presente en las dos anteriores configuraciones presentadas.
- La señal de etiqueta aplicada entre las entradas eléctricas del EOM tiene igual amplitud pero con un desfase determinado ( $\Delta\varphi_{ud}$ ). En función del valor que tome éste y del parámetro  $M$  del EOM, el espectro de la subportadora será de tipo doble banda lateral (Double Side Band, DSB) o banda lateral única (Single Side Band, SSB).

El estudio de esta configuración se obtiene sin más que particularizar el modelo desarrollado en 2.1.1 con los valores de carga:  $Carga_u = Carga_d = Carga/2$  ( $C_{p,u} = C_{p,d} = 1/2$ ),  $M = -1$  para conseguir que el desfase entre los brazos del EOM sea de 180 grados, y para la etiqueta:  $Etiqueta_u = Etiqueta_d = Etiqueta/2$  ( $C_{L,u} = C_{L,d} = 1/2$ ).

El campo eléctrico del canal óptico a la entrada del detector (ec. 2.14) se puede reescribir de la siguiente forma:

$$E_{ph}^{in}(w)|^{PP} = \frac{2\pi |E_{in}|}{\sqrt{LEOM}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k \left\{ \begin{array}{l} [F_u e^{j(A_u+k\varphi_u)} + F_d (-1)^k e^{j(-A_d+k\varphi_d)}] \cdot \\ \cdot J_{k,u} \cdot H_{Opt,k} \cdot \delta(w - (w_0 + kw_{RF})) \end{array} \right\} + c.c \quad (2.32)$$

De la expresión 2.32 se pueden extraer una serie de conclusiones:

- El espectro de la subportadora de etiqueta presenta componentes situadas a frecuencias múltiplos de la frecuencia angular fundamental de la subportadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica del canal  $w_0 + kw_{RF}$  con  $k = \pm 1, \pm 2, \dots, \infty$ . Sin embargo, atendiendo al desfase entre la portadora de radiofrecuencia aplicada en los puertos eléctricos de entrada del EOM ( $\Delta\varphi_{ud}$ ), y que corresponde con un desfase total entre los brazos del mismo igual a  $\Delta\varphi_{EOM} = \Delta\varphi_{ud} + (1 - M)\pi/2$ , el espectro de la etiqueta será de tipo doble banda lateral (DSB) cuando  $\Delta\varphi_{EOM} = n\pi$  con  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , o banda lateral única superior (SSB Upper) o inferior (SSB Lower) cuando  $\Delta\varphi_{EOM} = -\pi/2$  o  $\pi/2$  respectivamente.
- Se puede comprobar cómo todos los términos del espectro (ec. 2.32) se encuentran modulados por la carga  $A_i$  además de la componente de etiqueta  $J_{k,u}$ . Sin embargo, algunos de estos términos pueden estar modulados únicamente por información de la carga o etiqueta finalmente en el caso de emplear un desfase  $\Delta\varphi_{EOM}$  que genere banda lateral única de etiqueta, tal como se analizará en la subsección 2.1.5.
- La propia portadora óptica del canal está modulada en banda base por la carga  $A_i$ , así como por el término no deseado de etiqueta,  $J_{0,u}$ , al igual que en el resto de configuraciones basadas en el empleo de un único EOM.

- Se ha de puntualizar que la modulación de amplitud de la señal de carga en el EOM se consigue si además de aplicar la misma señal de carga en ambos puertos eléctricos del EOM, se dispone de un EOM diseñado tal que los coeficientes  $F_d$  y  $F_u$  sean iguales. En la actualidad se disponen comercialmente de moduladores dual drive con relaciones de extinción [Ref] superiores a 30dB [Ref], luego  $F_u \approx F_d \approx 0,5$ .

La expresión de la componente banda base de la fotocorriente detectada (ec. 2.17) para este caso de estudio se puede reescribir como:

$$i_{ph}(t_n)|_{BB}^{PP} = \frac{\Re|E_{in}|^2}{L_{EOM}} \left\{ \left[ F_u^2 + F_d^2 + 2F_u F_d \cos\left(\pi A_{Pay} + \pi \frac{V_{Bias}}{V_{\pi DC}}\right) \right] \cdot |J_{0,u}|^2 \cdot |H_{Opt,0}|^2 + \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \left\{ \left[ F_u^2 + F_d^2 + 2F_u F_d \cos\left(\pi A_{Pay} + \pi \frac{V_{Bias}}{V_{\pi DC}} + k(\Delta\varphi_{ud} + \pi)\right) \right] \cdot |J_{k,u}|^2 \cdot |H_{Opt,k}|^2 \right\} \right\} \quad (2.33)$$

donde  $J_{k,u} = J_k(\pi \cdot A_{Label}/2)$ .

La expresión de la fotocorriente para esta configuración muestra una diferencia respecto a las anteriores. Concretamente, se observa como las contribuciones de la fotocorriente banda base asociadas a cada uno de los términos del espectro localizados en frecuencias angulares  $w_0 + kw_{RF}$ , con  $k \neq 0$ , están modulados en amplitud por la señal de carga, además de un desfase asociado a la subportadora aplicada entre los brazos del EOM. Esto origina que la degradación de la señal de carga sobre la de etiqueta detectada no se elimine completamente mediante la  $FBG_{Rx}$  a diferencia de los casos anteriores. Así pues, esta configuración es peor desde este punto de vista que el resto de configuraciones analizadas en esta subsección.

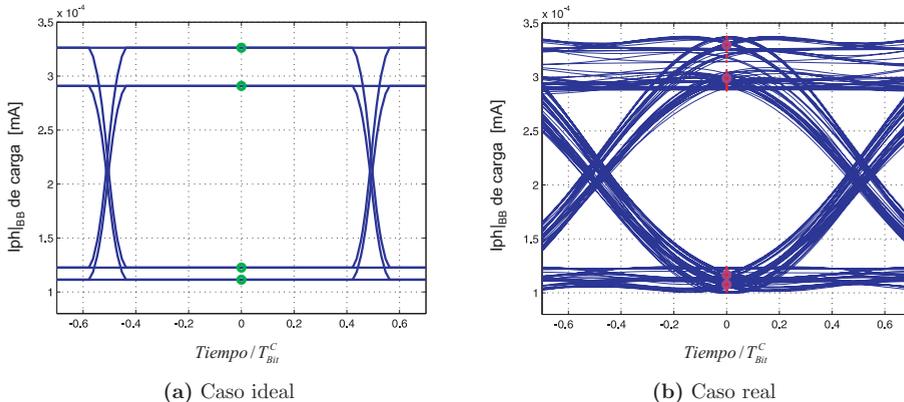
En la siguiente tabla quedan resumidas las principales conclusiones de las configuraciones analizadas para la generación de paquete SCML empleando un único modulador electro-óptico.

Configuración EOM	Combinación Carga/Etiqueta	Espectro	Interferencia Carga Detec.	Interferencia Etiqueta Detec.
Single Drive	Eléctrica	DSB	SI (*)	NO (**)
Dual Drive Diferencial	Óptica	DSB	SI (*)	NO (**)
Dual Drive Push Pull	Eléctrica	DSB o SSB Según $\Delta\varphi_{ud}$	SI (*)	SI (***)

**Tabla 2.1:** Características de las configuraciones de generación de paquetes SCML basadas en un EOM. (\*) Esta interferencia no es posible eliminar con la  $FBG_{Rx}$ , debido al término de etiqueta banda base obtenido en la generación del paquete SCML, (\*\*) Esta interferencia de la carga banda base sobre la etiqueta es posible eliminar mediante la  $FBG_{Rx}$  a través de su respuesta de transmisión, (\*\*\*) Esta interferencia de carga modulada sobre las subportadora de etiqueta no es posible eliminar a través de la  $FBG_{Rx}$ .

### 2.1.4. Inclusión de las respuestas reales de los dispositivos empleados en el sistema SCML: Filtros eléctricos, FBG y fibra óptica.

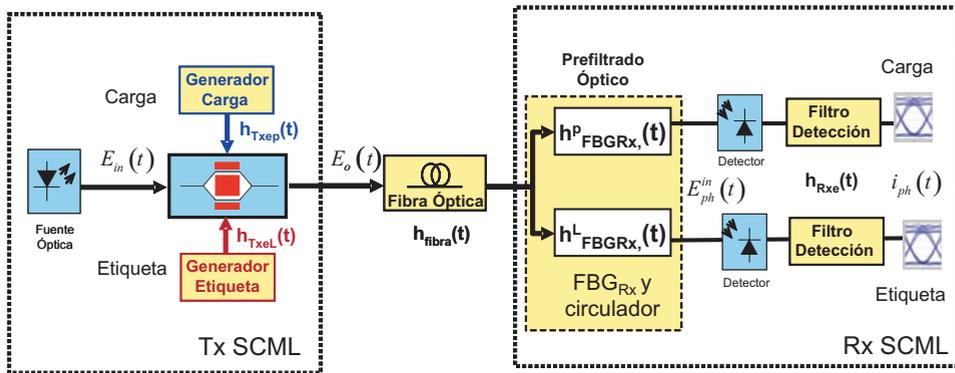
El modelo analítico del cálculo de la fotocorriente detectada, desarrollado en la subsección 2.1.1, considera como hipótesis de partida que las señales de carga y etiqueta están caracterizadas por niveles constantes asociados a los bits uno y cero. De esta forma,  $P(t)$  y  $L(t)$  toman únicamente los valores constantes 1 o 0 según el bit transmitido sea uno o cero, con un total de cuatro combinaciones posibles de carga y etiqueta ( $P = 0$  y  $L = 0$ ,  $P = 0$  y  $L = 1$ ,  $P = 1$  y  $L = 0$ ,  $P = 1$  y  $L = 1$ ) en la fotocorriente. La validez de esta hipótesis está más que justificada siempre que las respuestas frecuenciales de los dispositivos eléctricos u ópticos empleados alteren la forma de los bits de datos a la salida de los mismos, tal que no modifiquen a los bits adyacentes en los instantes de muestreo. En caso contrario se produce el conocido fenómeno de interferencia entre símbolos (Inter Symbol Interference, ISI) [40]. Este modelo ha permitido vislumbrar cómo las señales de carga y etiqueta se combinan en el EOM para generar el paquete óptico SCML, así como las interferencias entre ellas cuando se detectan en recepción. Una vez extraídas dichas conclusiones, el siguiente paso consiste en incluir las respuestas frecuenciales reales de los dispositivos eléctricos (dispositivos de generación de datos del transmisor y filtro receptor) y ópticos (fibra óptica y  $FBG_{Rx}$ ) sobre la señal transmitida a través de un sistema SCML real.



**Figura 2.9:** Diagramas de ojos de la señal de carga detectada considerando la respuestas de los filtros eléctricos y FBG ideales (a) o reales (b). Configuración de los dispositivos empleados: EOM (Single Drive,  $V_{Bias} = V_{\pi DC}/2$ ,  $L_{EOM} = 0dB$ ), láser emitiendo  $0,5mW$ , fibra óptica ( $L_{fibra} = 0Km$ ),  $FBG_{Rx}$  con  $T=10dB$ ,  $MSLR=10dB$ , señales de datos: carga (10Gb/s, NRZ,  $OMI_p = 0,30$ ) y etiqueta (622Mb/s NRZ @18GHz,  $OMI_L = 0,45$  con  $m_L = 0,75$ ).

En la figura 2.9 se muestra el diagrama de ojos de la señal de carga detectada cuando se emplea un sistema SCML donde los dispositivos empleados tienen respuestas tales que no alteran la forma de los bits (caso ideal descrito en la subsección 2.1.1) así como en el caso de que sí afecten y generen ISI (caso real). En la figura 2.9(a) se muestra también

los valores de la señal de carga detectada en el instante de muestreo óptimo para el caso ideal (círculo verde), asociados a los cuatro niveles de las combinaciones de los dos niveles posibles (0 o 1) de la carga y etiqueta. Éstos corresponden con los obtenidos de la expresión 2.17 cuando se muestrea en la mitad del bit de carga. Sin embargo, los cuatro niveles iniciales se desdobl原因 en cuatro bandas para el caso real, tal como se muestra en la figura 2.9(b) (puntos rojos). En este caso, se debe determinar los valores de cada uno de los bits detectados asociados a cada una de las cuatro bandas, así como los niveles medios de cada una de ellas (círculo morado), necesarios a la hora de obtener los parámetros de calidad de la señal detectada definidos en la subsección 2.1.2. Para conseguirlo, se procede a rehacer el modelo analítico incorporando unos coeficientes en la expresión de la fotocorriente detectada deducida en la expresión 2.17. Estos coeficientes materializan los efectos de las respuestas reales de los distintos dispositivos utilizados sobre la forma de cada uno de los símbolos del paquete óptico SCML transmitidos.



**Figura 2.10:** Esquema general del modelo de transmisor y receptor SCML basado en un EOM y FBG con la inclusión de las respuestas de los dispositivos.

En la figura 2.10 se muestra un esquema general del modelo incluyendo respuestas reales de los dispositivos. Las señales de datos de carga y etiqueta que conforman el paquete óptico SCML son transmitidas a través de dispositivos eléctricos y ópticos que modifican la forma de las mismas. Cada uno de ellos se puede modelar por un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI), caracterizado mediante su respuesta impulsiva  $h(t)$  o frecuencial  $H(f)$  [40]. Éstos se organizan en cuatro grupos: 1) generador de datos eléctrico ( $h_{Txep}(t)$  para la carga y  $h_{Txel}(t)$  para la etiqueta), 2) fibra óptica ( $h_{fibra}(t)$ ), 3) prefiltrado óptico basado en la red de difracción de Bragg ( $h^p_{FBGRx}(t)$  para la carga y  $h^l_{FBGRx}(t)$  para la etiqueta) y 4) filtro eléctrico del receptor ( $h_{Rxe}(t)$ ).

El anexo B.1 describe cómo se incorpora las respuestas de cada uno de los cuatro dispositivos indicados anteriormente sobre el campo eléctrico del paquete SCML y la componente banda base de la fotocorriente de la señal detectada. En este estudio se considera que las señales de carga,  $P(t)$ , y etiqueta,  $L(t)$ , están representadas por secuencias pseudoaleatorias de  $N_c$  y  $N_e$  bits respectivamente, y con relación  $N_c = N_e \cdot CoefBR_{pL}$ . El coeficiente  $CoefBR_{pL} = BR_p/BR_L$  indica la relación entre las tasas de bit de carga y etiqueta. Para una señal  $S$  de dos niveles y formato NRZ, la relación entre la tasa de bit ( $BR_S$ ) y el tiempo de bit ( $T_{Bit}^S$ ) se relacionan como  $BR_S = 1/T_{Bit}^S$ . En este caso, la fotocorriente detectada para cada bit de datos recuperados en los instantes de muestreo

$t_n$ <sup>7</sup> se reescribe de la siguiente forma:

$$i_{ph,n}|_{BB} = \frac{\Re\{E_{in}\}^2}{L_{EOM}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[ F_u^2 |J_{k,u,n}|^2 |\gamma_{k,u,n}^{Opt}|^2 \gamma_{k,u,n}^{Rxe} + F_d^2 |J_{k,d,n}|^2 |\gamma_{k,d,n}^{Opt}|^2 \gamma_{k,d,n}^{Rxe} + \right. \\ \left. + 2F_u F_d J_{k,u,n} J_{k,d,n} \cos(\psi_{A,n}) \gamma_{k,u,n}^{Opt} (\gamma_{k,d,n}^{Opt})^* \gamma_{k,ud,n}^{Rxe} \right] \\ J_{k,i,n} = J_k (\pi \cdot C_{L,i} \cdot A_{Label,n}^{Filtrada}) \\ \psi_{A,n} = \pi \cdot A_{Pay,n}^{Filtrada} \cdot (C_{p,u} - M \cdot C_{p,d}) + \pi \cdot V_{Bias}/V_{\pi DC} + k \cdot (\Delta\varphi_{ud} + (1 - M) \cdot \pi/2) \quad (2.34)$$

donde  $A_{Pay,n}^{Filtrada}$  (ec. B.21) representa el valor de la información de carga del paquete óptico detectado en el instante de muestreo  $t_n$  con valor ideal  $P_n$  y al que se incluye el efecto de la respuesta de los dispositivos eléctricos del generador de datos de carga mediante el coeficiente  $\gamma_n^{Texp}$  (ec. B.20). Del mismo modo,  $A_{Label,n}^{Filtrada}$  (ec. B.25) contiene el valor de la información de etiqueta del paquete óptico detectado en el instante de muestreo  $t_n$  con valor ideal  $L_n$  y al que se incluye el efecto de la respuesta de los dispositivos eléctricos del generador de datos de etiqueta a través del coeficiente  $\gamma_n^{TxeL}$  (ec. B.24). El efecto de las respuestas de la fibra y la FBG del receptor ( $FBG_{Rx}$ ) sobre el paquete óptico se encuentran recopilados en los coeficientes  $\gamma_{k,i,n}^{Opt}$  (ec. B.27). Por último, la respuesta del filtro eléctrico del receptor se incluye en los coeficientes  $\gamma_{k,i,j,n}^{Rxe}$  (ec. B.29).

Puede comprobarse la similitud entre las expresiones de la fotocorriente deducidas en las ecuaciones 2.17 y 2.34, donde se consideran que las respuestas de los dispositivos son ideales o reales, respectivamente. Así pues, la ecuación 2.17 se obtiene a partir de la 2.34 cuando las respuestas frecuenciales de los generadores de datos eléctricos son ideales ( $H_{Texp}(f) = H_{TxeL}(f) = 1$ , siendo  $\gamma_n^{Texp} = \gamma_n^{TxeL} = 1$ ), la respuesta del filtro eléctrico receptor también es ideal ( $H_{Rxe}(f) = 1$ , luego  $\gamma_{k,i,j,n}^{Rxe} = 1$ ), así como la asociada al enlace de fibra óptica y  $FBG_{Rx}$  ideal ( $\gamma_{k,i,n}^{Opt} = H_{Opt,k}$ ).

### Cálculo de los parámetros de calidad incluyendo las respuestas reales de los dispositivos del sistema SCML.

El cálculo de los parámetros de calidad definidos en el apartado 2.1.2 debe ser modificado cuando se incluye las respuestas reales de los dispositivos del sistema SCML. Como se ha comentado previamente, cada uno de los cuatro posibles niveles de señal fotocorriente detectada correspondientes a los valores de carga y etiqueta ( $P = 1$  o  $0$  y  $L = 1$  o  $0$ ), se convierten en cuatro bandas de niveles asociadas a esos cuatro valores posibles dependiendo del valor de los bits anteriores y posteriores de carga y etiqueta detectados en el instante  $t_n$ . Esto es debido al efecto de interferencia entre símbolos comentado anteriormente, donde un bit afecta a los bits adyacentes por las distintas respuestas de los dispositivos.

Cada paquete SCML está compuesto por dos secuencias de bits asociadas a las señales de carga y etiqueta del mismo. A continuación se redefine las expresiones de los parámetros de calidad de la señal de carga detectada, siguiendo el mismo procedimiento para la etiqueta. Así pues, se dispone de una secuencia de  $N_c$  bits de la señal de datos de carga transmitida a la que se desea evaluar su calidad en detección. Como se conoce el valor de cada uno de los bits de la secuencia, se puede determinar los grupos de bits  $N_{c,1}$  y

<sup>7</sup> El instante de muestreo  $t_n$  de cada bit de datos recuperado dependerá de si la señal a recuperar sea carga o etiqueta. En concreto,  $t_n = n \cdot T_{Bit}^C$  con  $n = 1, 2, \dots, N_c$  para la carga y  $t_n = n \cdot T_{Bit}^e$  con  $n = 1, 2, \dots, N_e$  para la etiqueta.

$N_{c,0}$  de la misma ( $N_c = N_{c,0} + N_{c,1}$ ) que corresponden con los bits uno y bits cero de dicha señal respectivamente. A partir de ahí, se puede calcular cuales son los valores de fotocorriente detectada de la señal de carga asociados a los bits uno o bits cero. En este caso, el valor medio de la fotocorriente detectada cuando los bits transmitidos de la señal de carga toman el valor  $k$  ( $k = 0$  o  $1$ ),  $\langle I_{p,k} \rangle$ , se expresa de la siguiente forma:

$$\langle I_{p,k} \rangle = \frac{1}{N_{c,k}} \sum_{n=1}^{N_{c,k}} i_{ph,n}|_{P=k} \quad (2.35)$$

donde  $i_{ph,n}|_{P=k}$  corresponde con el valor de la fotocorriente detectada obtenida de la ecuación 2.34 en el instante  $t_n$  de la secuencia de bits de carga que toman el valor  $k$  y empleando el puerto de la  $FBG_{Rx}$  asociado a la detección de carga.

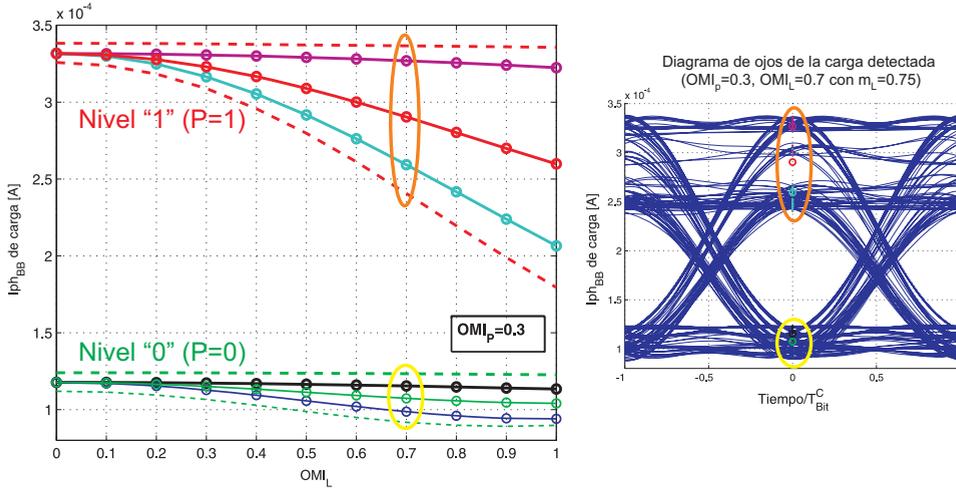
El valor de la contribución de ruido asociado a la interferencia que produce la señal de etiqueta del paquete óptico sobre la señal de carga, cuando esta toma el valor  $k$  ( $k = 0$  o  $1$ ), queda redefinido tal como se describe en la ecuación 2.36. Se ha de destacar que esta nueva expresión de la contribución de ruido incluye adicionalmente las respuestas reales de los dispositivos (filtro eléctricos, fibra óptica y  $FBG_{Rx}$ ) sobre el bit detectado de la señal de carga.

$$\sigma_{XTalk-p,k}^2 = \frac{1}{N_{c,k} - 1} \sum_{n=1}^{N_{c,k}} (i_{ph,n}|_{P=k} - \langle I_{p,k} \rangle)^2 \quad (2.36)$$

Los parámetros de calidad de la señal de carga del paquete óptico ( $QF_p$ ,  $OE_p$  y  $ER_p$ ) definidos en el subsección 2.1.2 se obtienen sin más que sustituir las expresiones obtenidas de  $\langle I_{p,k} \rangle$  (ec. 2.20) y  $\sigma_{XTalk-p,k}^2$  (ec. 2.22) por 2.35 y 2.36 respectivamente.

Una vez descrito el procedimiento de cálculo de los parámetros de calidad de las señales que integran el paquete óptico cuando se incluye las respuestas reales de los dispositivos empleados en el sistema SCML, se procede a validar los resultados obtenidos con el modelo teórico analítico descrito en la ecuación 2.34 a través del simulador comercial de sistemas ópticos *VPISystem<sup>TM</sup>*. Para ello se ha modelado un sistema SCML basado en un EOM y FBG siguiendo el esquema mostrado en la figura 2.10. Las características de los dispositivos empleados en el sistema son: EOM ( $L_{EOM} = 0$  dB,  $V_\pi = 5$  V,  $M = -1$ ,  $F_u = F_d = 0,5$ , configuración Single-Drive donde  $C_{p,u} = 1$ ,  $C_{p,d} = 0$ ,  $C_{L,u} = 1$  y  $C_{L,d} = 0$ , polarizado en el punto de cuadratura de su curva P-V con  $V_{Bias} = V_\pi/2$ ), señales de datos de carga (10Gb/s NRZ y  $OMI_p$ ) y de etiqueta (622Mb/s NRZ modulada sobre una subportadora de radiofrecuencia de 18GHz con  $m_L = 0,75$  y  $OMI_L$ ) y una  $FBG_{Rx}$  utilizada para prefiltrado óptico en recepción ( $T = 10$  dB,  $MCLR = 10$  dB,  $Roll-off = 8$  dB/GHz y  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ ). Los filtros eléctricos de transmisión y recepción utilizados son de tipo gaussianos de orden 2 y  $BW_{3dB} = 0,75 \cdot BR_x$ , siendo  $BR_x$  la tasa de bit de cada señal de datos (carga o etiqueta) que se desea filtrar. Cabe puntualizar que no se ha empleado un enlace de fibra óptica en este estudio inicial de verificación del modelo para no complicar más la interpretación de los resultados.

Empleando el sistema descrito en el párrafo anterior, se han obtenido los valores de fotocorriente de las señales de carga detectada (en el caso de la etiqueta se procede de igual forma), así como los parámetros de calidad que se obtienen a partir de las mismas. Cabe mencionar que en esta parte de la memoria únicamente se muestra uno de los estudios realizados para verificar dicho modelo teórico, siendo en el apartado 2.1.5 donde se procederá a realizar un estudio más exhaustivo en función de los parámetros de los dispositivos de interés en el sistema. Así pues, en la figura 2.11 se muestra los valores de la

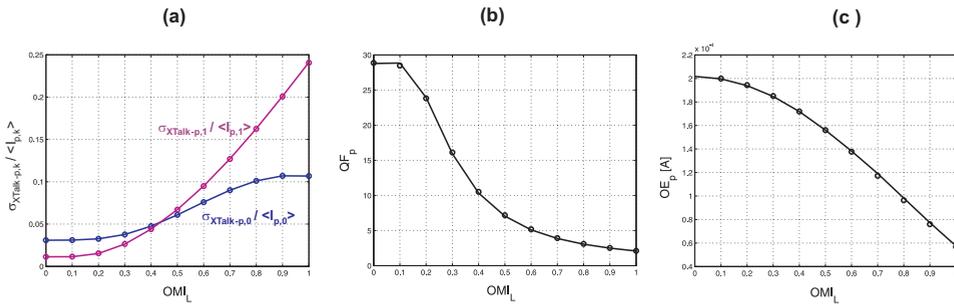


**Figura 2.11:** (Izquierda) Valor de fotocorriente de carga detectada en función del nivel de etiqueta  $OMI_L$  con  $m_L = 0,75$  obtenidas mediante simulación (continuo) y modelo teórico descrito en ec. 2.34 (o). Curvas del valor medio de  $i_{ph}$  de carga cuando: P=1 y L=0 (morado), P=1 y L=1 (cian), P=0 y L=0 (negro) y P=0 y L=1 (azul), P=1  $< I_{p,1} >$  (rojo) y P=0  $< I_{p,0} >$  (verde). Curvas del valor máximo y mínimo de las bandas asociadas al nivel de carga "1"(rojo discontinuo) y "0" (verde discontinuo). (Derecha) Diagrama de ojos de la señal de carga detectada cuando  $OMI_p = 0,3$  y  $OMI_L = 0,7$  con  $m_L = 0,75$ .

fotocorriente de la señal de carga obtenidos a través de la expresión analítica 2.34 (círculo) y simulación VPISystem<sup>TM</sup> (continuo) en los instantes de muestreo correspondientes a la mitad de bit de carga cuando se varía el nivel de etiqueta transmitida  $OMI_L$  con  $m_L = 0,75$  y nivel de carga  $OMI_p = 0,3$ . Concretamente, se representan varios valores de interés para cada una de las dos bandas asociadas a los niveles uno (P=1) y cero (P=0) de la señal de carga detectada, tales como: valor medio de la carga detectada cuando se han transmitido cada una de las cuatro combinaciones de bits de carga y etiqueta, P y L = 0,1, nivel máximo y mínimo de las bandas asociadas al nivel de carga uno (rojo discontinuo) y cero (verde discontinuo), así como valor medio de las bandas asociadas al nivel uno y cero de carga  $< I_{p,k} >$ , k=0,1. Todos ellos van a ser necesarios a la hora de determinar los parámetros calidad de la señal descritos anteriormente, además de facilitar la identificación y cuantificación de diversos mecanismos de degradación que se producen en el sistema, tales como los efectos de los filtros no ideales, interferencia entre las señales de carga y etiqueta que integran el paquete óptico, etc. En este caso, el efecto de los filtros se hace patente al observar que las bandas de los niveles uno y cero de la señal de carga detectada cuando  $OMI_L = 0$  (sólo se transmite carga en el paquete SCML) son no nulas. Por otro lado, conforme aumenta el nivel de etiqueta, se observa como las bandas asociadas a los niveles del uno y cero de carga detectada aumentan, desdoblándose cada una de ellas en dos como consecuencia de la contribución de la etiqueta del paquete SCML que no es eliminada por la  $FBG_{Rx}$  en detección y que interferirá sobre la carga del mismo. En la parte derecha de la figura 2.11 se muestra a modo de ejemplo el diagrama de ojos de la carga detectada obtenido con el simulador cuando  $OMI_p = 0,3$  y  $OMI_L = 0,7$  con

$m_L = 0,75$ , identificando el instante donde se realiza el muestreo de la señal de carga detectada, necesario a la hora de obtener las muestras que serán empleadas para calcular los parámetros de calidad.

En la figura 2.12(a) se muestran los valores calculados de la desviación típica de las bandas asociadas a los niveles uno o cero de carga y normalizada respecto a los valores medios de dichas bandas cuando  $OMI_p = 0,3$  y  $OMI_L = 0,7$  con  $m_L = 0,75$ , obtenidos a través de la expresión analítica 2.34 (círculo) y simulación  $VPISystem^{TM}$  (continuo). Se ha de puntualizar que en este caso no se han considerado fuentes de ruido adicionales (térmico, shot y oscuridad), por lo que las degradaciones son únicamente asociadas a la interferencia de la etiqueta sobre la carga y a los efectos de filtrado de los dispositivos empleados en el sistema. Se puede observar cómo la evolución de la interferencia comienza a incrementarse para valores de  $OMI_L > 0,25$ , siendo este crecimiento uniforme para el nivel uno de carga conforme aumenta el nivel de etiqueta,  $OMI_L$ , mientras que para el nivel de cero tiende a estabilizarse para niveles altos de  $OMI_L$ . A partir de los valores de desviación típica ( $\sigma_{XTalk-p,k}$ ,  $k=0,1$ ) y valores medios ( $\langle I_{p,k} \rangle$ ,  $k=0,1$ ) obtenidos para los niveles uno y cero de carga se calculan el factor de calidad,  $QF_p$ , y apertura del ojo,  $OE_p$ , de la señal bajo estudio en las figuras 2.12(b) y 2.12(c) respectivamente.



**Figura 2.12:** Curvas del (a) desviación típica normalizada de los niveles uno y cero,  $\sigma_{XTalk-p,k} / \langle I_{p,k} \rangle$ ,  $k = 0,1$ , (b) Factor de Calidad,  $QF_p$ , y (c) Apertura de Ojo,  $OE_p$ , de la señal de carga en función del nivel de etiqueta  $OMI_L$  con  $m_L = 0,75$  obtenidas mediante simulación (continua) y modelo teórico descrito en ec. 2.34 (o).

Por último, la validez del modelo teórico desarrollado en la sección 2.1.4, donde se incluyen los efectos de las respuestas reales de los dispositivos, queda justificada al corroborar como el error relativo de los resultados obtenidos con el mismo no superan el 0,2% respecto al obtenido con el simulador comercial  $VPISystem^{TM}$ . Por contra, el modelo teórico inicial descrito en la sección 2.1.1 presenta unos errores relativos que pueden llegar a alcanzar el 15% respecto del simulador  $VPISystem^{TM}$ , debido a que en el modelo teórico ideal no se considera los efectos de las respuestas reales de los dispositivos empleados en el sistema. A modo de ejemplo se muestra en la tabla 2.2 los valores de los parámetros de interés de la calidad de la carga detectada obtenidos para el sistema bajo estudio cuando se emplea unos niveles de etiqueta  $OMI_L = 0,7$  con  $m_L = 0,75$  y carga  $OMI_p = 0,3$  empleando el simulador  $VPISystem^{TM}$ . También se calculan los errores relativos de dichos parámetros respecto al simulador según sean obtenidos a través del modelo ideal (sección 2.1.1) o real (sección 2.1.4), ratificando la bonanza del modelo teórico real.

Parámetros carga	Simulación VPISystem <sup>TM</sup>	Modelo Teórico ideal $\varepsilon_r$	Modelo Teórico real $\varepsilon_r$
$\langle I_{p,1} \rangle$	290,35 $\mu A$	2,366 %	0,021 %
$\langle I_{p,0} \rangle$	107,39 $\mu A$	4,432 %	0,084 %
$\sigma_{XTalk-p,1}$	36,90 $\mu A$	4,805 %	0,125 %
$\sigma_{XTalk-p,0}$	9,67 $\mu A$	10,340 %	0,009 %
$OE_p$	117,15 $\mu A$	7,298 %	0,034 %
$QF_p$	3,929	11,622 %	0,081 %

**Tabla 2.2:** Parámetros de la señal de carga detectada asociados al caso de  $OMI_p = 0,3$  y  $OMI_L = 0,7$  con  $m_L = 0,75$ . Valores obtenidos mediante el simulador VPISystem<sup>TM</sup>. Error relativo ( $\varepsilon_r = (\text{valor Modelo teórico} - \text{valor simulación})/\text{valor simulación}$ ) de los parámetros obtenidos mediante el modelo teórico ideal (sección 2.1.1) y real (sección 2.1.4)

### 2.1.5. Evaluación del modelo para las configuraciones de interés

A continuación se procede a evaluar las prestaciones de las configuraciones de generación de paquetes ópticos SCML basadas en un único modulador descritas en la sección 2.1.3 (Single Drive, Dual Drive diferencial y Dual Drive Push-Pull DSB o SSB) y considerando el modelo teórico desarrollado en la sección 2.1.4. A la hora de realizar este estudio se ha considerado un sistema SCML tal como se describe en la figura 2.10, donde los dispositivos empleados presentan las siguientes características: Fuente óptica monocromática (longitud de onda de emisión  $\lambda_0=1550\text{nm}$  y potencia óptica emitida  $P_{in} = |E_{in}|^2 = 0,5\text{mW}$ ), EOM ( $L_{EOM} = 0 \text{ dB}$ ,  $V_\pi = 5\text{V}$ ,  $M=-1$ , polarizado en el punto de cuadratura de su curva P-V con  $V_{Bias} = V_\pi/2$ ,  $F_u = F_d = 0,5$ ) y donde los coeficientes  $C_{p,u}$ ,  $C_{p,d}$ ,  $C_{L,u}$  y  $C_{L,d}$  tomarán 1 o 0 dependiendo de la configuración de las señales aplicadas al EOM), señales de datos de carga (10Gb/s NRZ y  $OMI_p$ ) y de etiqueta (622Mb/s NRZ modulada sobre una subportadora de radiofrecuencia de 18GHz con  $m_L = 0,75$  y  $OMI_L$ ) y una  $FBG_{Rx}$  utilizada para prefiltrado óptico en recepción ( $T = 10\text{dB}$ ,  $MSLR = 10\text{dB}$ ,  $Roll-off = 8\text{dB/GHz}$  y  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ ). Los filtros eléctricos de transmisión y recepción utilizados son de tipo gaussianos de orden 2 y  $BW_{3dB} = 0,75 \cdot BR_x$ , siendo  $BR_x$  la tasa de bit de cada señal de datos (carga o etiqueta) que se desea filtrar. Se ha de puntualizar que en este estudio no se han considerado las fuentes de ruido térmico, shot y oscuridad, y el tramo de fibra óptica entre el transmisor y receptor es cero. De esta forma, se puede cuantificar claramente las degradaciones asociadas únicamente a la interferencia entre las señales de carga y etiqueta del paquete óptico, así como al efecto de las respuestas de los dispositivos ópticos y eléctricos empleados sobre las señales detectadas.

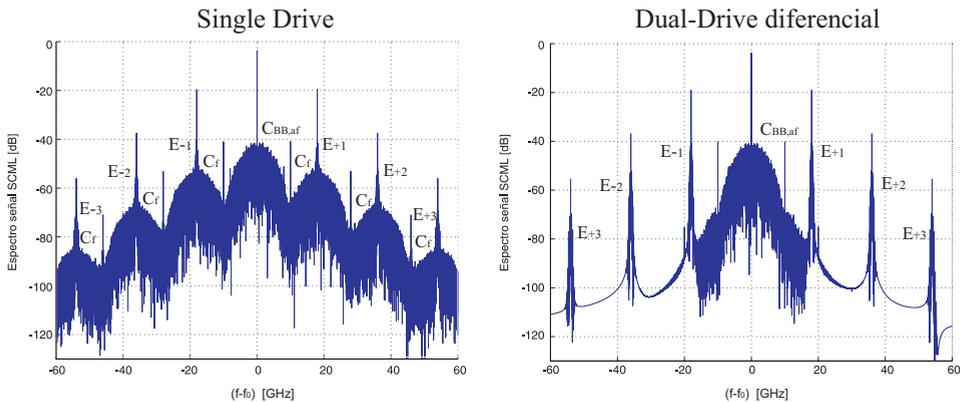
El modelo teórico desarrollado depende de una serie de parámetros asociados a los dispositivos y señales a transmitir, que serán el centro de nuestro análisis para cada una de las configuraciones de interés. Éstos se encuentran organizados en dos grandes grupos:

- Parámetros asociados a las señales de carga y etiqueta que constituyen el paquete óptico. Entre ellos se encuentran: los índices de modulación óptica de carga,  $OMI_p$ , y etiqueta,  $OMI_L$ , valor de la frecuencia de subportadora,  $f_{RF}$ , así como la relación entre el tasa de bit de la carga,  $BR_p$ , y etiqueta,  $BR_L$ .
- Parámetros asociados a las características de los filtros eléctricos y ópticos empleados en el sistema. En nuestro modelo existen:

- Filtros eléctricos asociados a las respuestas frecuenciales de todos los dispositivos eléctricos empleados para generar la señal eléctrica aplicada al EOM en el transmisor, como los dispositivos eléctricos para filtrar la señal a la salida del fotodetector en el receptor. Todos ellos vienen caracterizados a través de la respuesta frecuencial (módulo y retardo) y del ancho de banda.
- Red de Difracción de Bragg como filtro óptico en la etapa de prefiltrado óptico. Ésta se encuentra caracterizada mediante sus respuestas frecuenciales de transmisión/reflexión (módulo y retardo). En ella se definen los siguientes parámetros de interés: pulsación central de la banda de paso, ( $w_{BRAGG}$ ), ancho de banda de la banda de paso en reflexión ( $BW_{3dB}$ ), coeficiente de transmisión en la banda eliminada de la respuesta de transmisión (T), así como entre las bandas de paso y eliminadas (MSLR) y pendiente del flanco de la banda de paso (Roll-off) de la respuesta de reflexión.

### Espectro óptico del paquete SCML

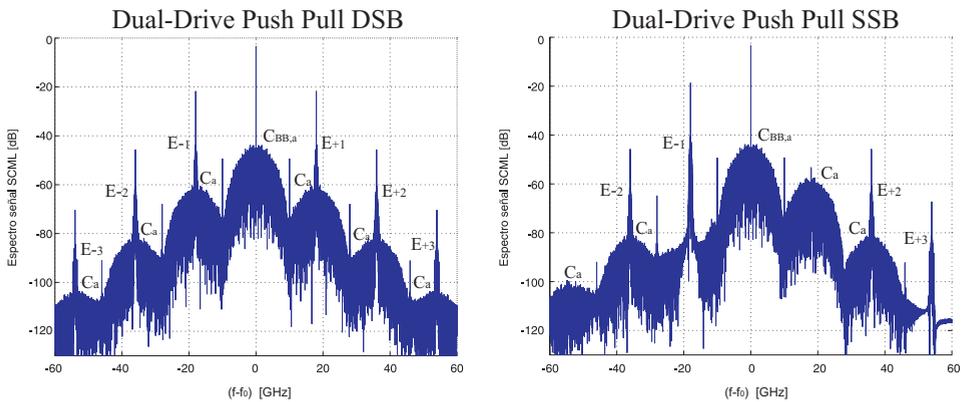
Las figuras 2.13 y 2.14 muestran los espectros ópticos del paquete SCML a la salida del transmisor SCML para las configuraciones de interés analizadas en el subapartado 2.1.3. Éstos se encuentran centrados en la frecuencia óptica del canal SCML,  $f_0$ , observando la existencia de contribuciones de las señales de carga (C) y etiqueta (E) en los mismos. En lo que respecta a la carga, existe un término de la misma modulada en amplitud y/o fase sobre la propia portadora óptica del canal SCML ( $C_{BB,x}$ , siendo x="a" (amplitud) y "af" (amplitud y fase)), pudiendo existir una modulación indeseada de la misma mezclada sobre las contribuciones de etiqueta  $E_{\pm k}$  situadas a las frecuencias múltiplos de la sub-portadora de radiofrecuencia  $f_{RF}$ . Concretamente, ésta puede ser únicamente de fase  $C_f$  (configuración Single-Drive, ver expresión 2.28), sólo de amplitud  $C_a$  (Dual Drive - Push Pull, ver expresión 2.32), o incluso no producirse como sucede en la configuración Dual Drive - Diferencial (ver expresión 2.30).



**Figura 2.13:** Simulación del espectro del paquete óptico SCML a la salida del EOM para las configuraciones Single-Drive y Dual-Drive Diferencial cuando  $OMI_p=0.3$  y  $OMI_L=0.4$  con  $m_L = 0,75$ .

Las contribuciones de la etiqueta están localizadas en las frecuencias  $\pm k f_{RF}$  respecto

a la portadora óptica y son debidas a la respuesta no lineal del modulador electro-óptico empleado. Cabe destacar el caso de la configuración Dual-Drive Push Pull donde dependiendo del desfase de la subportadora de etiqueta aplicada entre los puertos eléctricos de entrada del EOM,  $\Delta\varphi_{ud}$  (equivale a un desfase total entre los brazos del EOM igual a  $\Delta\varphi_{EOM} = \Delta\varphi_{ud} + (1 - M)\pi/2$ ), algunos de estos términos de etiqueta se modulan únicamente por etiqueta, generando una modulación de etiqueta en banda lateral única (SSB), otros modulados únicamente por carga o por ambas, tal como se ha descrito en el subapartado 2.1.3. En la figura se muestran dos casos de interés para esta configuración. En el caso de que el desfase total sea 180 grados ( $\Delta\varphi_{EOM} = \pi$ ), la carga va a modularse en amplitud sobre las frecuencias múltiplos de subportadora de radiofrecuencia, mientras si éste es de  $\pm 90$  grados ( $\Delta\varphi_{EOM} = \pm\pi/2$ ), una de las bandas de la portadora de radiofrecuencia va a modularse únicamente por la etiqueta y la otra por la carga. Concretamente si  $\Delta\varphi_{EOM} = -\pi/2$  la etiqueta va a modularse sobre la banda superior de la etiqueta (SSB superior), mientras que si  $\Delta\varphi_{EOM} = \pi/2$  será la banda inferior la que es modulada por la etiqueta (SSB inferior), tal como se muestra en la figura 2.14.



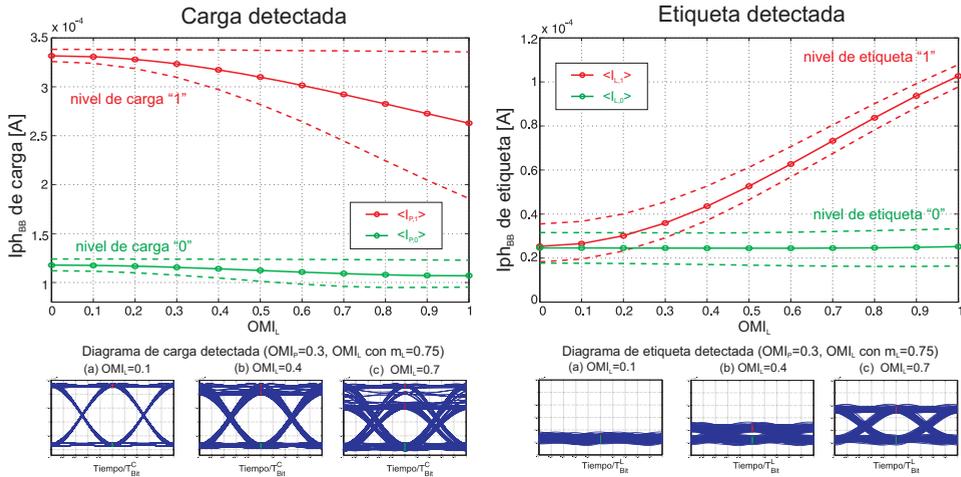
**Figura 2.14:** Simulación del espectro del paquete óptico SCML a la salida del EOM para las configuraciones Dual-Drive Push-Pull DSB ( $\Delta\varphi_{EOM} = 0$ ) y SSB inferior ( $\Delta\varphi_{EOM} = \pi/2$ ) cuando  $OMI_p=0.3$  y  $OMI_L=0.4$  con  $m_L = 0,75$ .

Una vez extraídas algunas conclusiones espectrales de la señal óptica SCML, se va a profundizar en el análisis de la evolución de los parámetros de calidad de la señal de carga y etiqueta en función de los índices de modulación empleados, así como de las características de la  $FBG_{Rx}$  empleada.

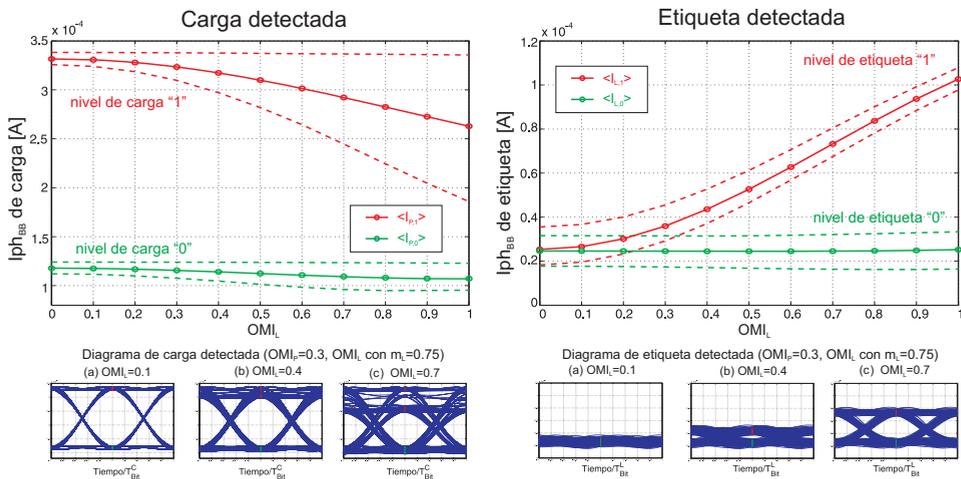
### Niveles de Carga y etiqueta: Índices de modulación ópticos $OMI_p$ y $OMI_L$ .

La elección de los niveles de las señales de carga y etiqueta que componen el paquete óptico SCML es un factor determinante a la hora de conseguir que la calidad de las señales recuperadas que integran el paquete óptico SCML sea la óptima.

En las figuras 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18 se muestran la evolución de la fotocorriente banda base de carga y etiqueta detectadas, así como los diagrama de ojos de ambas señales, cuando se realiza un barrido del nivel de etiqueta del paquete,  $OMI_L$ , en las configuraciones de un EOM Single Drive, Dual Drive Diferencial y Dual Drive Push-Pull DSB o SSB respectivamente.

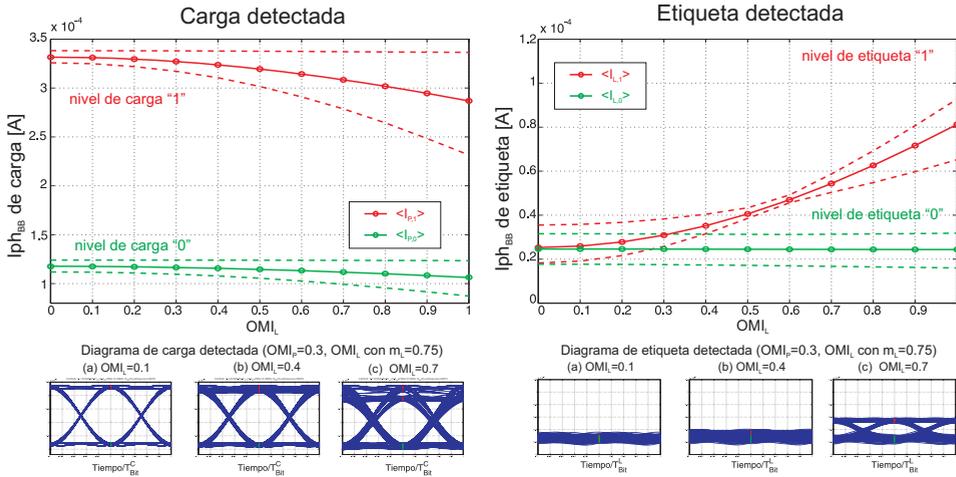


**Figura 2.15:** Fotocorriente detectada en el instante  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta cuando  $OMI_p = 0,3$  y empleando una configuración Single drive en el EOM. Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para los casos de  $OMI_p = 0,3$  y  $OMI_L = 0,1$  (a),  $0,4$  (b) y  $0,7$  (c) con  $m_L = 0,75$ .

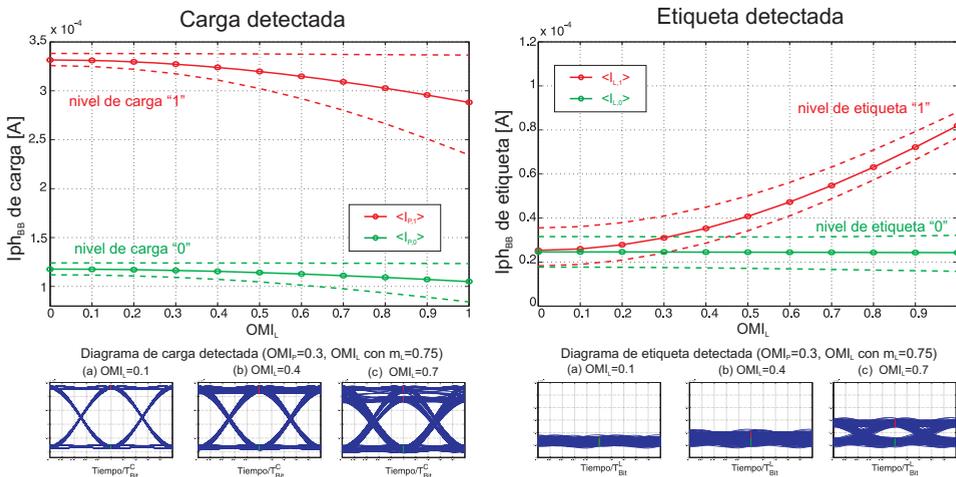


**Figura 2.16:** Fotocorriente detectada en el instante  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta cuando  $OMI_p = 0,3$  y empleando una configuración Dual Drive Diferencial en el EOM. Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para los casos de  $OMI_p = 0,3$  y  $OMI_L = 0,1$  (a),  $0,4$  (b) y  $0,7$  (c) con  $m_L = 0,75$ .

En lo que concierne a la señal de carga detectada, se puede observar que la anchura de las bandas de los niveles uno y cero aumentan en todos los casos cuando se incrementa el nivel de la señal de etiqueta  $OMI_L$  del paquete. Esto es debido a la interferencia originada por las componentes de etiqueta localizadas sobre la propia portadora óptica así como en



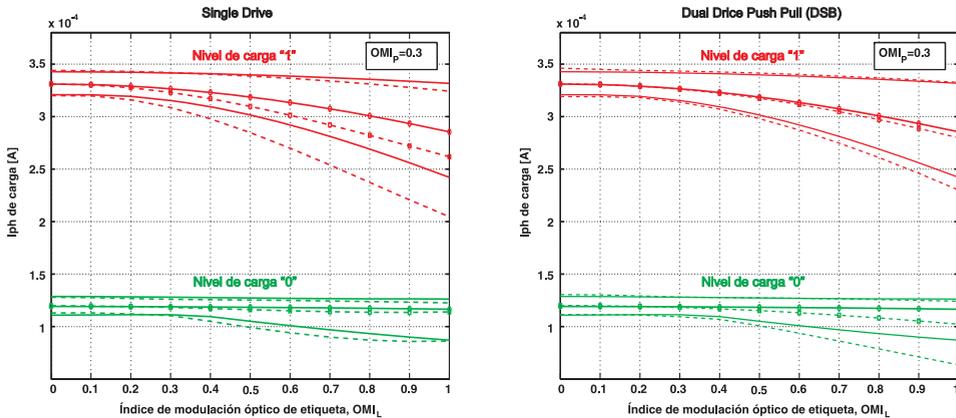
**Figura 2.17:** Fotocorriente detectada en el instante  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta cuando  $OMI_p = 0,3$  y empleando una configuración Dual Drive Push-Pull DSB en el EOM. Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para los casos de  $OMI_p = 0,3$  y  $OMI_L = 0,1$  (a),  $0,4$  (b) y  $0,7$  (c) con  $m_L = 0,75$ .



**Figura 2.18:** Fotocorriente detectada en el instante  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta cuando  $OMI_p = 0,3$  y empleando una configuración Dual Drive Push-Pull SSB en el EOM. Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para los casos de  $OMI_p = 0,3$  y  $OMI_L = 0,1$  (a),  $0,4$  (b) y  $0,7$  (c) con  $m_L = 0,75$ .

frecuencias múltiples de la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia de etiqueta respecto a la portadora, las cuales son detectadas y contribuyen a la fotocorriente banda base de la señal de carga recuperada, tal como se dedujo en la expresión 2.34. Se debe destacar que de todas estas contribuciones interferentes de etiqueta, la situada sobre la

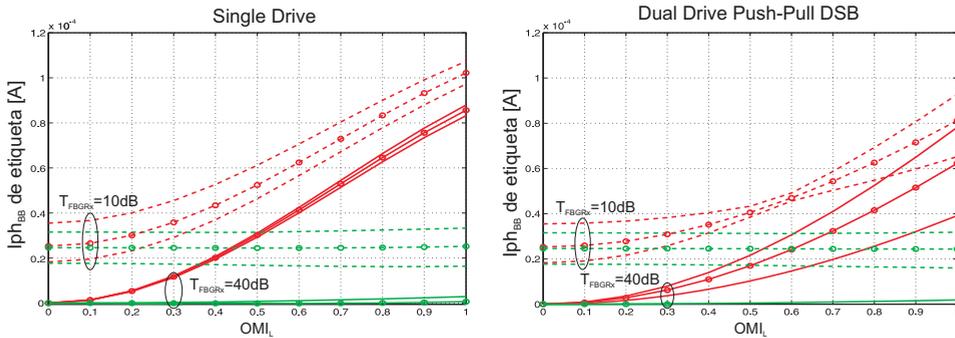
portadora óptica es la que genera mayor degradación sobre la carga. Tal como se ha mencionado anteriormente, este término no es posible eliminar ya que viene asociado al propio proceso de generación cuando se emplea un modulador electro-óptico y se encuentra mezclado con la señal de carga banda base, no pudiéndose mitigar en recepción a través de la  $FBG_{Rx}$  cuando se detecta la señal de carga. Por contra, el resto de las contribuciones interferentes de etiqueta pueden reducirse a través del empleo de la  $FBG_{Rx}$ , tal como se analizará en el siguiente apartado. También cabe destacar que cuando no se transmite etiqueta en el paquete,  $OMI_L = 0$ , la anchura de las bandas de los niveles del uno y cero no se anulan, siendo esta degradación asociada únicamente a los efectos de las respuestas de los filtros eléctricos en el transmisor y detector, así como de la  $FBG_{Rx}$  sobre la forma de los bits de datos. Sin embargo, esta degradación es despreciable respecto a la interferencia de la etiqueta sobre la carga comentada anteriormente conforme aumenta el nivel de etiqueta. Estas degradaciones quedan reflejadas en la evolución del parámetro de calidad  $QF_p$  y apertura del ojo  $OE_p$  de carga representados en la figura 2.21 para las configuraciones bajo estudio, donde se comprueba cómo estos decrecen conforme aumentamos el nivel de la señal de etiqueta. Sin embargo en el caso de la configuraciones Dual Drive Push Pull, los valores medios de los niveles uno y cero son superiores y la anchura de sus bandas inferiores respecto a las configuraciones Single Drive y Dual Drive Diferencial, debido a que los términos de etiqueta situados a las frecuencias múltiplos de la subportadora de radiofrecuencia del espectro del paquete SCML se encuentran mezclados con la señal de carga modulados en amplitud y contribuyen a la señal de carga detectada, tal como se dedujo en la expresión 2.33.



**Figura 2.19:** Fotocorriente de carga muestreada en  $t_n$  en función del nivel de etiqueta  $OMI_L$  para las configuraciones del EOM Single Drive (izquierda) y DualDrive Push Pull DSB (derecha). Bandas asociadas al nivel uno (rojo) y cero (verde) de carga, así como valor medio de cada una (-o-). Características de la FBG detección:  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ ,  $T=10dB$ ,  $MSLR= 5dB$ (continuo) y  $20dB$ (discontinuo).

Por otro lado, la señal de etiqueta detectada presenta una evolución similar en líneas generales para las configuraciones Single Drive, Dual Drive Diferencial y Dual Drive Push Pull SSB cuando varía el nivel de etiqueta aplicada al EOM. Concretamente, la anchura de las bandas de los niveles uno y cero se mantiene prácticamente constantes, debiéndose básicamente al término de carga banda base que no es eliminado en la  $FBG_{Rx}$  y que al

detectarse contribuye a degradar la señal de etiqueta. Esta interferencia es posible eliminarla sin más que la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$  tenga un rechazo en la banda eliminada, T, lo suficientemente alto para que el término de carga interferente sea despreciable. En la figura 2.20 se muestra un ejemplo, donde se muestra dos configuraciones de la  $FBG_{Rx}$  cuyo rechazo de banda eliminada vale 10 dB o 40 dB. Se puede comprobar cómo la interferencia de la carga se minimiza en el caso de alto rechazo ( $T=40\text{dB}$ ), siendo la anchura de las bandas de los niveles de la etiqueta asociada únicamente a los efectos de las respuestas de los filtros eléctricos en el transmisor/detector y la  $FBG_{Rx}$  sobre la forma de los bits de datos de la etiqueta.

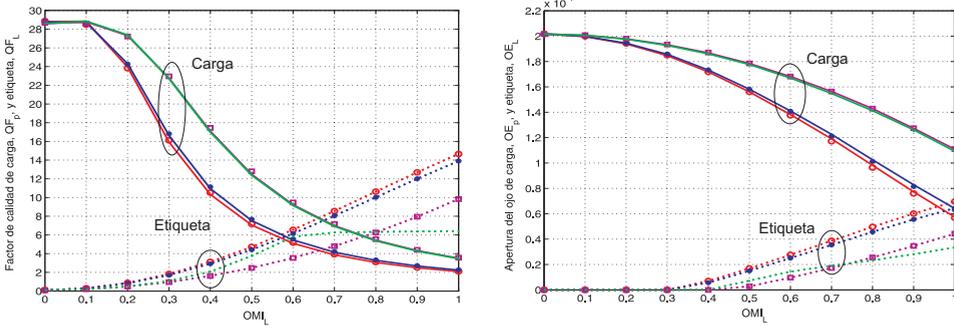


**Figura 2.20:** Fotocorriente de etiqueta muestreada en  $t_n$  en función del nivel de etiqueta  $OMI_L$  para las configuraciones del EOM Single Drive (izquierda) y DualDrive Push Pull DSB (derecha). Bandas asociadas al nivel uno (rojo) y cero (verde) de etiqueta, así como valor medio de cada una (-o-). Características de la  $FBG_{Rx}$ :  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ ,  $MSLR=10\text{ dB}$ ,  $T= 10\text{dB}$  (discontinuo) y  $40\text{dB}$  (continuo).

En la configuración Dual Drive Push Pull DSB, el nivel de etiqueta mostrada en la figura 2.17 presenta una evolución peculiar de la misma cuando se varía el nivel de etiqueta del paquete. Aunque el nivel medio de las bandas asociadas al uno y cero de la señal sigue una evolución similar al resto de configuraciones estudiadas, la anchura del nivel uno va decreciendo hasta que llega a un valor mínimo de  $OMI_L$ , aumentando a partir del mismo. Esto se debe a que los términos de etiqueta situados en  $f_0 \pm f_{RF}$  se encuentran mezclados con términos de carga modulados en amplitud y que no son eliminables por la  $FBG_{Rx}$  del receptor. En la figura 2.20 se muestra un estudio para dos casos del coeficiente de transmisión  $T=10\text{dB}$  y  $40\text{dB}$  para esta configuración del EOM. Como se puede comprobar, el término de carga situado sobre la portadora óptica es eliminado cuando  $T=40\text{dB}$ , interfiriendo en este caso únicamente los términos de carga mezclados sobre las contribuciones de etiqueta comentados anteriormente.

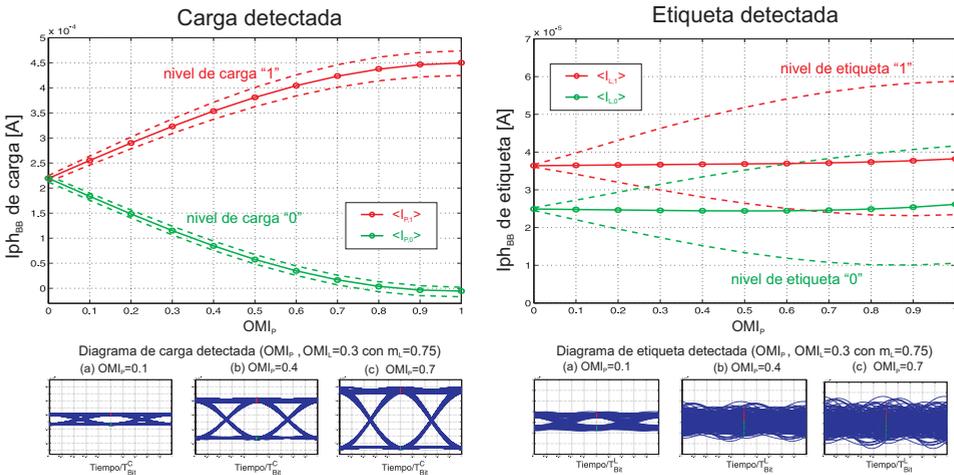
Todos estos fenómenos que acontecen en la etiqueta quedan reflejados en el parámetro de calidad  $QF_L$  y apertura de ojo de la etiqueta representados en la figura 2.21. Concretamente, se comprueba cómo el parámetro de calidad crece monótonamente al incrementar el nivel de señal aplicada al EOM en todos los casos salvo en el Dual Drive Push Pull DSB, que debido a lo comentado anteriormente origina que el crecimiento del  $QF_L$  se quede paralizado a partir del valor de  $OMI_L$  donde la anchura de la banda del nivel uno de la señal se minimiza.

A continuación se va a proceder a realizar el estudio de la evolución de la señal de

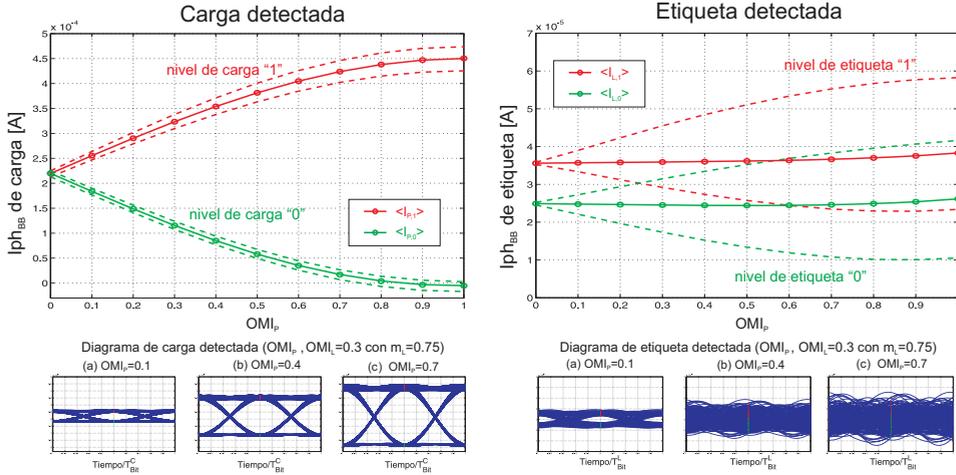


**Figura 2.21:** Factor de calidad QF y Apertura del ojo para las señales recuperadas de carga y etiqueta del paquete muestreado a mitad del bit en función del nivel de etiqueta  $OMI_L$  con  $m_L = 0,75$  cuando se emplea las configuraciones del EOM Single Drive (rojo), Dual Drive Diferencial (azul), Dual Drive Push Pull DSB (verde) y SSB (morado) con  $OMI_P = 0,3$ . Características de la  $FBG_{Rx}$ :  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ ,  $MSLR=10$  dB,  $T= 10$ dB.

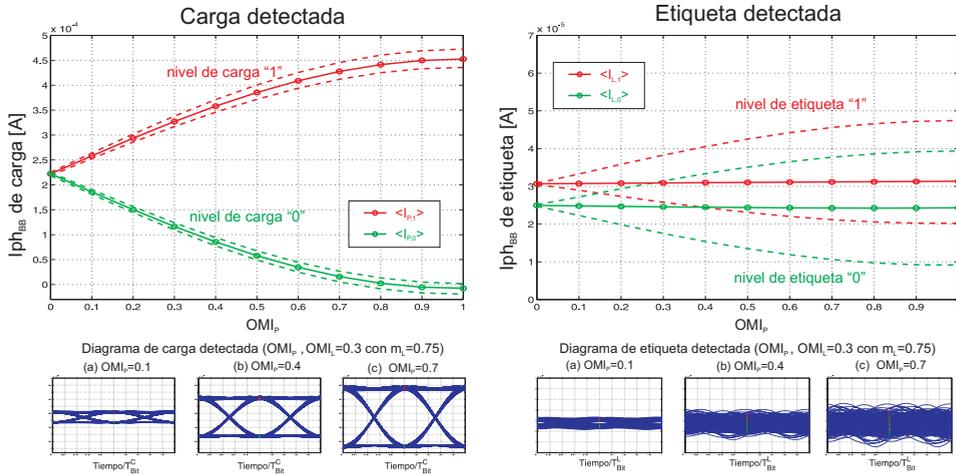
carga y etiqueta, así como sus calidades cuando se varía el nivel de señal de carga eléctrica aplicada al EOM. En las figuras 2.22, 2.23, 2.24 y 2.25 se muestran la evolución de la fotocorriente banda base de carga y etiqueta, así como los diagrama de ojos de ambas señales, cuando se realiza un barrido del nivel de carga del paquete,  $OMI_P$ , en las configuraciones de un EOM Single Drive, Dual Drive Diferencial y Dual Drive Push Pull DSB o SSB respectivamente.



**Figura 2.22:** Fotocorriente detectada en el instante  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta cuando  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$  y empleando una configuración Single Drive en el EOM. Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para los casos de  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$  y  $OMI_P = 0,1$  (a), 0,4 (b) y 0,7 (c).

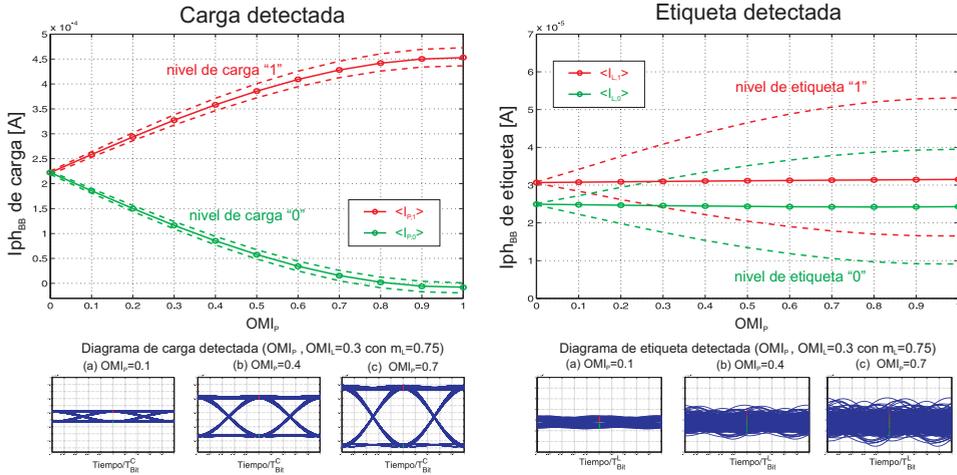


**Figura 2.23:** Fotocorriente detectada en el instante  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta cuando  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$  y empleando una configuración Dual Drive Diferencial en el EOM. Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para los casos de  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$  y  $OMI_p = 0,1$  (a),  $0,4$  (b) y  $0,7$  (c).



**Figura 2.24:** Fotocorriente detectada en el instante  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta cuando  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$  y empleando una configuración Dual Drive Push-Pull DSB en el EOM. Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para los casos de  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$  y  $OMI_p = 0,1$  (a),  $0,4$  (b) y  $0,7$  (c).

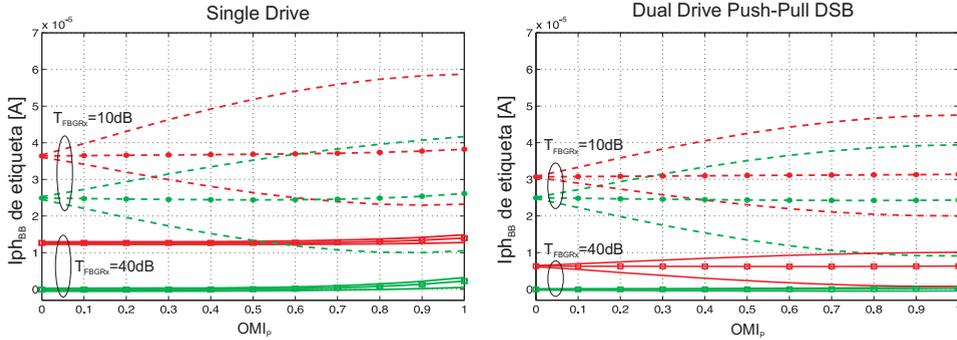
Concretamente se observa como los niveles de la fotocorriente detectada de la carga crecen conforme aumenta el nivel de carga del paquete en todas las configuraciones bajo estudio, tal como era de esperar. Las anchuras de los niveles del uno y cero de la carga se deben a las interferencias de los términos de etiqueta modulados sobre la portadora óptica



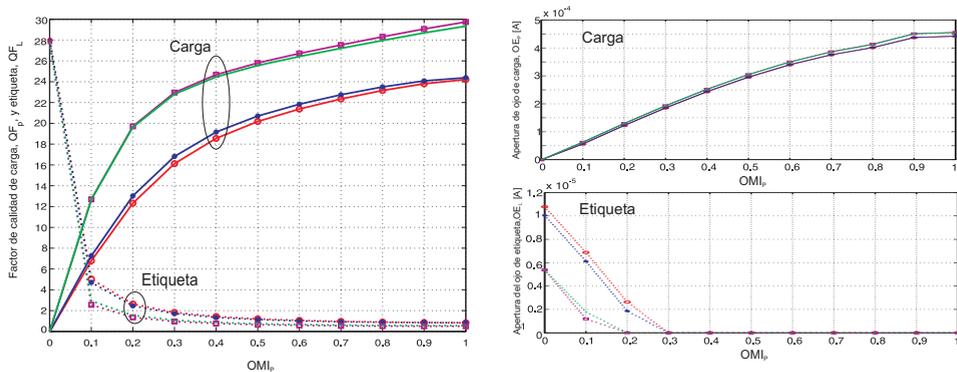
**Figura 2.25:** Fotocorriente detectada en el instante  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta cuando  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$  y empleando una configuración Dual Drive Push-Pull SSB en el EOM. Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para los casos de  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$  y  $OMI_p = 0,1$  (a), 0,4 (b) y 0,7 (c).

y mezclados en detección con la carga banda base (predominantes para valores altos de  $OMI_p$ ), términos de etiqueta localizados en las frecuencias múltiplos de la subportadora de radiofrecuencia  $\pm f_{RF}$  respecto a la portadora óptica (valor constante y eliminable a través de la  $FBG_{Rx}$ ) y los efectos de las respuestas de los filtros eléctricos del transmisor/receptor y  $FBG_{Rx}$  sobre la forma de los bits de datos (depende del  $OMI_p$  independientemente de que exista distorsión de etiqueta). Así pues, para valores bajos de  $OMI_p$  predomina el efecto de las respuestas eléctricas de los filtros y  $FBG_{Rx}$ , mientras que conforme aumenta  $OMI_p$  es prioritario las interferencias de etiqueta banda base mezclado con la carga. En lo que respecta a la etiqueta, la anchura de las bandas de los bits uno y cero de la misma aumentan conforme  $OMI_p$  crece, asociada esta evolución al término de carga modulado sobre la portadora óptica, que no es eliminado por la  $FBG_{Rx}$  en recepción y que contribuye a degradar la fotocorriente de etiqueta. Esta interferencia de la carga sobre la señal de etiqueta se puede eliminar empleando una  $FBG_{Rx}$  con gran rechazo en la banda eliminada, T. En la figura 2.26 se muestra cómo afecta el valor de rechazo de banda eliminada, T, cuando se emplea el puerto de transmisión la  $FBG_{Rx}$  para extraer la etiqueta del paquete. Concretamente, esta degradación es mínima y casi independiente del nivel de carga,  $OMI_p$ , cuando T vale 40dB para el caso Single-Drive, puesto que el término de carga interferente es eliminado. En el caso Dual Drive Diferencial y Dual Drive Push Pull SSB se obtienen los mismos resultados. Sin embargo, la anchura de las bandas cuando T=40dB en la configuración Dual Drive Push Pull DSB son menores que para T=10dB, ya que elimina el término de carga banda base, pero sigue creciendo conforme aumentamos  $OMI_p$ , ya que las contribuciones de etiqueta están mezcladas por el término asociado a la señal de carga, tal como se ha mencionado anteriormente.

Estos mecanismos de degradación de las señales de carga y etiqueta cuando se varía el nivel de carga aplicada al EOM quedan plasmados en la evolución de los parámetros de calidad  $QF$  y  $OE$  de dichas señales mostrados en la figura 2.27. Así pues, el  $QF_p$



**Figura 2.26:** Fotocorriente de etiqueta muestreada en  $t_n$  en función del nivel de carga  $OMI_p$  para las configuraciones del EOM Single Drive (izquierda) y DualDrive Push Pull DSB (derecha) con  $OMI_L = 0,3$  y  $m_L = 0,75$ . Bandas asociadas al nivel uno (rojo) y cero (verde) de etiqueta, así como valor medio de cada banda. Características de la  $FBG_{Rx}$ :  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ ,  $MSLR = 10$  dB,  $T = 10$  dB (continuo) y 40 dB (discontinuo).



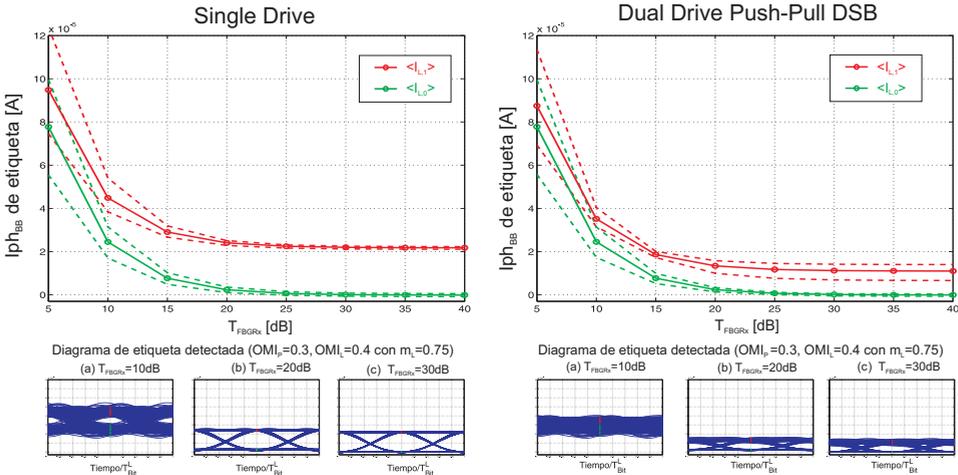
**Figura 2.27:** Factor de calidad QF y Apertura del ojo para las señales recuperadas de carga y etiqueta del paquete muestreado a mitad del bit en función del nivel de carga  $OMI_p$  cuando se emplea las configuraciones del EOM Single Drive (rojo), Dual Drive Diferencial (azul), Dual Drive Push Pull DSB (verde) y SSB (morado) con  $OMI_L = 0,3$  y  $m_L = 0,75$ . Características de la  $FBG_{Rx}$  de detección:  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ ,  $MSLR = 10$  dB,  $T = 10$  dB.

aumenta monótonamente en todas las configuraciones conforme aumenta  $OMI_p$ , siendo en los casos de las configuraciones Single Drive y Dual Drive Diferencial superiores a las de Dual Drive Push Pull DSB o SSB. Esto es debido a que en estos dos últimos casos la señal de carga además de encontrarse modulada sobre la portadora óptica, también se encuentra modulada en amplitud sobre los términos de etiqueta situados sobre las frecuencias múltiplos de la subportadora de etiqueta del espectro óptico y que serán eliminados por la  $FBG_{Rx}$ , reduciendo el nivel de carga detectada. En lo que concierne al factor de calidad de etiqueta,  $QF_L$ , este se reduce conforme aumenta el nivel de carga

en todas las configuraciones analizadas, ya que aumenta la interferencia de carga banda base sobre el señal de etiqueta detectada. Por último, se observa que la apertura del ojo de etiqueta decrece y la de carga se incrementa conforme aumenta  $OMI_p$ , por los mismos motivos comentados anteriormente.

**Características de la FBG de la etapa de prefiltrado óptico del receptor,  $FBG_{Rx}$ .**

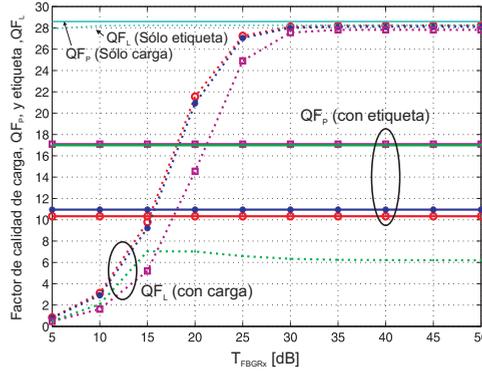
La técnica de prefiltrado óptico basado en FBG permite separar las informaciones de carga y etiqueta del paquete óptico SCML directamente en el dominio óptico, tal como se muestra en la figura 2.4 de la sección 2.1. En el caso general propuesto, los datos de carga y etiqueta se recuperan empleando los puertos de salida de reflexión y transmisión de la  $FBG_{Rx}$  respectivamente. Como ya se ha comentado a lo largo de la sección 2.1, las características de las respuestas de la  $FBG_{Rx}$  empleada juegan un papel fundamental a la hora de minimizar las interferencias entre las señales de carga y etiqueta detectadas del paquete óptico. Así pues, se va a proceder a realizar un estudio detallado de las características de la  $FBG_{Rx}$  para cuantificar dichas interferencias, así como determinar en qué casos es posible minimizarlas.



**Figura 2.28:** Fotocorriente detectada de etiqueta muestreada en el instante  $t_n$  en función de la respuesta del coeficiente de rechazo de transmisión de la  $FBG_{Rx}$  (T) cuando se emplea un EOM con configuración Single-Drive y Dual Drive Push Pull DSB, con  $OMI_p=0.3$  y  $OMI_L=0.4$  con  $m_L = 0,75$ . Diagrama de ojos de la señal de etiqueta para los casos (a) T=10dB, (b) T=20dB y (c) T=30dB.

La respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$  se emplea en el proceso de extracción de la etiqueta del paquete. En este caso, la banda eliminada de dicha respuesta, caracterizada a través del coeficiente de transmisión, T, se encarga de rechazar la contribución de carga modulada en banda base sobre la portadora óptica, la cual interfiere a la señal de etiqueta detectada. En la figura 2.28 se muestran cómo evoluciona los valores de fotocorriente de etiqueta, así como la anchura de las bandas de los niveles uno y cero en función del parámetro T para las configuraciones Single Drive (las configuraciones Dual Drive Diferencial y Dual Drive Push Pull SSB presentan evoluciones similares) y Dual Drive

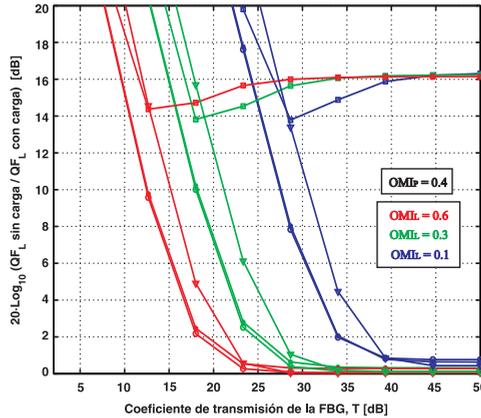
Push Pull DSB. Se puede corroborar como la anchura de las bandas de los niveles de etiqueta se reduce conforme aumenta  $T$  debido a la supresión del término interferente de carga banda base por parte de la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$  hasta llegar a un valor mínimo, el cual viene asociado a los efectos producidos por las respuestas de de los filtros eléctricos del transmisor/receptor y  $FBG_{Rx}$ , así como a la parte del espectro de carga que cae sobre las frecuencias donde se localizan las contribuciones de etiqueta y que es imposible eliminar con la  $FBG_{Rx}$  cuando se detecta la señal de etiqueta.



**Figura 2.29:** Factor de calidad muestreado a mitad del bit para las señales recuperadas de carga y etiqueta del paquete en función del Coeficiente de Transmisión de la  $FBG_{Rx}$  ( $T$ ) cuando se emplea las configuraciones del EOM Single Drive (rojo), Dual Drive diferencial (azul), Dual Drive Push Pull DSB (verde) y SSB (morado) cuando  $OMI_p=0.3$  y  $OMI_L=0.4$  con  $m_L = 0,75$ .

En la figura 2.29 se muestra la evolución del factor de calidad de la carga y etiqueta cuando varía el parámetro  $T$ . En el caso de la etiqueta, el factor de calidad  $QF_L$  crece al aumentar  $T$  en todas las configuraciones estudiadas, ya que incrementa el rechazo de la banda eliminada, y por tanto la reducción del término interferente asociado a la señal de carga. En las configuraciones Single-Drive, Dual drive Diferencial y Dual Drive Push Pull SSB, se llega a un máximo del  $QF_L$  cuando  $T$  es mayor de 30 dB, mientras que en la configuración Dual Drive Push Pull DSB, este factor se estabiliza en 6 aproximadamente para un  $T$  de 15 dB, estando limitado por la degradación de la señal de carga modulada en amplitud que se encuentra mezclada con las contribuciones de etiqueta moduladas en las frecuencias  $f_0 \pm kf_{RF}$  del espectro óptico del paquete SCML. Ahora bien, interesa determinar cual es el valor mínimo de  $T$  que permita tener una penalización del Factor de calidad de etiqueta menor de 1dB. La figura 2.30 muestra la penalización del factor de calidad de etiqueta cuando el nivel de carga es  $OMI_p=0.3$  y el de etiqueta  $OMI_L = 0.1, 0.3$  y  $0.6$  con  $m_L = 0,75$ , de forma que se tenga una  $OMI_{total} = OMI_p + OMI_L$  igual al 50 %, 70 % y 100 % para las cuatro configuraciones bajo estudio. Así pues, en vista de los resultados, es necesario que la  $FBG_{Rx}$  se diseñe con un  $T=40$ dB para que la penalización de  $QF_L$  en las configuraciones Single Drive, Dual drive diferencial y Push Pull SSB sea menor de 1dB cuando  $OMI_p=0.4$ . Cabe destacar cómo en estas tres configuraciones hay un valor mínimo de penalización, siendo en el caso de  $OMI_L=0.1$  y  $OMI_p=0.4$  igual a 0.5 aproximadamente. Este mínimo se debe a que parte del espectro de la señal de carga banda base se extiende a frecuencias donde se sitúa las contribuciones de la etiqueta,

originando una degradación sobre la etiqueta detectada que es más patente para niveles bajos de etiqueta. En el caso de la configuración Dual Drive Push Pull DSB, esta es de 16dB como mínimo, siendo la causa la modulación de carga en amplitud mezclada con las contribuciones de etiqueta que degrada la calidad de la etiqueta recuperada. Por último, cabe puntualizar que el parámetro T no afecta a la calidad de la señal de carga recuperada,  $QF_p$ , tal como se observa en la figura 2.29.



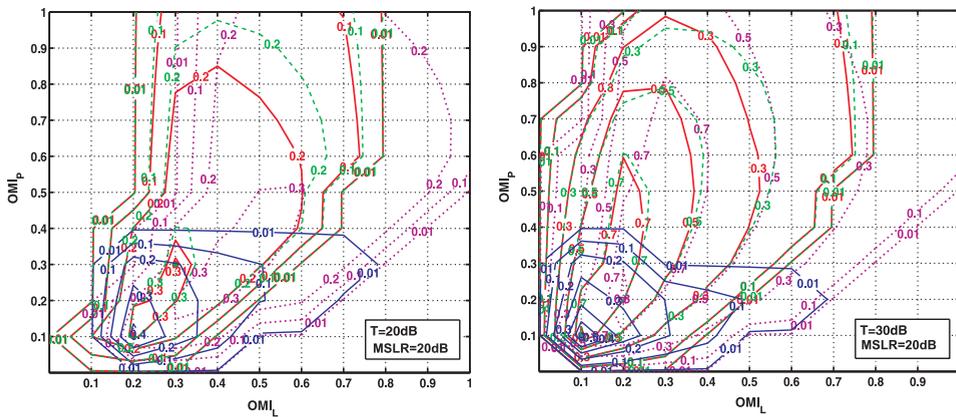
**Figura 2.30:** Penalización del factor de calidad muestreado a mitad del bit para la señal recuperada de etiqueta del paquete en función del Coeficiente de Transmisión de la  $FBG_{Rx}$  (T) para las configuraciones Single Drive ( $\circ$ ), Dual Drive Diferencial ( $*$ ), Dual Drive Push Pull DSB ( $\square$ ) y SSB ( $\nabla$ ). Se emplea  $OMI_p=0.4$  y  $OMI_L=0.1$  (azul), 0.3 (verde) y 0.6 (rojo) con  $m_L = 0,75$

La respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ , se encarga de eliminar los términos de etiqueta localizados en las frecuencias  $f_0 \pm f_{RF}$  del espectro óptico del paquete, de forma que minimicen las interferencias sobre la señal de carga recuperada. Es por ello que la relación entre la banda de paso y eliminada, caracterizada a través del parámetro MSLR, debe ser lo mayor posible para eliminar completamente dichas contribuciones de etiqueta. Cabe destacar que la etiqueta modulada sobre la propia portadora, y generada en el transmisor a través del EOM no se puede eliminar con la  $FBG_{Rx}$ , por lo que siempre existirá interferencia de etiqueta sobre la señal de carga.

### Figura de Mérito del paquete SCML.

Una vez analizados todos los parámetros de configuración del sistema SCML propuesto, tales como los niveles de las señales de carga y etiqueta del paquete SCML y características de la FBG empleada en recepción, el siguiente paso consiste en obtener cual sería la configuración óptima del sistema. Para ello se va a hacer uso del parámetro Figura de mérito del paquete SCML,  $FM_{SCML}$ , que informa de cuáles deben ser los niveles de carga y etiqueta empleados en el sistema para que la calidad de las señales recuperadas en recepción superen el umbral establecido (en este estudio se toma  $QF_u=6$  o  $BER=10^{-9}$ ), así como cuantificar la calidad del paquete en su conjunto. En la figura 2.31 se muestran el parámetro  $FM_{SCML}$  a través de curvas de nivel para el caso de emplear una  $FBG_{Rx}$  con  $MSLR=20$ dB y T=20 (izquierda) o 30dB (derecha) y considerando un umbral del

factor de calidad  $QF_u = 6$  (equivalente a  $BER = 10^{-9}$ ) para las cuatro configuraciones de transmisor SCML estudiadas. En este estudio, los factores de calidad máximos de carga y etiqueta son  $QF_P^{max} = 27,93$  y  $QF_L^{max} = 27,80$ , obtenidos en el caso de que únicamente se transmita carga o etiqueta en el paquete óptico, respectivamente. Cabe destacar que al aumentar T, el rango de valores de los niveles de carga y etiqueta que provocan que la calidad de ambas señales detectadas superen el umbral definido, o equivalentemente  $FM_{SCML} > 0$ , aumenta, así como el valor máximo de  $FM_{SCML}$ , informando que la calidad de las señales detectadas se aproxima a sus máximos valores  $QF_P^{max}$  y  $QF_L^{max}$ , siendo en este caso cuando  $FM_{SCML} = 1$ . Se ha de matizar que de todas las configuraciones, la Dual Drive Push Pull SSB es la que más margen de valores de niveles de carga y etiqueta cumple el mínimo de calidad  $FM_{SCML} > 0$ , seguido por las configuraciones single Drive y Dual Drive diferenciales cuyos comportamientos son similares y por último la Dual Drive Push Pull DSB.



**Figura 2.31:** Figura de Mérito del paquete en función de los índices de modulación óptico de carga y etiqueta cuando se emplean las configuraciones del EOM Single-Drive (rojo), Dual-Drive Diferencial(verde), Dual-Drive Push Pull DSB (azul) y Dual Drive Push Pull SSB (morado). Características de la FBG detección:  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ , NLPS=20 dB, T= 20dB (figura izquierda) y 30dB (figura derecha).

Las configuraciones óptimas de las cuatro configuraciones estudiadas en la figura 2.31 cuando se emplea una  $FBG_{Rx}$  con  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ , MSLR=20dB y T=20dB son:

Configuración EOM	$OMI_P$	$OMI_L$	$QF_P$	$QF_L$	$FM_{SCML}$
Single Drive	0.3	0.3	16.12	15.52	0.322
Dual Drive - Diferencial	0.3	0.3	16.06	15.76	0.326
Dual Drive - Push Pull DSB	0.1	0.2	19.67	17.18	0.435
Dual Drive - Push Pull SSB	0.3	0.4	17.26	14.49	0.322

Si la  $FBG_{Rx}$  se diseña con  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$ , T=30dB y MSLR=20dB, los valores óptimos en dichas configuraciones son:

Configuración EOM	$OMI_P$	$OMI_L$	$QF_P$	$QF_L$	$FM_{SCML}$
Single Drive	0.1	0.1	25.19	25.34	0.822
Dual Drive - Diferencial	0.1	0.1	25.15	25.35	0.821
Dual Drive - Push Pull DSB	0.1	0.1	27.07	16.76	0.584
Dual Drive - Push Pull SSB	0.2	0.2	25.44	25.28	0.828

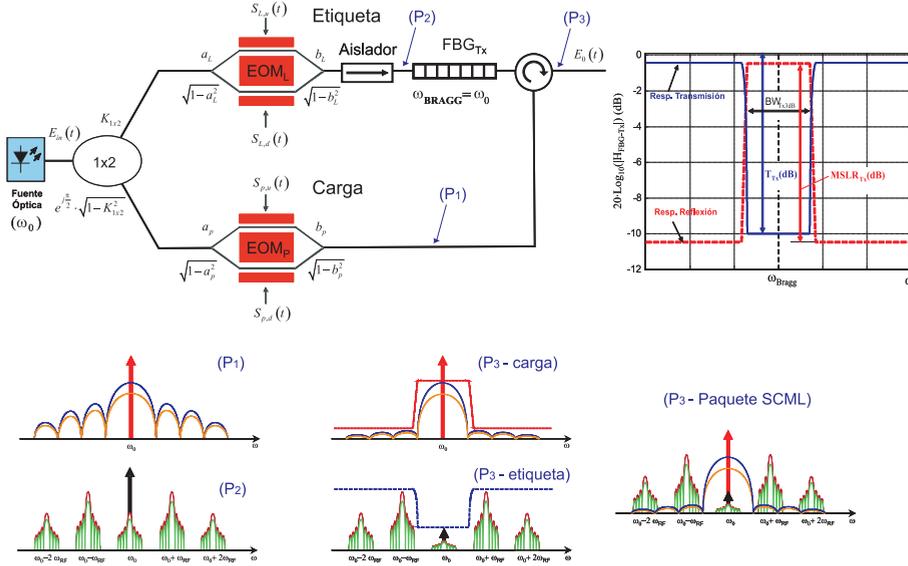
A partir de los resultados mostradas en las tablas anteriores, se puede concluir que las configuraciones Single Drive, Dual Drive Diferencial y Dual Drive Push Pull SSB presentan calidades similares tanto de cada una de las señales del paquete por separado como del paquete global. Sin embargo, las dos primeras necesitan menores niveles de carga y etiqueta para conseguirlo.

## 2.2. Modelado analítico del paquete óptico SCML empleando la estructura de combinación óptica paralela basada en EOM y FBG y detección basada en prefiltrado óptico con FBG.

En la sección anterior se ha estudiado el esquema de generación de paquetes ópticos por multiplexación por subportadora (SCML) basada en un único modulador óptico. Como conclusión del mismo se obtuvo una expresión analítica de la señal eléctrica detectada de carga y etiqueta en donde se mostraban todas las degradaciones originadas por interferencia entre las señales de carga y etiqueta que integran el paquete. Cabe destacar la existencia de un término de etiqueta modulado sobre la portadora óptica y que interfiere a la carga banda base imposible de eliminar con dicha configuración. En esta sección se va a proponer un esquema de generación que permitirá eliminar dicho término interferente a través de una red de difracción de Bragg.

### 2.2.1. Obtención de la fotocorriente detectada del paquete óptico SCML para la estructura general de combinación óptica paralela.

Esta sección describe la generación de paquetes ópticos SCML empleando la estructura de combinación óptica paralela [1] basada en dos moduladores electro-ópticos (EOM) y una red de difracción de Bragg (FBG), tal como se muestra en la figura 2.32. En este esquema, la portadora óptica del canal SCML sin modular se separa en dos caminos a través de un acoplador de dos puertos de salida. A continuación, ésta se aplica simultáneamente a dos EOMs encargados de modularla por la señal de datos de carga banda base (referenciado por  $EOM_p$  en la figura 2.32) y la señal de datos de etiqueta modulada en amplitud sobre una subportadora de radiofrecuencia  $f_{RF}$  (referenciado por  $EOM_L$  en la figura 2.32) independientemente. Posteriormente, la portadora modulada por cada una de las dos señales de datos en los EOMs se combina ópticamente a través de una red de difracción de Bragg  $FBG_{Tx}$  para generar el paquete óptico SCML.



**Figura 2.32:** Esquema de generación de paquete óptico SCML basada en combinación óptica paralela con  $FBG_{Tx}$  (carga reflejada y etiqueta transmitida por la  $FBG_{Tx}$ ), así como espectros de las señales de carga y etiqueta en distintos puntos del mismo.

El campo eléctrico de la portadora óptica del canal SCML sin modular y situado en la frecuencia angular  $\omega_0$  viene descrito a la entrada de la estructura de combinación óptica paralela como:

$$E_{in}(t) = |E_{in}|e^{j\omega_0 t} + c.c. \quad (2.37)$$

El modulador electro-óptico  $EOM_p$  se encarga de modular dicha portadora óptica por la información de carga banda base. Para conseguirlo, se aplican en los terminales eléctricos de entrada "i" del dispositivo dos señales. La primera es una tensión continua para polarizarlo en un punto de su respuesta P-V,  $V_{Bias,p,i}$ . La segunda corresponde con la señal de información de carga del paquete SCML,  $S_{p,i}(t) = C_{p,i} \cdot Carga(t)$ . El coeficiente  $C_{p,i} \in [0, 1]$  representa la fracción de señal de carga total,  $Carga(t)$  (ec. 2.4), que se aplica al puerto eléctrico de entrada "i" del  $EOM_p$ . Así pues, el campo óptico de salida puede expresarse como:

$$E_p(t) = \frac{\sqrt{1 - K_{1x2}^2} \cdot |E_{in}|}{\sqrt{L_{EOM_p}}} [F_{p,u} e^{jA_{p,u}(t)} + F_{p,d} e^{jM_p \cdot A_{p,d}(t)}] e^{j(\omega_0 t + \Delta\phi_p + \pi/2)} + c.c. \quad (2.38)$$

donde  $F_{p,u} = a_p \cdot b_p$  y  $F_{p,d} = \sqrt{1 - a_p^2} \cdot \sqrt{1 - b_p^2}$  siendo  $a_p^2$  y  $b_p^2$  las fracciones de potencia óptica acopladas en cada uno de los brazos del  $EOM_p$ . El parámetro  $M_p$  hace mención a la configuración de los electrodos del  $EOM_p$  para conseguir que el cambio de fase en ambos brazos sea del mismo signo ( $M_p = 1$ ) u opuesto ( $M_p = -1$ ).  $L_{EOM_p}$  representa las pérdidas ópticas del  $EOM_p$ . El parámetro  $\Delta\phi_p$  representa el desfase óptico que se produce entre los dos brazos de la estructura paralela.  $K_{1x2}$  es el coeficiente de acoplo del campo

asociado al acoplador 1x2. El coeficiente  $A_{p,i}$  incluye tanto la información de la señal de carga aplicada al puerto eléctrico "i" del  $EOM_p$  como la tensión  $V_{BIAS_{p,i}}$  empleada para polarizar el  $EOM_p$  en el punto deseado de su respuesta P-V. En concreto, éste puede describirse a través de la siguiente expresión:

$$A_{p,i}(t) = \pi \frac{V_{BIAS_{p,i}}}{V_{\pi DC}^{EOM_p}} + \pi \cdot C_{p,i} \cdot A_{Pay}(t) \quad (2.39)$$

donde  $A_{Pay}(t)$  se ha definido en la expresión 2.7 con un índice de modulación óptico de la señal de carga  $OMI_p = \left( V_{pp}^C / V_{\pi RF}^{EOM_p} \right)$ .

El modulador electro-óptico  $EOM_L$  se emplea para modular la portadora óptica con la información de la señal de datos de etiqueta modulada en amplitud previamente sobre una subportadora de radiofrecuencia,  $f_{RF}$ . En este caso, el campo a la salida del  $EOM_L$  puede describirse como:

$$E_L(t) = \frac{K_{1x2} \cdot |E_{in}|}{\sqrt{L_{EOML}}} \left[ F_{L,u} e^{j\phi_{L,u}(t)} + F_{L,d} e^{jM_L \cdot \phi_{L,d}(t)} \right] e^{j\omega_0 t} + c.c. \quad (2.40)$$

siendo  $F_{L,u} = a_L \cdot b_L$  y  $F_{L,d} = \sqrt{1 - a_L^2} \cdot \sqrt{1 - b_L^2}$ , donde  $a_L^2$  y  $b_{EOML}^2$  representan las fracciones de potencia óptica acopladas en cada uno de los brazos del  $EOM_L$ . El parámetro  $M_L$  indica si la configuración de los electrodos del  $EOM_L$  origina que el cambio de fase en ambos brazos es del mismo signo ( $M_L = 1$ ) u opuesto ( $M_L = -1$ ).  $L_{EOML}$  representa las pérdidas ópticas del  $EOM_L$ . El término  $\phi_{L,i}(t)$  representa el desfase óptico producido sobre el puerto "i" del  $EOM_L$  descrito de la siguiente forma:

$$\phi_{L,i}(t) = \pi \frac{V_{Bias_{L,i}}}{V_{\pi DC}^{EOML}} + \pi \cdot C_{L,i} \cdot A_{Label}(t) \cdot \cos(w_{RF}t + \varphi_i) \quad (2.41)$$

donde  $A_{Label}(t)$  se ha definido en la expresión 2.8 con un índice de modulación óptico de la señal de etiqueta  $OMI_L = (2V_p^{RF} / V_{\pi RF}^{EOML}) [1 + m_L]$ .  $V_{BIAS_{L,i}}$  es la tensión de polarización aplicada en el brazo "i" del  $EOM_L$ . Sustituyendo la expresión 2.41 en 2.40 y aplicando el desarrollo en serie de funciones de Bessel (identidad de Jacobi-Anger), el campo eléctrico a la salida del  $EOM_L$  puede describirse como:

$$E_L(t) = \frac{K_{1x2} \cdot |E_{in}| e^{j\omega_0 t}}{\sqrt{L_{ISO} L_{EOM}}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k \left[ F_{L,u} e^{jA_{L,u}} J_{k,Lu}(t) e^{jk(w_{RF}t + \varphi_u)} + F_{L,d} e^{jM_L A_{L,d}} M_L^k J_{k,Ld}(t) e^{jk(w_{RF}t + \varphi_d)} \right] + c.c. \quad (2.42)$$

siendo  $A_{L,i} = \pi \cdot (V_{BIAS_{L,i}} / V_{\pi DC}^{EOML})$  y  $J_{k,Li}(t) = J_k(\pi \cdot C_{L,i} \cdot A_{Label}(t))$  la función de Bessel de primera especie y orden k. Este término representa la contribución de la señal de etiqueta aplicada al puerto eléctrico "i" del  $EOM_L$  y situado en la frecuencia angular  $kw_{RF}$  respecto a la central del canal SCML,  $w_0$ .

A continuación se va a realizar el estudio considerando que las señales de carga,  $P(t)$ , y etiqueta,  $L(t)$ , se modelan por dos valores constantes 0 y 1, asociados a los bit cero y uno respectivamente. Esta hipótesis ha sido considerada en el modelo realizado para un único modulador, justificando su validez en el caso de que los distintos dispositivos empleados en el sistema tuvieran respuestas frecuenciales que no alterasen la forma de los bits transmitidos. De esta forma el estudio se simplifica y se pueden extraer una serie de conclusiones sobre la interferencia entre las señales del paquete una vez detectadas, así como la importancia de algunos dispositivos para eliminarla. Posteriormente en la

subsección 2.2.3 se completará el modelo con la inclusión de coeficientes que modelan los efectos originados por la respuesta frecuencial no ideal de los dispositivos.

Los campos eléctricos a la salida de ambos dispositivos EOMs se combinan ópticamente a través de una red de difracción de Bragg  $FBG_{Tx}$  y un circulador. El campo eléctrico a la salida de dicho esquema de generación de paquete óptico SCML se puede expresar como:

$$E_o(t) = E_p(t)|_{Tx} + E_L(t)|_{Tx} \quad (2.43)$$

siendo  $E_p(t)|_{Tx} = E_p(t) * h_{FBG_{Tx}}^p(t)$  el campo óptico de salida del  $EOM_p$  que ha sido filtrado por la  $FBG_{Tx}$  a través de su respuesta impulsiva  $h_{FBG_{Tx}}^p(t)$  (corresponde con la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Tx}$  en el esquema mostrado en la figura 2.32).  $E_L(t)|_{Tx} = E_L(t) * h_{FBG_{Tx}}^L(t)$  representa el campo óptico de salida del  $EOM_L$  que ha sido filtrado por la  $FBG_{Tx}$  a través de su respuesta impulsiva  $h_{FBG_{Tx}}^L(t)$  (corresponde con la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Tx}$  en el esquema mostrado en la figura 2.32). Ambos campos se pueden expresar como:

$$E_p(t)|_{Tx} = \frac{\sqrt{1 - K_{1x2}^2} \cdot |E_{in}| e^{j(\omega_0 t + \Delta\phi_p + \pi/2)}}{\sqrt{L_C^p L_{EOM_p}}} [F_{p,u} e^{jA_{p,u}} + F_{p,d} e^{jM_{p,A_{p,d}}}] \cdot H_{FBG_{Tx},0}^p + c.c. \quad (2.44)$$

$$E_L(t)|_{Tx} = \frac{K_{1x2} \cdot |E_{in}|}{\sqrt{L_C^L L_I L_{EOM}}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k \left[ \begin{array}{l} F_{L,u} e^{j(A_{L,u} + k\varphi_u)} J_{k,L,u} + \\ + F_{L,d} e^{j(M_{L,A_{L,d}} + k\varphi_d)} M_{L,k,L,d}^k \end{array} \right] e^{j(w_0 + kw_{RF})t} \cdot H_{FBG_{Tx},k}^L + c.c. \quad (2.45)$$

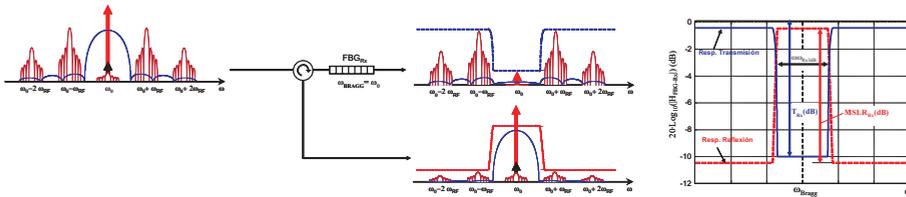
donde  $H_{FBG_{Tx},k}^p$  y  $H_{FBG_{Tx},k}^L$  corresponden con las respuestas frecuenciales de la  $FBG_{Tx}$ <sup>8</sup> a la frecuencia angular  $w = w_0 + kw_{RF}$  empleadas para filtrar y combinar las señales de carga y etiqueta respectivamente.  $L_C$  y  $L_I$  representan las pérdidas ópticas de inserción entre puertos contiguos del circulador óptico y del aislador óptico empleados en el esquema. Los coeficientes  $L_C^p$  y  $L_C^L$  representan las pérdidas ópticas de inserción asociadas al pasar la señal de carga y etiqueta a través del circulador. Dependiendo del esquema empleado en el transmisor, estas pérdidas serán  $L_C$  o  $2L_C$ , según la señal atraviese el circulador una o dos veces. En el esquema empleado en esta sección,  $L_C^p = 2L_C$  y  $L_C^L = L_C$ . En la figura 2.32 se muestran los espectros de las señales de carga y etiqueta antes y después de ser combinados ópticamente a través de la  $FBG_{Tx}$ .

El campo eléctrico obtenido a la salida del nodo generador SCML es transmitido a través del enlace de fibra óptica hasta el nodo receptor SCML. Una vez allí, se aplica a la etapa de prefiltrado óptico basada en una red de difracción de Bragg  $FBG_{Rx}$  (ver figura 2.33) que se encargará de separar ópticamente las informaciones de carga y etiqueta del paquete óptico SCML. Posteriormente, cada una de las salidas de la  $FBG_{Rx}$  se aplica a los fotodetectores que se encargan de recuperar las señales de datos eléctricas carga y etiqueta respectivamente. Así pues, el campo eléctrico de entrada al fotodetector puede describirse de la siguiente forma:

<sup>8</sup>La  $FBG_{Tx}$  empleada para combinar la señal de carga y etiqueta en el esquema de combinación óptica paralela puede realizarse de dos formas: a) reflejando la carga y transmitiendo la etiqueta o 2) transmitiendo la carga y reflejando la etiqueta.

$$E_{ph}^{in}(t) = \left\{ \begin{aligned} &D_p e^{j(\Delta\phi_p + \pi/2)} \left[ F_{p,u} e^{jA_{p,u}} + F_{p,d} e^{jM_p A_{p,d}} \right] \cdot H_{FBG_{Tx,0}}^p \cdot H_0 \cdot e^{j\omega_0 t} + \\ &+ D_L \sum_{k=-\infty}^{\infty} j^k \left[ \begin{aligned} &F_{L,u} e^{j(A_{L,u} + k\varphi_u)} J_{k,L,u} + \\ &+ F_{L,d} e^{j(M_L A_{L,d} + k\varphi_d)} M_L^k J_{k,L,d} \end{aligned} \right] \cdot H_{FBG_{Tx,k}}^L \cdot H_k \cdot e^{j(w_0 + kw_{RF})t} \end{aligned} \right\} + C.C. \quad (2.46)$$

donde  $D_p = |E_{in}| \sqrt{1 - K_{1x2}^2} / \sqrt{L_C^{Rx} L_C^p L_{EOMp}}$  y  $D_L = |E_{in}| K_{1x2} / \sqrt{L_C^{Rx} L_C^L L_{EOMp}}$ . El coeficiente  $L_C^{Rx}$  corresponde con las pérdidas ópticas asociadas al circulator empleado en la etapa de prefiltrado óptico de detección. En función del puerto de salida empleado la  $FBG_{Rx}$ ,  $L_C^{Rx}$  vale  $2L_C$  (reflexión) o  $L_C$  (transmisión). La expresión 2.46 está compuesta por dos grupos de términos asociados a la naturaleza de la información y localización espectral de los mismos sobre la portadora óptica. Así pues, el primer grupo viene asociado únicamente a la información de la señal de datos de carga banda base modulada sobre la portadora óptica del canal SCML, mientras el segundo corresponde con la información de etiqueta situados en las frecuencias angulares  $\pm kw_{RF}$ , con  $k$  entero, respecto a la portadora óptica del canal. Se debe matizar que dentro de este segundo grupo de términos asociados a las contribuciones de la señal de etiqueta, tendremos los localizados sobre la frecuencia angular de la subportadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica,  $w_0 \pm w_{RF}$  (términos cuando  $k=-1$  y  $1$ ), así como los términos de etiqueta originados por la no linealidad de la respuesta del  $EOM_L$  situados sobre la propia portadora óptica (términos cuando  $k = 0$ ) y múltiplos de la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica,  $w_0 + kw_{RF}$  con  $k = \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$ . Por último, se debe destacar cómo cada uno de los términos de la expresión 2.46 se encuentra multiplicado por un factor  $H_k$ . Éste representa la cascada de la función de transferencia del enlace de fibra óptica (ec. 2.12) y la red de difracción de Bragg de la etapa de prefiltrado óptico,  $FBG_{Rx}$ , empleada en el nodo de recepción  $H(w) = H_{fibra}(w) \cdot H_{FBG_{Rx}}(w)$  a la pulsación  $w = w_0 + kw_{RF}$  con  $k$  entero.



**Figura 2.33:** Esquema de prefiltrado óptico basado en  $FBG_{Rx}$  (carga reflejada y etiqueta transmitida por la  $FBG_{Rx}$ ).

Finalmente, el campo eléctrico del canal SCML descrito en 2.46 es aplicado al fotodetector para recuperar la señal de datos eléctrica de carga o etiqueta del paquete SCML dependiendo del puerto de salida de la etapa de prefiltrado óptico elegido (reflexión o transmisión de la FBG), tal como ha sido descrito en la figura 2.33. Ésta va a ser filtrada eléctricamente por un filtro paso bajo con ancho de banda asociado a la señal de datos a recuperar (carga o etiqueta), de forma que la expresión de la fotocorriente banda base viene descrita de la siguiente forma:

$$i_{ph}(t_n)|_{BB}^{2EOMP} = \left[ \begin{aligned} & \Re D_p^2 [F_{p,u}^2 + F_{p,d}^2 + 2F_{p,u}F_{p,d} \cos(\psi_p)] \cdot |H_{FBGT_x,0}^p|^2 \cdot |H_0|^2 + \\ & + \Re D_L^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ \left[ \begin{aligned} & F_{L,u}^2 |J_{k,Lu}|^2 + F_{L,d}^2 |J_{k,Ld}|^2 + \\ & + 2F_{L,u}F_{L,d} J_{k,Lu} J_{k,Ld} \cos(\psi_L) \end{aligned} \right] \cdot |H_{FBGT_x,k}^L|^2 \cdot |H_k|^2 \right\} + \\ & + 2\Re D_p D_L \left\{ \begin{aligned} & F_{L,u}F_{L,u}J_{0,Lu} \sin(\psi_{pL1}) + \\ & + F_{L,u}F_{p,d}J_{0,Lu} \sin(\psi_{pL2}) + \\ & + F_{L,d}F_{p,u}J_{0,Ld} \sin(\psi_{pL3}) + \\ & + F_{L,d}F_{p,d}J_{0,Ld} \sin(\psi_{pL4}) \end{aligned} \right\} \cdot H_{FBGT_x,0}^L \cdot H_{FBGT_x,0}^p \cdot |H_0|^2 \end{aligned} \right] \quad (2.47)$$

donde

$$\begin{aligned} \psi_p &= \pi A_{Pay} (C_{p,u} - M_p C_{p,d}) + \pi \frac{V_{Biasp}}{V_{\pi DC}^{EOMP}} \\ \psi_L &= \pi \frac{V_{BiasL}}{V_{\pi DC}^{EOML}} + k \Delta \varphi_{ud} - (1 - M_L) k \pi / 2 \\ \psi_{pL1} &= \pi \left( \frac{V_{BiasL,u}}{V_{\pi DC}^{EOML}} - \frac{V_{Biasp,u}}{V_{\pi DC}^{EOMP}} \right) - \pi C_{p,u} A_{Pay} - \Delta \phi_p \\ \psi_{pL2} &= \pi \left( \frac{V_{BiasL,u}}{V_{\pi DC}^{EOML}} - \frac{M_p V_{Biasp,d}}{V_{\pi DC}^{EOMP}} \right) - \pi M_p C_{p,d} A_{Pay} - \Delta \phi_p \\ \psi_{pL3} &= \pi \left( \frac{M_L V_{BiasL,d}}{V_{\pi DC}^{EOML}} - \frac{V_{Biasp,u}}{V_{\pi DC}^{EOMP}} \right) - \pi C_{p,u} A_{Pay} - \Delta \phi_p \\ \psi_{pL4} &= \pi \left( \frac{M_L V_{BiasL,d}}{V_{\pi DC}^{EOML}} - \frac{M_p V_{Biasp,d}}{V_{\pi DC}^{EOMP}} \right) - \pi M_p C_{p,d} A_{Pay} - \Delta \phi_p \end{aligned}$$

Los parámetros  $V_{Biasp} = V_{Biasp,u} - M_p V_{Biasp,d}$  y  $V_{BiasL} = V_{BiasL,u} - M_L V_{BiasL,d}$  corresponden con las tensiones totales de polarización aplicadas al  $EOMP$  y  $EOML$  respectivamente. El término  $\Delta \varphi_{ud} = \varphi_u - \varphi_d$  es el desfase eléctrico de la subportadora de radiofrecuencia de etiqueta aplicada entre las entradas eléctricas superior ( $\varphi_u$ ) e inferior ( $\varphi_d$ ) del  $EOML$ .

Como conclusión de este estudio cabe destacar que la expresión 2.47 describe el modelo analítico de la componente banda base de la fotocorriente eléctrica detectada de la señal de datos del paquete SCML (carga o etiqueta), muestreada en el instante  $t_n$ , cuando se emplea un esquema de combinación óptica paralela basada en EOM y FBG para generar el paquete óptico SCML, así como detección del mismo con prefiltrado óptico basado en FBG. Al igual que en el modelo desarrollado para el esquema de generación SCML que emplea un único EOM, la expresión 2.47 contiene información sobre el origen y tipo de señal que integra cada uno de los términos de la señal recuperada, permitiendo vislumbrar distintas estrategias a seguir a la hora de minimizar a la interferencia de las dos señales que integran el paquete SCML cuando cada una de ellas es detectada en detección. En este caso, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. La componente banda base de la fotocorriente detectada y deducida en la expresión 2.47 está compuesta varios grupos de términos. Éstos se pueden organizar en tres grupos asociados al tipo de señal detectada, expresándose dicha fotocorriente como:

$$i_{ph}(t)|_{BB}^{2EOMP} = i_{ph}(t)|_{BB}^P + i_{ph}(t)|_{BB}^L + i_{ph}(t)|_{BB}^{OCB} \quad (2.48)$$

donde

- $i_{ph}(t)|_{BB}^P$  corresponde con el primer grupo de términos de la expresión 2.47 y está asociado a la modulación de la portadora óptica por la señal de datos de carga banda base a través del  $EOMP$ .

- $i_{ph}(t)|_{BB}^L$  corresponde con el segundo grupo de términos de 2.47 y representa los términos asociados únicamente a la etiqueta. Concretamente tendremos los localizados sobre la frecuencia angular de la subportadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica,  $w_0 \pm w_{RF}$  (términos cuando  $k=-1$  y  $1$ ), así como los términos de etiqueta originados por la no linealidad de la respuesta del  $EOM_L$  situados sobre la propia portadora óptica  $w_0$  (términos cuando  $k=0$ ) y múltiplos de la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica,  $w_0 + kw_{RF}$  con  $k = \pm 2, \pm 3, \dots, \pm \infty$ . Los términos de etiqueta situados sobre la portadora óptica van a contribuir en la interferencia de la señal de etiqueta sobre la señal de información de carga dentro del proceso de recuperación de ésta última.
  - $i_{ph}(t)|_{BB}^{OCB}$  viene descrito por el tercer grupo de términos de la expresión 2.47. Concretamente corresponde con el batido de la portadora óptica (OCB, Optical Carrier Beating) en el proceso de detección cuando la portadora óptica es dividida en el acoplador y transmitida por los dos caminos desfasados  $\Delta\phi_p$  entre sí de la estructura interferométrica de combinación óptica paralela empleada en la generación y posteriormente combinada a través de la  $FBG_{Tx}$ . Cabe destacar que el término interferente por OCB existe aunque una o ambas señales del paquete óptico no se transmitan (OMIL y/o OMIP sean cero) y dependerá del valor del desfase existente entre los brazos de la estructura interferométrica  $\Delta\phi_d$ .
2. Cada uno de los términos incluye información sobre el tipo de señal (carga o etiqueta), configuración empleada en los dispositivos EOMs ( $EOM_p$ ,  $EOM_L$ ) y  $FBG_{Tx}$  para generar el paquete SCML, así como de la  $FBG_{Rx}$  para detectarlo.
- Cada término viene identificado por el subíndice "p" o "L" que informa que éste ha sido originado al modular la portadora óptica con el  $EOM_p$  o  $EOM_L$ .
  - Los datos de la señal de carga del paquete se encuentran identificados a través de los coeficientes  $C_{p,i} \cdot A_{p,i}$  y los de etiqueta por  $J_{k,Li}$ . El índice "i" representa el puerto eléctrico de entrada del EOM empleado.
  - Cada término se encuentra afectado por la respuesta frecuencial de la  $FBG_{Tx}$ ,  $H_{FBG_{Tx},k}^S$ , empleada para la combinación de las informaciones de la carga ( $S = p$ ) y etiqueta ( $S = L$ ) en la etapa de generación del paquete óptico SCML. Se ha de puntualizar que dicha respuesta depende de la configuración de la  $FBG_{Tx}$  en el esquema de generación del paquete SCML: 1) carga reflejada ( $H_{FBG_{Tx},k}^p = H_{FBG_{Tx},k}^R$ ) y etiqueta transmitida ( $H_{FBG_{Tx},k}^L = H_{FBG_{Tx},k}^T$ ), 2) carga transmitida ( $H_{FBG_{Tx},k}^p = H_{FBG_{Tx},k}^T$ ) y etiqueta reflejada ( $H_{FBG_{Tx},k}^L = H_{FBG_{Tx},k}^R$ ). La respuesta frecuencial de reflexión y transmisión de la  $FBG_{Tx}$  en campo a una frecuencia angular  $w_0 + kw_{RF}$  corresponden con  $H_{FBG_{Tx},k}^R$  y  $H_{FBG_{Tx},k}^T$  respectivamente.
  - En el proceso de recuperación de los datos de carga y/o etiqueta del paquete óptico, cada término se ve afectado por la respuesta frecuencia de la  $FBG_{Rx}$ , incluida en  $H_k$  y empleada en la etapa de prefiltrado óptico del nodo receptor. Hay que tener en cuenta que dicha respuesta dependerá del puerto de salida óptico de la etapa de prefiltrado óptico basada en la  $FBG_{Rx}$  empleado (reflexión o transmisión).

3. Las FBGs empleadas en el esquema de generación y detección juegan un papel crucial a la hora de recuperar los datos de carga y etiqueta, consiguiendo minimizar las interferencias entre ambas señales. El objetivo es el de recuperar los datos de carga  $(i_{ph}(t)|_{BB}^P)$  o de etiqueta  $(i_{ph}(t)|_{BB}^L)$  independientemente, sin que exista interferencias por parte de la otra señal que integra el paquete óptico. Para conseguirlo, cada una de las FBGs tendrá la siguiente misión:
  - La  $FBG_{Tx}$  se encarga de eliminar el término de etiqueta modulado en banda base sobre la portadora óptica por no linealidad de la respuesta P-V del  $EOM_L$  y el de batido de la portadora óptica (OCB) que se materializa en los términos de la fotocorriente detectada en banda base  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$  cuando  $k = 0$  y  $i_{ph}(t)|_{BB}^{OCB}$  respectivamente. Como se puede comprobar en la expresión 2.47, esto se consigue sin más que conseguir que la respuesta de la  $FBG_{Tx}$  empleada para filtrar y combinar la etiqueta en el paquete SCML sea tal que  $H_{FBG_{Tx},0}^L = 0$ .
  - La  $FBG_{Rx}$  se encarga de recuperar la carga o etiqueta y que viene asociado al término de la fotocorriente banda base detectada  $(i_{ph}(t)|_{BB}^P)$  o  $(i_{ph}(t)|_{BB}^L)$ , respectivamente. Para conseguirlo, la respuesta de la  $FBG_{Rx}$  asociada al puerto empleado para recuperar la carga (reflexión) o etiqueta (transmisión) debe valer  $H_{FBG_{Rx},k} = 0$ , con  $k \neq 0$ , o  $H_{FBG_{Rx},0} = 0$  respectivamente.
4. La generación de las señales de carga y etiqueta se realiza de forma independiente en cada uno de los dos EOMs del esquema de combinación óptica paralelo. Por lo tanto, y a diferencia del esquema basado en un único EOM, el índice de modulación óptico de cada señal únicamente emplea el margen dinámico de la respuesta P-V del EOM asociado, no compitiendo con el de la otra señal del paquete óptico.

### 2.2.2. Configuraciones de interés para la estructura de combinación óptica paralela.

El modelo general desarrollado para el esquema de combinación óptica paralela presenta múltiples alternativas de implementación dependiendo de la configuración particular de sus dispositivos EOM y  $FBG_{Tx}$  dentro del esquema del transmisor. Concretamente:

- Configuración de los moduladores electro-ópticos  $EOM_p$  y  $EOM_L$  del transmisor en función de cómo se aplique la señal de datos en sus terminales eléctricos de entrada. Así pues, la señal de datos (carga o etiqueta) se puede aplicar en un sólo terminal (Single Drive) o en los dos terminales (Dual Drive), disponiendo esta última de varias alternativas en función de cómo sea el desfase existente entre las señales aplicadas entre ambos brazos del EOM (90 grados o 180 grados conocida como Push-Pull).
- Configuración de la  $FBG_{Tx}$ . Tal como se comentó anteriormente, la  $FBG_{Tx}$  puede configurarse de modo que la combinación óptica de las señales de carga y etiqueta se realice de una de las dos formas posibles: 1) carga (Reflexión) y etiqueta (transmisión), 2) carga (transmisión) y etiqueta (reflexión).

Este punto se va a centrar en estudiar las configuraciones de interés en lo concerniente a la forma en que las señales de carga y etiqueta que integran el paquete óptico son combinadas ópticamente a través de la  $FBG_{Tx}$ , identificando las características que debe tener la  $FBG_{Tx}$  para eliminar la interferencia entre la señales del paquete. Por lo tanto se tomará como hipótesis de partida las siguientes:

- La configuración óptima del  $EOM_p$  es Dual Drive Push-Pull, consiguiendo únicamente una modulación de amplitud de la señal de carga banda base sobre la portadora óptica y eliminando la modulación de fase (chirp) existente en el caso de emplear Single-Drive.

Para ello, se deberá sustituir los siguientes valores de la señal de carga en el modelo teórico desarrollado en la sección 2.2.1:  $Carga_{p,u} = Carga_{p,d} = Carga/2$  ( $C_{p,u} = C_{p,d} = 1/2$ ),  $M_p = -1$  para conseguir que el desfase entre los brazos del  $EOM_p$  sea de 180 grados.

- La configuración del  $EOM_L$  dependerá del tipo de generación que quedamos de etiqueta, pudiendo darse las opciones de Doble Banda Lateral (DSB, Double Side-Band) o Banda Lateral Única (SSB, Single Side-Band). Para conseguirlo, el desfase entre las señales aplicadas en ambos brazos del  $EOM_L$  debe ser 180 grados o 90 grados respectivamente.

En el modelo teórico desarrollado debe sustituirse los siguientes valores de la señal de etiqueta:  $Etiqueta_{Lu} = Etiqueta_{Ld} = Etiqueta_L/2$  ( $C_{L,u} = C_{L,d} = 1/2$ ), y  $J_{k,Lu} = J_{k,Ld} = J_k(\pi \cdot A_{Label}/2)$ . Un desfase entre la portadora aplicada entre los puertos eléctricos de entrada del  $EOM_L$ ,  $\Delta\varphi_{ud}$ , origina un desfase total entre los brazos del mismo igual a  $\Delta\varphi_{EOM} = \Delta\varphi_{ud} + (1 - M_L)\pi/2$ . Así pues, se consigue una modulación de etiqueta en doble banda lateral cuando  $\Delta\varphi_{EOM} = n\pi$ ,  $n = 0, \pm 1, \dots$ , o banda lateral única superior (SSB superior) o inferior (SSB inferior) cuando  $\Delta\varphi_{EOM} = -\pi/2$  o  $\pi/2$ , respectivamente.

- Se van a emplear moduladores electro-ópticos cuyas constantes de acoplo de campo en sus brazos,  $F_u$  y  $F_d$  sean similares. En la actualidad se disponen comercialmente de moduladores dual drive con relaciones de extinción [Ref] superiores a 30dB [ref], luego  $F_u \approx F_d \approx 0,5$ .

Teniendo en cuenta estas hipótesis, el campo eléctrico a la entrada del fotodetector desarrollado en la expresión 2.46 se puede reescribir en dominio de la frecuencia como:

$$E_{ph}^{in}(w) = \left[ D_p e^{j(\Delta\phi_p + \pi/2)} \cos(A_{Pay} + \pi V_{Biasp}/V_{\pi DC}^{EOMp}) \cdot H_{FBGTx,0}^p \cdot H_0 \cdot \delta(w - w_0) + D_L \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ J_{k,Lu} \cdot e^{j\frac{1}{2} \left( \pi \frac{V_{BiasL}}{V_{\pi DC}^{EOML}} + k(\Delta\varphi_{ud} + 2\pi) \right)} \cos\left( \frac{\pi}{2} \frac{V_{BiasL}}{V_{\pi DC}^{EOML}} + \frac{k(\Delta\varphi_{ud} + \pi)}{2} \right) \cdot H_{FBGTx,k}^L \cdot H_k \cdot \delta(w - (w_0 + kW_{RF})) \right\} \right] + c.c. \quad (2.49)$$

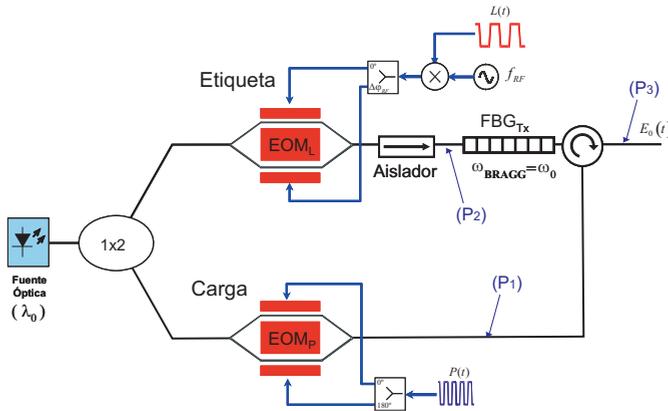
donde  $J_{k,Lu} = J_k(\pi \cdot A_{Label}/2)$ . A partir de la expresión anterior se extraen una serie de características espectrales del paquete SCML cuando se emplea esta configuración:

- La señal de carga banda base se encuentra modulada en amplitud sobre la portadora óptica gracias al empleo del  $EOM_p$  configurado en Dual Drive Push-Pull y tal como se observa en el primer término de la expresión 2.49.
- El espectro de etiqueta puede ser de tipo doble banda lateral (DSB) o Banda lateral única (SSB) en función del desfase de la subportadora aplicado entre los puertos de entrada eléctricos del  $EOM_L$ ,  $\Delta\varphi_{RF}$  (equivalente al desfase aplicado entre los brazos del  $EOM_L$   $\Delta\varphi_{EOM}$  descrito previamente), tal como se puede comprobar en el segundo grupo de términos de la expresión 2.49. Se debe recordar que existe una contribución de etiqueta en banda base por no linealidad de la respuesta P-V del  $EOM_L$  (término del segundo grupo de la expresión 2.49 cuando  $k = 0$ ).

A continuación se muestran los casos prácticos de interés del esquema general de combinación óptica paralela atendiendo a la configuración de la  $FBG_{Tx}$  empleada en el mismo.

### Combinación óptica paralela con carga en reflexión

Esta configuración se caracteriza por emplear la  $FBG_{Tx}$  de forma que se encarga de reflejar la información de carga banda base modulada sobre la portadora óptica y transmitir la etiqueta modulada sobre la subportadora de radiofrecuencia a través de la  $FBG_{Tx}$ , tal como se muestra en la figura 2.34.

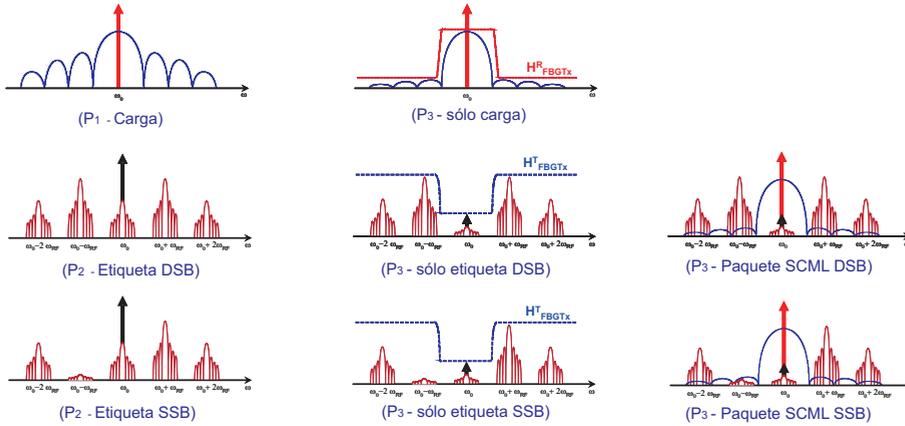


**Figura 2.34:** Esquema de generación SCML basada en combinación óptica paralela donde la carga es reflejada por la  $FBG_{Tx}$

Para este caso, las respuestas frecuenciales de la  $FBG_{Tx}$ ,  $H_{FBG_{Tx},k}^p$  y  $H_{FBG_{Tx},k}^L$ , corresponden con las respuestas de reflexión y transmisión respectivamente. Por lo tanto, únicamente se debe sustituir  $H_{FBG_{Tx},k}^p = H_{FBG_{Tx}}^R(w = w_0 + kw_{RF})$  y  $H_{FBG_{Tx},k}^L = H_{FBG_{Tx}}^T(w = w_0 + kw_{RF})$  en el modelo general desarrollado en la subsección 2.2.

En la figura 2.35 se muestran los espectros de la carga y etiqueta, así como del paquete SCML generado con esta configuración, donde se identifican los casos de generación de etiqueta en doble banda lateral (DSB) o banda lateral única (SSB). En este caso, la  $FBG_{Tx}$  debe ser diseñada con las siguientes características:

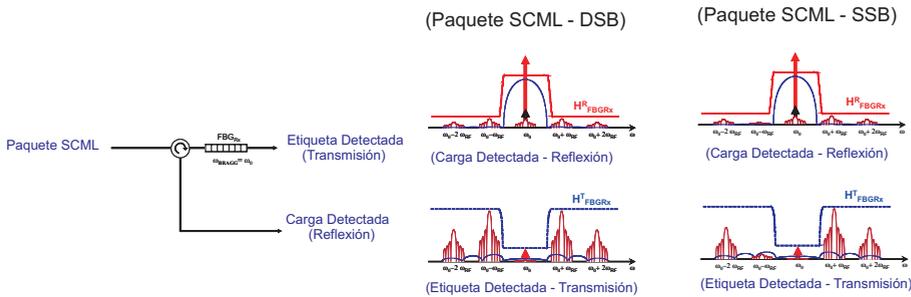
- La  $FBG_{Tx}$  debe estar centrada en la frecuencia angular central del canal, por lo que  $w_{BRAGG} = w_0$ .
- El ancho de banda de la  $FBG_{Tx}$ ,  $BW_{Tx,3dB}$  debe ser lo suficientemente grande para que pueda contener a la señal de carga modulada en banda base sobre la portadora óptica. En líneas generales, éste sería de  $2 \cdot BR_p$  como mínimo para el caso de señales con formato NRZ.
- El coeficiente de transmisión en la banda de rechazo de la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Tx}$ ,  $T_{Tx}$ , es el encargado de eliminar el término de etiqueta modulada sobre la portadora óptica (segundo término de la expresión 2.49 cuando  $k = 0$ ) mediante el coeficiente  $H_{FBG_{Tx},0}^T$ . Cabe recordar que éste origina la interferencia



**Figura 2.35:** Espectros de carga y etiqueta del paquete SCML en varios puntos de medida del transmisor mostrado en la figura 2.34

de la etiqueta sobre la carga detectada,  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$  cuando  $k = 0$ , y del término de batido de la portadora óptica en detección  $i_{ph}(t)|_{BB}^{OCB}$ , deducida en la expresión en la fotocorriente detectada de la expresión 2.47, e imposible de eliminar en detección. Por lo tanto,  $T_{Tx}$  debe diseñarse lo mayor posible para anular dicho término.

En recepción se empleará el esquema de prefiltrado típico mostrado en la figura 2.36, de forma que la carga se refleja mientras que la etiqueta se transmite por la  $FBG_{Rx}$ .



**Figura 2.36:** Etapa de prefiltrado óptico con FBG. Espectros de las señales de carga y etiqueta a la salida de dicha etapa en caso de paquete SCML - SSB

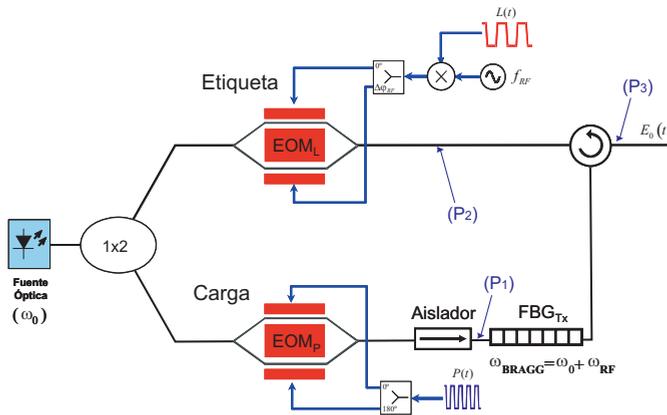
En este caso, la  $FBG_{Rx}$  debe ser diseñada con las siguientes características:

- La  $FBG_{Rx}$  debe estar centrada en la pulsación central del canal, siendo  $w_{BRAGG} = w_0$ .
- El ancho de banda de la banda de paso de la  $FBG_{Rx}$ ,  $BW_{Rx,3dB}$ , debe ser lo suficientemente grande para que pueda contener a la señal de carga modulada en banda base sobre la portadora óptica, tal como sucedía con la  $FBG_{Tx}$ . Por lo tanto, debe ser  $2 \cdot BR_p$ , como mínimo.

- Para recuperar la señal de carga, el coeficiente  $MSLR_{Rx}$  de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe diseñarse lo mayor posible para eliminar los términos de etiqueta situados en las pulsaciones  $w_0 \pm kw_{RF}$  a través de  $H_k$ , con  $k \neq 0$  (segundo término de la expresión 2.49), y que corresponden con  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$ .
- Cuando se recupera la etiqueta, el coeficiente de transmisión en la banda de rechazo de la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ ,  $T_{Rx}$ , debe diseñarse lo mayor posible para eliminar el término de carga modulado sobre la portadora óptica a través de  $H_0$  (primer término de la expresión 2.49) y que corresponden con  $i_{ph}(t)|_{BB}^P$ .

### Combinación óptica paralela con carga en transmisión

En este caso, la  $FBG_{Tx}$  se configura de forma que transmite la información de carga banda base modulada sobre la portadora óptica y refleja la etiqueta modulada sobre la subportadora de radiofrecuencia, tal como se muestra en la figura 2.37.

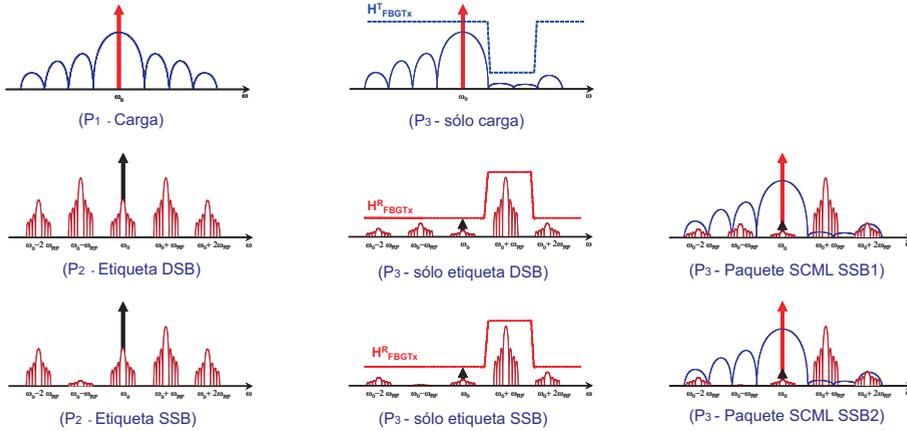


**Figura 2.37:** Esquema de generación SCML basada en combinación óptica paralela donde la carga es transmitida por la  $FBG_{Tx}$

Las respuestas frecuenciales de la  $FBG_{Tx}$ ,  $H_{FBG_{Tx},k}^P$  y  $H_{FBG_{Tx},k}^L$ , corresponden a las respuestas de transmisión y reflexión respectivamente. Por lo tanto, únicamente se debe sustituir  $H_{FBG_{Tx},k}^P = H_{FBG_{Tx}}^T(w = w_0 + kw_{RF})$  y  $H_{FBG_{Tx},k}^L = H_{FBG_{Tx}}^R(w = w_0 + kw_{RF})$  en el modelo general desarrollado. En la figura 2.38 se muestran los espectros de la carga y etiqueta, así como del paquete SCML generado con esta configuración, identificando cuando la etiqueta es generada en DSB o SSB en el  $EOM_L$ .

Las características de  $FBG_{Tx}$  en este caso deben satisfacer:

- La  $FBG_{Tx}$  debe estar centrada sobre una de las bandas laterales de la etiqueta del paquete óptico, por lo que la  $w_{BRAGG} = w_0 + w_{RF}$  (banda superior) o  $w_{BRAGG} = w_0 - w_{RF}$  (banda inferior).
- El ancho de banda de la  $FBG_{Tx}$ ,  $BW_{Tx,3dB}$ , debe ser lo suficientemente grande para que pueda contener a la señal de etiqueta modulada sobre la portadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica del canal. En líneas generales, éste sería de  $2 \cdot BR_L$  como mínimo para el caso de señales con formato NRZ.



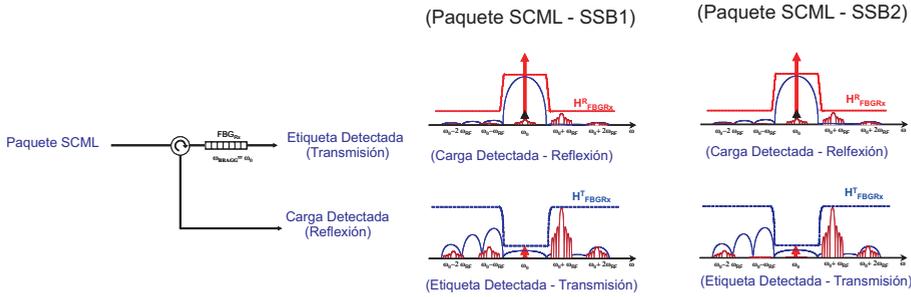
**Figura 2.38:** Espectros de carga y etiqueta del paquete SCML en varios puntos de medida del transmisor mostrado en la figura 2.37

- El coeficiente  $MSLR_{Tx}$  de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Tx}$  es el encargado de eliminar el término de etiqueta modulado sobre la portadora óptica a través de  $H_{FBG_{Tx},0}^L$  (segundo grupo de términos de la expresión 2.49 cuando  $k = 0$ ), causante de los términos de interferencia de la etiqueta sobre la carga detectada,  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$  cuando  $k = 0$ , y del término de batido de la portadora óptica en detección  $i_{ph}(t)|_{BB}^{OCB}$ , deducido en la expresión en la fotocorriente detectada de la expresión 2.47. Por lo tanto,  $MSLR_{Tx}$  debe ser lo mayor posible.

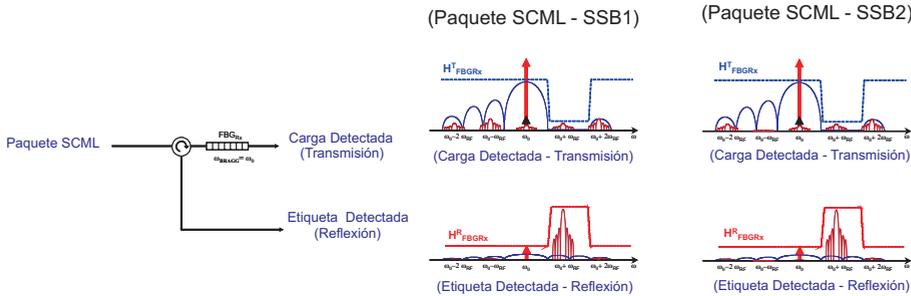
Cabe destacar que con esta configuración se consigue generar un paquete SCML con etiqueta SSB ópticamente gracias a la  $FBG_{Tx}$ , de forma simple e independientemente de que la etiqueta sea generada previamente en DSB o SSB a través del  $EOM_L$ . Esto reporta la ventaja de menor uso de ancho de banda total del canal SCML y simplicidad de implementación respecto al caso de emplear la combinación óptica paralela con carga en reflexión. Dado que se dispone de un paquete SCML SSB, existen dos opciones a la hora de separar la carga y etiqueta mediante la etapa de prefiltrado óptico del receptor SCML. La primera opción consiste en emplear la  $FBG_{Rx}$  de forma que se refleje la carga y se transmita la etiqueta, tal como se muestra en la figura 2.39. Las características de la  $FBG_{Rx}$  para opción coinciden con las estudiadas en el caso de la etapa de prefiltrado del esquema de combinación óptica paralela con carga reflejada.

La otra opción se basa en emplear la  $FBG_{Rx}$  de forma que se transmita la carga y se refleje la etiqueta, tal como se muestra en la figura 2.40. Las características de la  $FBG_{Rx}$  para opción deben ser:

- La  $FBG_{Rx}$  debe estar centrada sobre una de las bandas laterales de la etiqueta del paquete óptico, por lo que la  $w_{BRAGG} = w_0 + w_{RF}$  (banda superior) o  $w_{BRAGG} = w_0 - w_{RF}$  (banda inferior).
- El ancho de banda de la  $FBG_{Rx}$ ,  $BW_{Rx,3dB}$ , debe ser lo suficientemente grande para que pueda contener a la señal de etiqueta modulada sobre la portadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica del canal. En líneas generales, éste sería de  $2 \cdot BR_L$  como mínimo para el caso de señales con formato NRZ.



**Figura 2.39:** Etapa de prefiltrado óptico con FBG donde la carga es reflejada. Espectros de las señales de carga y etiqueta a la salida de dicha etapa en caso de paquete SCML - SSB

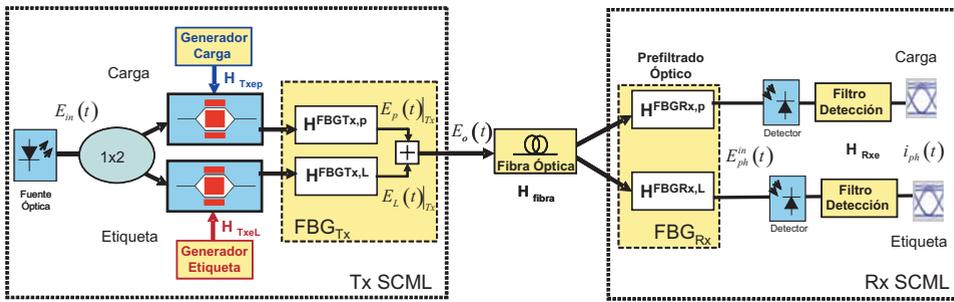


**Figura 2.40:** Etapa de prefiltrado óptico con FBG donde la carga es transmitida. Espectros de las señales de carga y etiqueta a la salida de dicha etapa en caso de paquete SCML - DSB o SSB

- En el proceso de recuperación de la señal de etiqueta, el coeficiente de transmisión en la banda de rechazo de la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ ,  $T_{Rx}$ , debe diseñarse lo mayor posible para eliminar el término de etiqueta situado la subportadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica del canal. Esto corresponde con el coeficiente  $H_k$  del segundo término de la expresión 2.49 cuando  $k$  vale 1 (etiqueta modulada en la banda superior del paquete SCML) o -1 (etiqueta modulada en la banda inferior del paquete SCML). Cabe destacar que el resto de términos de etiqueta "residuales" existentes cuando se generó el paquete SCML no pueden ser eliminados con esta opción de la  $FBG_{Rx}$ .
- A la hora de recuperar la etiqueta, el coeficiente  $MSLR_{Rx}$  de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe diseñarse lo mayor posible para eliminar el término de carga situado en banda base respecto a la portadora óptica. Esto se consigue a través del coeficiente  $H_0$  del primer término de la expresión 2.49), y que corresponden con  $i_{ph}(t)|_{BB}^P$ .

### 2.2.3. Inclusión de las respuestas reales de los dispositivos empleados en el sistema: Dispositivos eléctricos del transmisor y receptor, FBGs y fibra óptica

El modelo analítico de la fotocorriente detectada para el esquema de combinación óptica paralelo de generación de paquetes SCML descrito en la sección 2.2.1 considera las respuestas frecuenciales ideales de los dispositivos ópticos (FBG y fibra) y eléctricos (filtros eléctricos del transmisor/receptor) empleados. En esta sección se va a completar dicho modelo incluyendo unos coeficientes en la expresión 2.47 de la fotocorriente detectada para materializar los efectos de las respuestas reales de los dispositivos mencionados sobre cada uno de los bits de datos de carga y etiqueta transmitidos, siguiendo la misma metodología que en el caso de un EOM analizado en la sección 2.1.4.



**Figura 2.41:** Esquema general del modelo de Transmisor SCML basado en combinación óptica paralela y Receptor basado en prefiltrado óptico.

En la figura 2.41 se muestra el esquema de modelo empleado para este caso donde se detalla los dispositivos ópticos empleados así como las respuestas frecuenciales de los mismos <sup>9</sup>. En el anexo B.2 se describe detalladamente cómo se incorpora las respuestas de cada uno de los dispositivos considerados en el esquema 2.41 sobre el campo eléctrico del paquete SCML y la componente banda base de la fotocorriente de la señal detectada. La fotocorriente detectada para cada bit de datos recuperados en los instantes  $t_n$  (nota 7) en este estudio se puede expresar de la siguiente forma:

$$i_{ph,n}|_{BB}^{2EOMP} = \left\{ \begin{aligned} & \Re D_p^2 [F_{p,u}^2 B_{p,uu,n} + F_{p,d}^2 B_{p,dd,n} + 2F_{p,u}F_{p,d} \cos(\psi_{p,n}) B_{p,ud,n}] + \\ & + \Re D_L^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[ F_{L,u}^2 B_{L,k,uu,n} + F_{L,d}^2 B_{L,k,dd,n} + \right. \\ & \quad \left. + 2F_{L,u}F_{L,d} J_{k,Lu,n} J_{k,Ld,n} \cos(\psi_{L,n}) B_{L,k,ud,n} \right] + \\ & + 2\Re D_p D_L \left[ \begin{aligned} & F_{L,u}F_{p,u} J_{0,Lu,n} \sin(\psi_{pL1,n}) B_{Lp,uu,n} + \\ & + F_{L,u}F_{p,d} J_{0,Lu,n} \sin(\psi_{pL2,n}) B_{Lp,ud,n} + \\ & + F_{L,d}F_{p,u} J_{0,Ld,n} \sin(\psi_{pL3,n}) B_{Lp,du,n} + \\ & + F_{L,d}F_{p,d} J_{0,Ld,n} \sin(\psi_{pL4,n}) B_{Lp,dd,n} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

<sup>9</sup>Cada uno de los dispositivos se modela como un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI)

$$\begin{aligned}
J_{k,Li,n}^{Filtrada}(t) &= J_k \left( \pi \cdot C_{L,i} \cdot A_{Label,n}^{Filtrada} \right) \\
\psi_p &= A_{Pay,n}^{Filtrada} \left( C_{p,u} - M_p C_{p,d} \right) + \pi \frac{V_{Biasm_p}}{V_{\pi DC}^{EOMp}} \\
\psi_L &= \pi \frac{V_{Biasm_L}}{V_{\pi DC}^{EOML}} + k \Delta \varphi_{ud} - (1 - M_L) k \pi / 2 \\
\psi_{pL1} &= \pi \left( \frac{V_{Biasm_{L,u}}}{V_{\pi DC}^{EOML}} - \frac{V_{Biasm_{p,u}}}{V_{\pi DC}^{EOMp}} \right) - C_{p,u} A_{Pay,n}^{Filtrada} - \Delta \phi_p \\
\psi_{pL2} &= \pi \left( \frac{V_{Biasm_{L,u}}}{V_{\pi DC}^{EOML}} - \frac{M_p V_{Biasm_{p,d}}}{V_{\pi DC}^{EOMp}} \right) - M_p C_{p,d} A_{Pay,n}^{Filtrada} - \Delta \phi_p \\
\psi_{pL3} &= \pi \left( \frac{M_L V_{Biasm_{L,d}}}{V_{\pi DC}^{EOML}} - \frac{V_{Biasm_{p,u}}}{V_{\pi DC}^{EOMp}} \right) - C_{p,u} A_{Pay,n}^{Filtrada} - \Delta \phi_p \\
\psi_{pL4} &= \pi \left( \frac{M_L V_{Biasm_{L,d}}}{V_{\pi DC}^{EOML}} - \frac{M_p V_{Biasm_{p,d}}}{V_{\pi DC}^{EOMp}} \right) - M_p C_{p,d} A_{Pay,n}^{Filtrada} - \Delta \phi_p \\
B_{p,ij,n} &= \gamma_{p,i,n}^{OptTx} \cdot \gamma_{p,i,n}^{Opt} \cdot \left( \gamma_{p,j,n}^{OptTx} \right)^* \cdot \left( \gamma_{p,j,n}^{Opt} \right)^* \cdot \gamma_{p,ij,n}^{Rxe} \\
B_{L,k,ij,n} &= \gamma_{L,k,i,n}^{OptTx} \cdot \gamma_{L,k,i,n}^{Opt} \cdot \left( \gamma_{L,k,j,n}^{OptTx} \right)^* \cdot \left( \gamma_{L,k,i,n}^{Opt} \right)^* \cdot \gamma_{L,k,ij,n}^{Rxe} \\
B_{Lp,ij,n} &= \gamma_{0,L,i,n}^{OptTx} \cdot \gamma_{0,L,i,n}^{Opt} \cdot \left( \gamma_{p,j,n}^{OptTx} \right)^* \cdot \left( \gamma_{p,j,n}^{Opt} \right)^* \cdot \gamma_{Lp,ij,n}^{Rxe}
\end{aligned}$$

donde  $A_{Pay,n}^{Filtrada}$  (ec. B.21) representa el valor de la información de carga del paquete óptico detectado en el instante de muestreo  $t_n$  con valor  $P_n$  y al que se incluye el efecto de la respuesta de los dispositivos eléctricos del generador de datos de carga a través del coeficiente  $\gamma_n^{Txep}$  (ec. B.20). Del mismo modo,  $A_{Label,n}^{Filtrada}$  (ec. B.25) contiene el valor de la información de etiqueta del paquete óptico detectado en el instante de muestreo  $t_n$  con valor  $L_n$  y al que se incluye el efecto de la respuesta de los dispositivos eléctricos del generador de datos de etiqueta a través del coeficiente  $\gamma_n^{Txel}$  (ec. B.24). El efecto de la respuesta de la  $FBG_{Tx}$  sobre cada uno de los bits del paquete óptico se encuentra recopilado en los coeficientes  $\gamma_{p,i,n}^{OptTx}$  (ec. B.45) y  $\gamma_{L,k,i,n}^{OptTx}$  (ec. B.47). De igual modo, la inclusión de los efectos de la fibra óptica y la FBG del receptor ( $FBG_{Rx}$ ) se encuentran recopilados en los coeficientes  $\gamma_{p,i,n}^{Opt}$  (ec. B.49) y  $\gamma_{L,k,i,n}^{Opt}$  (ec. B.51). Por último, la respuesta del filtro eléctrico del receptor en  $\gamma_{p,ij,n}^{Rxe}$  (ec. B.53),  $\gamma_{L,k,ij,n}^{Rxe}$  (ec. B.55) y  $\gamma_{Lp,ij,n}^{Rxe}$  (ec. B.57).

El cálculo de los parámetros de calidad del paquete óptico (QF, OE y ER) se obtiene de igual forma que en el caso del esquema de generación basado en un único EOM descrito en la sección 2.1.4, donde  $i_{ph,n}$  viene descrita a través de la expresión 2.50 en esta ocasión.

## 2.2.4. Evaluación del modelo para el esquema de combinación óptica paralela

La evaluación del modelo para el esquema de combinación óptica paralela va a centrarse en las características de las FBGs empleadas tanto en el transmisor como en el receptor, corroborando la misión e influencia de éstas sobre la calidad de las señales de carga y etiqueta detectadas tal como se vislumbró en el modelo desarrollado en 2.47. Para conseguirlo, se comienza con el análisis de la FBG empleada en el transmisor,  $FBG_{Tx}$ , suponiendo que la  $FBG_{Rx}$  es ideal<sup>10</sup>. A continuación, se va a proceder a realizar el estudio

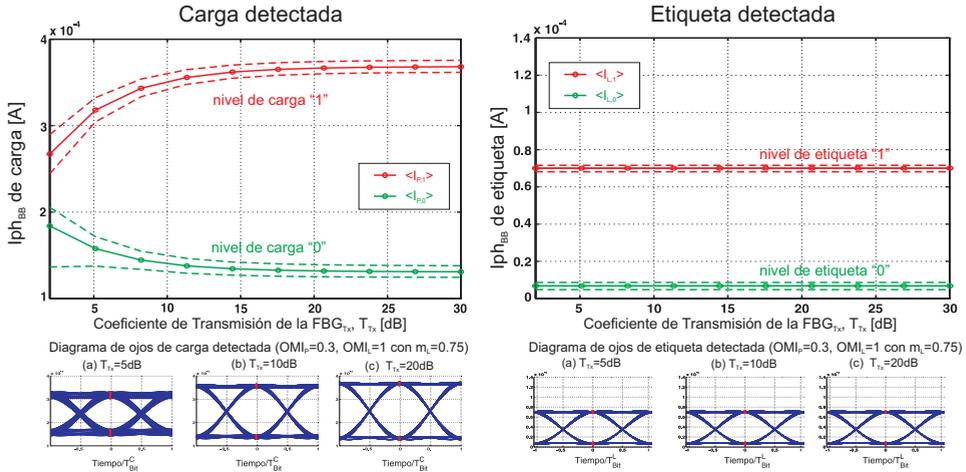
<sup>10</sup> Esta connotación significa que la FBG tiene unas respuestas frecuenciales "ideales" en transmisión (dentro de banda eliminada:  $H_{FBGTx}^T(w = w_{BRAGG}) = 0$ , fuera de banda eliminada  $H_{FBGTx}^T(w \neq w_{BRAGG}) = 1$ ) y en reflexión (dentro de banda paso:  $H_{FBGTx}^T(w = w_{BRAGG}) = 1$ , fuera de banda paso  $H_{FBGTx}^T(w \neq w_{BRAGG}) = 0$ ). En este estudio, esta condición se ha supuesto para el caso de una FBG cuyos parámetros característicos son  $T=50\text{dB}$ ,  $MSLR=50\text{dB}$ ,  $\text{Roll-off}=10\text{dB/GHz}$  y  $BW_{3dB} = 2,5 \cdot BR_p$

de los parámetros de la  $FBG_{Rx}$  cuando la  $FBG_{Tx}$  es ideal. Por último, se realizará un barrido de los índices de modulación ópticos de carga,  $OMI_P$  y etiqueta,  $OMI_L$ , para varias casos de los parámetros de las FBGs estudiadas. En esta sección se ha considerado un sistema SCML tal como se describe en la figura 2.41, donde los dispositivos empleados presentan las siguientes características: Fuente óptica monocromática (longitud de onda de emisión  $\lambda_0=1550\text{nm}$  y potencia óptica emitida  $P_{in} = |E_{in}|^2 = 1\text{mW}$ ), EOMs ( $L_{EOM} = 0$  dB,  $V_\pi = 5\text{V}$ ,  $M=-1$ , polarizado en el punto de cuadratura de su curva P-V con pendiente positiva  $V_{Bias} = V_{3\pi}/2$ ,  $F_u = F_d = 0,5$  y con coeficientes  $C_{p,u} = C_{p,d} = 0,5$ ,  $C_{L,u} = C_{L,d} = 0,5$  para el  $EOM_p$  y el  $EOM_L$  respectivamente), desfase entre los brazos de la estructura de combinación óptica paralela,  $\Delta\phi_p$ , se ha considerado cero, señales de datos de carga ( $10\text{Gb/s}$  NRZ y  $OMI_p$ ) y de etiqueta ( $622\text{Mb/s}$  NRZ modulada sobre una subportadora de radiofrecuencia de  $18\text{GHz}$  con  $m_L = 0,75$  y  $OMI_L$ ) y FBGs ( $BW_{3dB} = 2.5 \cdot BR_p$ ,  $Roll - off = 10\text{dB/GHz}$ , T y MSLR). Los filtros eléctricos de transmisión y recepción utilizados son de tipo gaussianos de orden 2 y  $BW_{3dB} = 0.75 \cdot BR_x$ , siendo  $BR_x$  la tasa de bit de cada señal de datos (carga o etiqueta) que se desea filtrar. Se ha de puntualizar que en este estudio no se han considerado las fuentes de ruido térmico, shot y oscuridad, y el tramo de fibra entre el transmisor y receptor es nulo. De esta forma, se puede identificar y cuantificar claramente las degradaciones asociadas únicamente a la interferencia entre las señales de carga y etiqueta del paquete óptico, así como al efecto de las respuestas de los dispositivos ópticos y eléctricos empleados sobre las señales detectadas.

### Características de la $FBG_{Tx}$ : Combinación óptica de carga y etiqueta.

En el modelo teórico analítico desarrollado en el apartado anterior se dedujo que la  $FBG_{Tx}$  se encargaba de combinar ópticamente las señales de carga y etiqueta del paquete óptico SCML en la estructura de generación de combinación óptica paralela. Cada una de las dos señales han sido generadas ópticamente de forma independiente a través de los moduladores electro-ópticos  $EOM_p$  y  $EOM_L$  respectivamente. Tal como se demostró en dicho modelo, el  $EOM_L$  genera adicionalmente a los términos de etiqueta situados a la frecuencia  $f_0 \pm kf_{RF}$  otros asociados a la propia señal de etiqueta localizados en banda base sobre la propia portadora óptica por la no linealidad de su respuesta P-V. Estos últimos junto al término de batido de la portadora óptica,  $i_{ph}(t)|_{BB}^{OCB}$  de la fotocorriente detectada, contribuyen a la degradación de la calidad de la señal de carga del paquete SCML detectada, siendo únicamente posible eliminarlos a través de la  $FBG_{Tx}$  en el propio proceso de combinación óptica de las señales de carga y etiqueta. A continuación se va a evaluar los parámetros de la  $FBG_{Tx}$  ( $T_{Tx}$  y  $MSLR_{Tx}$ ) definidos en la figura 2.32, determinando los valores que deben tomar para eliminar los términos interferentes de etiqueta banda base. En este punto se ha considera que en el receptor se emplea la etapa de prefiltrado óptico basada en  $FBG_{Rx}$  ideal (ver nota 10) donde la carga es reflejada y la etiqueta es transmitida mediante la  $FBG_{Rx}$ .

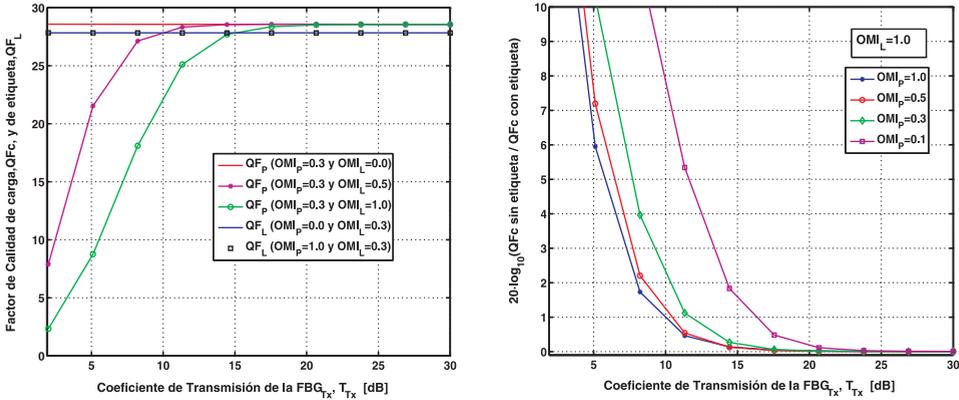
En el caso de emplear la configuración de combinación óptica paralela con carga reflejada y etiqueta DSB transmitida con la  $FBG_{Tx}$  (figura 2.34), el coeficiente de transmisión  $T_{Tx}$ , que caracteriza la respuesta frecuencial de transmisión de la  $FBG_{Tx}$ , es el encargado de eliminar la portadora óptica y la contribución de etiqueta modulada en banda base sobre la misma provenientes del  $EOM_L$ , y como consecuencia, el término interferente de la fotocorriente de la carga detectada. Esto se comprueba al observar la figura 2.42, que muestra la evolución del valor de la fotocorriente detectada de carga y etiqueta muestreada en el instante  $t_n$  (mitad del período de bit) conforme varía el parámetro  $T_{Tx}$ . En ella se vislumbra cómo la anchura de las bandas asociadas a los niveles uno y cero de la carga



**Figura 2.42:** Fotocorriente detectada en el instante de muestreo  $t_n$  de las señales de carga y etiqueta en función del parámetro  $T_{Tx}$  de la  $FBG_{Tx}$  cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión con niveles de carga  $OMI_p = 0,3$  y etiqueta  $OMI_L = 1$  con  $m_L = 0,75$ . Diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para casos de  $T_{Tx} = 5\text{dB}$  (a),  $10\text{dB}$  (b) y  $20\text{dB}$  (c).

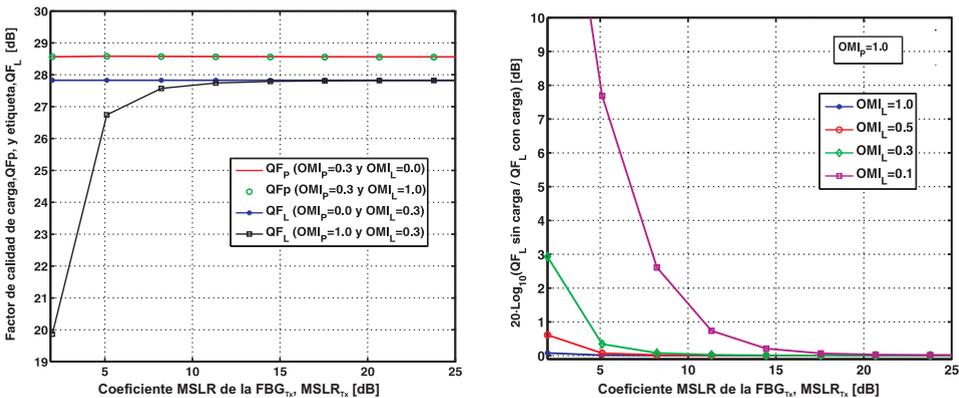
detectada es debida a dos mecanismos: el término interferente de etiqueta banda base y el asociado al efecto de las respuestas frecuenciales de los filtros eléctricos, FBGs y fibra sobre la forma de la señal de carga. Concretamente, el primer mecanismo predomina frente al segundo para valores bajos de  $T_{Tx}$ , disminuyendo éste al aumentar  $T_{Tx}$  hasta ser despreciable frente al segundo para valores altos de dicho coeficiente. Esto queda plasmado en la calidad de la señal de carga recuperada, sin más que comprobar como el factor de calidad de la carga,  $QF_C$ , cuando se transmite etiqueta y carga en el paquete aumenta conforme aumenta  $T_{Tx}$  hasta coincidir con el caso de que únicamente se transmita carga, tal como se muestra en la figura 2.43. En vista de los resultados, hace necesario determinar el valor del parámetro  $T_{Tx}$  que asegurarse que la interferencia de etiqueta banda base es eliminada totalmente por la  $FBG_{Tx}$ . Para ello se procede a determinar la penalización del factor de calidad de carga tal como se muestra en la figura 2.43, siendo necesario un  $T_{Tx} > 16,38\text{dB}$  para conseguir una penalización del  $QF_C$  menor de  $1\text{dB}$  con un  $OMI_p \geq 0,1$ . Como se observa en las figuras 2.42 y 2.43, la evolución y calidad de la etiqueta no varía con el parámetro  $T_{Tx}$ , tal como era de esperar.

El otro parámetro empleado para definir la  $FBG_{Tx}$  es la relación entre el nivel de la banda de paso y la eliminada de la respuesta de reflexión definido a través del parámetro  $MSLR_{Tx}$  en la figura 2.32. En la configuración bajo estudio, éste se encarga de eliminar las bandas laterales del espectro de la señal de carga que pueden caer sobre las contribuciones de la señal de etiqueta situadas en las frecuencias  $f_0 \pm f_{RF}$ . Así pues, será necesario que las bandas laterales del espectro de la señal de carga banda base se encuentren lo suficientemente suprimidas respecto a los niveles de etiqueta para que no influir en la calidad de esta última. En la figura 2.44 se muestra el factor de calidad de la carga y etiqueta cuando se varía el parámetro  $MSLR_{Tx}$ , donde sólo influye sobre el factor de calidad de la etiqueta,  $QF_L$ , aumentando este último conforme aumenta  $MSLR_{Tx}$  hasta



**Figura 2.43:** Factor de calidad de carga y etiqueta (Izquierda) y penalización del factor de carga (derecha) en función del parámetro de transmisión de la  $FBG_{Tx}$ ,  $T_{Tx}$ , cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión con niveles de carga  $OMI_p$  y etiqueta  $OMI_L$  con  $m_L = 0,75$ .

coincidir con el caso de emitir únicamente etiqueta en el paquete. El siguiente paso es determinar el valor de dicho parámetro para que no influya la carga sobre la calidad de la etiqueta. Para ello se determinan la penalización del factor de calidad de etiqueta tal como se muestra en la figura 2.44, siendo necesario un  $MSLR_{Tx} > 11,6dB$  para conseguir una penalización del  $QFL$  menor de 1dB con un  $OMI_L \geq 0,1$ . Los resultados anteriores coinciden en el caso de que se configure el  $EOM_L$  de forma que la etiqueta generada en banda lateral única (SSB), tal como se muestra en el espectro de la figura 2.35.



**Figura 2.44:** Factor de calidad de carga y etiqueta (Izquierda) y penalización del factor de etiqueta (derecha) en función del parámetro MSLR de la  $FBG_{Tx}$  cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión.

El otro esquema de combinación óptica paralela propuesto se basa en emplear la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Tx}$  para combinar ópticamente la carga en el paquete

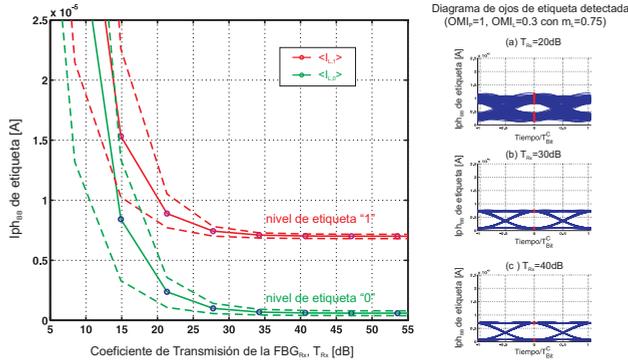
óptico, tal como se muestra en la figura 2.37. En este caso, el parámetro  $MSLR_{Tx}$  es el encargado de eliminar la portadora óptica y la contribución de etiqueta modulada en banda base sobre la misma provenientes del  $EOM_L$ , y como consecuencia, de los términos de interferencia asociados de la fotocorriente en la carga detectada. Por otro lado, el parámetro  $T_{Tx}$  se emplea para eliminar las bandas laterales del espectro de carga banda base que caen en las bandas de etiqueta situadas en las frecuencias  $f_0 \pm f_{RF}$ . Así pues, se puede comprobar cómo los parámetros  $NLPS_{Tx}$  y  $T_{Tx}$  empleados en este esquema coinciden con  $T_{Tx}$  y  $NLPS_{Tx}$  del esquema de combinación óptica paralela con etiqueta en transmisión respectivamente. Por tanto, el estudio coincide con el caso anterior, siendo en esta configuración necesario una  $FBG_{Tx}$  con  $NLPS_{Tx} > 16,38dB$ , para conseguir una penalización del  $QF_C$  menor de 1dB con un  $OMI_P \geq 0,1$ , y  $T_{Tx} > 11,6dB$ , para conseguir una penalización del  $QF_L$  menor de 1dB con un  $OMI_L \geq 0,1$ .

### Características de la $FBG_{Rx}$ : Separación de carga y etiqueta.

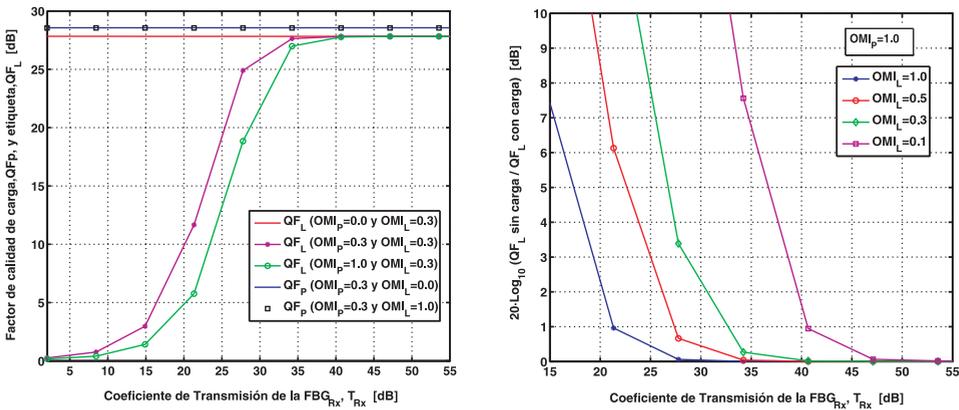
La  $FBG_{Rx}$  de la etapa de prefiltrado óptico se encarga de separar ópticamente la señal de carga y etiqueta del paquete óptico SCML. Existen dos configuraciones posibles de la  $FBG_{Rx}$  para poder llevar a cabo este proceso: 1) carga (reflejada) y etiqueta (transmitida) y 2) carga (transmitida) y etiqueta (reflejada). Estas configuraciones se podrán emplear o no dependiendo si el paquete SCML está constituido por la etiqueta en DSB o SSB, tal como se describe en el apartado 2.2.2. Este punto va a comenzar estudiando la primera de las dos configuraciones propuestas (carga reflejada y etiqueta transmitida), ya que es la comúnmente se emplea en prefiltrado óptico. Posteriormente, se analizará la segunda configuración en función de los resultados obtenidos. Para dicho estudio se ha supuesto que la  $FBG_{Tx}$  es ideal (ver nota 10).

En el esquema de prefiltrado óptico con la  $FBG_{Rx}$  configurada para reflejar la carga (figuras 2.36 y 2.39), la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$  se diseña de forma que la banda eliminada, caracterizada a través del parámetro  $T_{Rx}$ , se encargue de eliminar la señal de carga banda base modulada sobre la portadora óptica del paquete óptico SCML recibido, y de esta forma poder recuperar la señal de etiqueta. Esto queda constatado en la expresión de la fotocorriente deducida (e.c. 2.47 y e.c. 2.50 para los casos ideal y real), donde las contribuciones de la carga banda base se agrupan en el término de fotocorriente  $i_{ph}(t)|_{BB}^P$ , siendo éste interferente a la hora de recuperar la señal de etiqueta. En la figura 2.45 se muestra la evolución de la fotocorriente detectada de etiqueta, muestreada en el instante  $T_n$  (mitad del período de bit), en función del parámetro  $T_{Rx}$ . En ella se comprueba cómo las anchuras de las bandas asociados a los niveles uno y cero de etiqueta detectada disminuye conforme aumentamos  $T_{Rx}$ . Concretamente esta anchura se debe a dos mecanismos: el término de carga banda base  $i_{ph}(t)|_{BB}^P$  que interfiere a la etiqueta detectada y el asociado al efecto de las respuesta de los filtros eléctricos, FBGs y fibra óptica sobre la forma de la señal de etiqueta. Así pues, el primer mecanismo es prioritario para valores bajos del parámetro  $T_{Rx}$  ya que la  $FBG_{Rx}$  en transmisión elimina poco la contribución de la señal de carga banda base del paquete recibido. Sin embargo, conforme aumentamos el valor de  $T_{Rx}$ , dicha contribución es suprimida con mayor fuerza hasta que es despreciable ésta frente al segundo mecanismo. Esto mismo queda reflejado en la calidad de la señal de etiqueta recuperada mostrada en la figura 2.46, donde el factor de calidad de etiqueta,  $QF_L$ , aumenta conforme incrementa  $T_{Rx}$  cuando se transmiten las señales de carga y etiqueta en el paquete hasta coincidir con el caso de que únicamente se transmita etiqueta, siendo en esta situación cuando se elimina totalmente la interferencia de carga. El siguiente paso es determinar el valor de  $T_{Tx}$  que asegure que la interferencia

de carga es eliminada totalmente por la  $FBG_{Rx}$  cuando se recupera la señal de etiqueta. Para ello, se obtiene la penalización del factor de calidad de etiqueta para varios valores del  $OMI_L$  cuando tenemos un nivel de carga máximo  $OMI_p = 1$ , siendo necesario un  $T_{Rx} \geq 40,6\text{dB}$  para conseguir una penalización del  $QF_L$  menor de 1dB con un nivel de etiqueta de  $OMI_L \geq 0,1$  con  $m_L = 0,75$ .



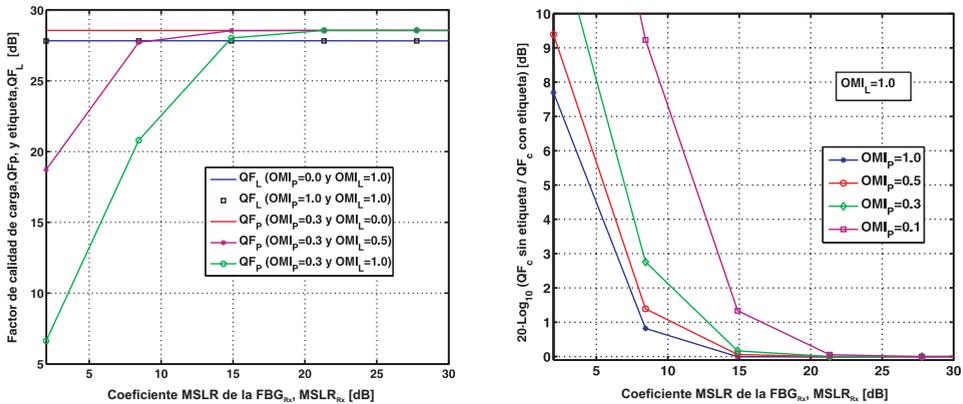
**Figura 2.45:** Fotocorriente detectada de las señales de carga y etiqueta en función del parámetro de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ ,  $T_{Rx}$ , cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión y prefiltrado óptico con carga reflejada, empleando un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_p = 1$  y etiqueta  $OMI_L = 0,3$  con  $m_L = 0,75$ . Diagrama de ojos de las señales de carga para casos  $T_{Rx} = 20\text{dB}$  (a),  $30\text{dB}$  (b) y  $40\text{dB}$  (c)



**Figura 2.46:** Factor de calidad de carga y etiqueta (Izquierda) y penalización del factor de carga (derecha) en función del parámetro de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ ,  $T_{Rx}$  cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión. Se emplea una señal SCML con niveles de carga  $OMI_p$  y etiqueta  $OMI_L$  con  $m_L = 0,75$ .

La respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ , caracterizada para fuera de la banda de paso a través del parámetro  $MSLR_{Rx}$ , se empleará para filtrar la señal de carga del paquete,

eliminando los términos de etiqueta del paquete situados a las frecuencias  $f_0 \pm k f_{RF}$ , y que se agrupan en el término de fotocorriente  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$ . En la figura 2.47 se muestra la evolución del factor de calidad de la carga detectada,  $QF_C$ , en función del parámetro  $NLPS_{Rx}$ , donde se comprueba como  $QF_C$  disminuye conforme aumenta el nivel de etiqueta transmitida  $OMI_L$  para un valor fijo de  $MSLR_{Rx}$ , mostrando la influencia de la etiqueta no eliminada por respuesta frecuencial de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ . Por lo tanto es necesario determinar el valor de  $MSLR_{Rx}$  de forma que permita eliminar la interferencia de etiqueta cuando se recupera la señal de carga. En la figura 2.47 se muestra la penalización del factor de calidad de carga para varios niveles de carga transmitida  $OMI_p$  cuando el nivel de etiqueta en el paquete es máximo  $EOM_L = 1$  con  $m_L = 0,75$ . de la misma se deduce que es necesario una  $FBG_{Rx}$  con  $MSLR_{Rx} \geq 16,8\text{dB}$  para conseguir una penalización del  $QF_C$  menor de 1dB con nivel de carga del paquete óptico de  $OMI_p \geq 0,1$ .



**Figura 2.47:** Factor de calidad de carga y etiqueta (izquierda) y penalización del factor de etiqueta (derecha) en función del parámetro MSLR de la  $FBG_{Rx}$ ,  $MSLR_{Rx}$ , cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión. Se emplea una señal SCML con niveles de carga  $OMI_p$  y etiqueta  $OMI_L$  con  $m_L = 0,75$ .

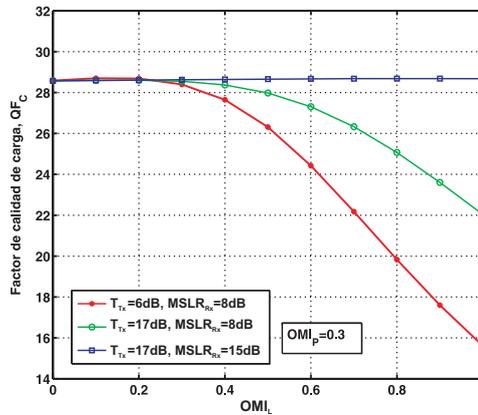
Los resultados obtenidos del estudio de los parámetros de la  $FBG_{Rx}$  en el caso de emplear un paquete óptico SCML con etiqueta en doble banda lateral (SCML-DSB) coinciden con el caso de emplear la etiqueta en banda lateral única (SCML-SSB), tal como era de esperar. Esto se debe a que el paquete óptico SCML-SSB únicamente difiere del SCML-DSB en que se anula una de las bandas de la etiqueta situada a  $f_0 - f_{RF}$  en SSB superior o  $f_0 + f_{RF}$  en SSB inferior, teniendo la otra banda el doble de nivel. Así pues, la degradación que sufre una de las señales del paquete en detección por parte de la otra es idéntica y del mismo nivel, pudiendo eliminarla con la misma  $FBG_{Rx}$  que el caso SCML-DSB.

El otro esquema de detección propuesto que emplea la técnica de prefiltrado óptico basada en la  $FBG_{Rx}$  donde se configura para transmitir la carga y reflejar la etiqueta en banda lateral única (figura 2.32). En esta configuración, la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$  se diseña de forma que la banda eliminada, caracterizada a través del parámetro  $T_{Rx}$ , se encargue de eliminar la etiqueta situada a la frecuencia  $f_0 + f_{RF}$  o  $f_0 - f_{RF}$ , según sea SSB superior o inferior respectivamente, del paquete óptico SCML recibido, y

como consecuencia del término interferente  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$  en la fotocorriente de la señal de carga detectada. Por otro lado, la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ , caracterizada a través del parámetro  $MSLR_{Rx}$  se emplea para eliminar la señal de carga banda base del paquete óptico SCML recibido, y que corresponde con el término interferente  $i_{ph}(t)|_{BB}^P$  en la fotocorriente de la señal de etiqueta detectada. Así pues, se puede comprobar cómo los valores de los parámetros  $T_{Rx}$  y  $MSLR_{Rx}$  de la  $FBG_{Rx}$  empleados en esta configuración corresponden con valores de los parámetros  $MSLR_{Rx}$  y  $T_{Rx}$  en el caso de que la  $FBG_{Rx}$  se configure para reflejar la carga. Como conclusión, la  $FBG_{Rx}$  debe diseñarse para que  $MSLR_{Rx} \geq 40,6\text{dB}$  para conseguir una penalización del  $QF_L$  menor de 1dB con un  $OMI_L \geq 0,1$  y  $T_{Rx} \geq 16,8\text{dB}$  para conseguir una penalización del  $QF_C$  menor de 1dB con un  $OMI_P \geq 0,1$ .

### Barrido de los índices de modulación ópticos de carga y etiqueta.

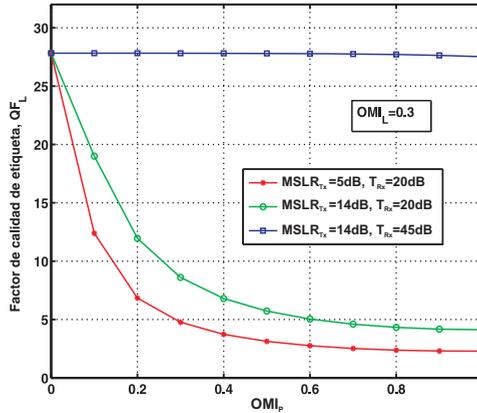
A continuación se va a proceder a realizar un estudio de los niveles de las señales de carga y etiqueta del paquete SCML, parametrizados a través de los índices de modulación óptica de carga,  $OMI_L$ , y etiqueta,  $OMI_P$  respectivamente, para varios casos de interés de las redes de difracción de Bragg empleadas en el transmisor ( $FBG_{Tx}$  y receptor ( $FBG_{Rx}$ ). El objetivo perseguido con este estudio consiste en determinar el valor óptimo de los niveles de  $OMI_P$  y  $OMI_L$  que nos permita conseguir la mejor figura de mérito del paquete SCML definida en 2.27.



**Figura 2.48:** Factor de calidad de carga en función del índice de modulación de etiqueta  $OMI_L$  cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión y detección con prefiltrado óptico basado en  $FBG_{Rx}$  con carga reflejada. El estudio se ha realizado para varios casos de interés de las FBGs empleadas,  $FBG_{Tx}$  ( $T_{Tx} = 6$  o  $17\text{dB}$  y  $MSLR_{Tx} = 10\text{dB}$ ) y  $FBG_{Rx}$  ( $T_{Tx} = 45\text{dB}$  y  $MSLR_{Tx} = 8$  o  $15\text{dB}$ ).

En la figura 2.48 se muestra cómo varía el factor de calidad de la señal de carga detectada  $QF_C$  cuando hacemos un barrido del nivel de etiqueta del paquete y con un nivel de carga  $OMI = 0,3$ . En concreto se ha obtenido las trazas para tres casos de interés de las FBGs empleadas. En la traza roja se observa como al aumentar  $OMI_L$  decrece el  $QF_C$  porque la  $FBG_{Tx}$  con  $T_{Tx} = 6\text{dB}$  no consigue eliminar el término interferente

$i_{ph}(t)|_{BB}^{XTalk-LP}$  ni la  $FBG_{Rx}$  con  $MSLR_{Rx} = 8dB$  el término interferente de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica de la fotocorriente detectada de carga. En la traza verde, la  $FBG_{Tx}$  con  $T_{Tx} = 17dB$  está diseñada para eliminar dicho término, pero la  $FBG_{Rx}$  con  $MSLR_{Rx} = 8dB$  no elimina el término interferente de etiqueta  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$  con  $k \neq 0$  de la fotocorriente de carga, por lo que el  $QF_C$  decrece al aumentar el  $OMI_L$ . Por último, en la traza azul se puede comprobar cómo el  $QF_C$  no varía al aumentar  $OMI_L$  ya que las FBGs con con  $T_{Tx} = 17dB$  y  $MSLR_{Rx} = 15dB$  han sido diseñadas para eliminar completamente ambas contribuciones de interferencia de etiqueta sobre la carga detectada. El nivel de carga del paquete viene relacionado con la degradación que sufre



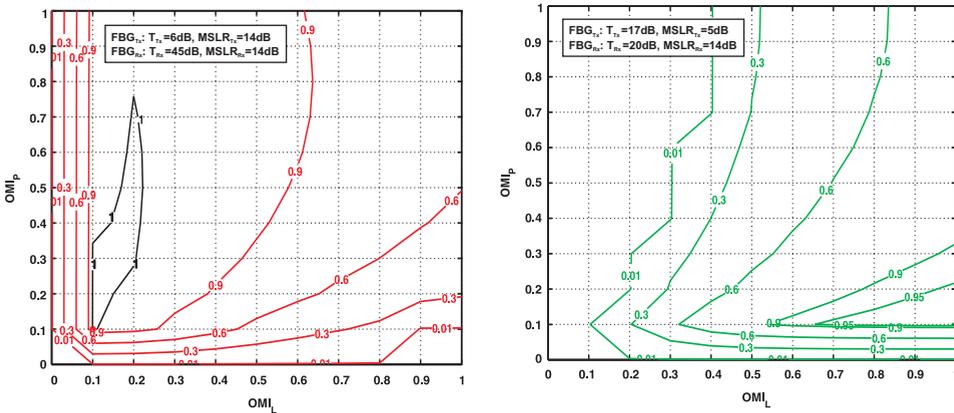
**Figura 2.49:** Factor de calidad de etiqueta en función del índice de modulación de carga  $OMI_P$  cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión y detección con prefiltrado óptico basado en  $FBG_{Rx}$  con carga reflejada. El estudio se ha realizado para varios casos de interés de las FBGs empleadas,  $FBG_{Tx}$  ( $T_{Tx} = 17dB$  y  $NLPS_{Tx} = 5$  o  $14dB$ ) y  $FBG_{Rx}$  ( $T_{Rx} = 20$  o  $45dB$  y  $NLPS_{Tx} = 15dB$ ).

la etiqueta detectada. Sin embargo, esta degradación será mayor o menor dependiendo de las características de las FBGs empleadas en el sistema, tal como se ha estudiado anteriormente en este apartado. En la figura se muestra cómo varía el factor de calidad de etiqueta detectada  $QF_L$  en función del nivel de carga  $OMI_P$  y con un nivel de etiqueta  $OMI_L = 0,3$ . Se han obtenido los resultados para tres situaciones de interés en cuanto a las características de las FBGs utilizadas. En la traza roja se comprueba cómo dicho factor de calidad decrece conforme aumenta el nivel de carga del paquete debido a que la  $FBG_{Tx}$  con  $MSLR_{Tx}$  no suprime totalmente la degradación originada por las bandas laterales del espectro de carga banda base que caen sobre las bandas de la etiqueta, ni tampoco la  $FBG_{Rx}$  con  $T_{Rx} = 20dB$  el término interferente de carga  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$  de la fotocorriente detectada de etiqueta. el segundo caso analizado se muestra en la traza verde, donde la  $FBG_{Tx}$  se diseña con  $MSLR_{Tx} = 14dB$  para que elimine totalmente el espectro de carga que cae sobre las bandas de etiqueta pero la  $FBG_{Rx}$  con  $T_{Rx} = 20dB$  no consigue eliminar totalmente el término  $i_{ph}(t)|_{BB}^L$ . Es en la tercera situación mostrada en la traza azul donde tanto la  $FBG_{Tx}$  con  $T_{Tx} = 14dB$  como la  $FBG_{Rx}$  con  $T_{Rx} = 45dB$  consiguen mitigar totalmente los términos que interfieren a la etiqueta, consiguiendo que el nivel de carga del paquete no afecte en la calidad de la señal de etiqueta detectada.

Por último, se puede concluir este apartado afirmando que con el diseño apropiado de las FBGs empleadas en el transmisor como en el receptor es factible conseguir que la calidad de cada una de las señales que integran en el paquete óptico en detección no se vea afectada por la interferencia originada entre ellas tanto en el proceso de combinación óptica del paquete SCML en el transmisor como el de separación óptica del mismo en recepción.

**Figura de Mérito del paquete SCML.**

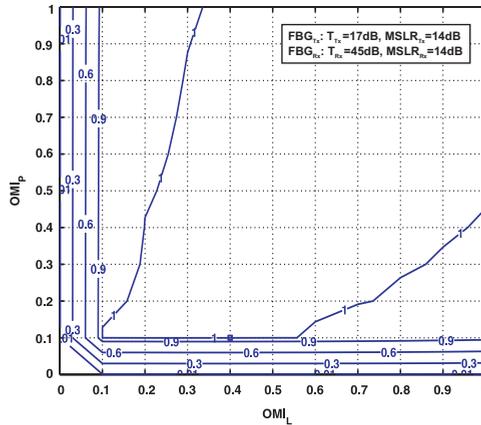
Para finalizar el estudio del esquema de combinación óptica paralela se va a proceder a determinar los niveles óptimos de las señales de carga y etiqueta que integran el paquete SCML de forma que permitan obtener la máxima calidad de las señales en detección. Así pues, el parámetro Figura de Mérito del paquete SCML,  $FM_{SCML}$ , permite determinar rápidamente dichos valores óptimos de las señales.



**Figura 2.50:** Figura de Mérito del paquete en función de los índices de modulación óptico de carga y etiqueta cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión y detección con prefiltro óptico basado en  $FBG_{Rx}$  con carga reflejada. El estudio se ha realizado para dos configuraciones de interés de las FBGs empleadas

En la figura 2.50 se muestra las curvas de nivel de  $FM_{SCML}$ , para dos configuraciones de las FBGs empleadas. En concreto, en gráfica de la izquierda de 2.50 se muestra la configuración donde la  $FBG_{Tx}$  utilizada no elimina completamente los términos interferentes de etiqueta generados en banda base por el  $EOM_L$  para valores altos de niveles de etiqueta. Cabe destacar que para este caso se ha elegido una  $FBG_{Rx}$  tal que permite separar completamente las señales de carga y etiqueta del paquete. Sin embargo, existe un rango de valores de carga y etiqueta, donde dichos términos interferentes son eliminados por la  $FBG_{Tx}$ , originando que el parámetro  $FM_{SCML}$  valga uno, o lo que es lo mismo, las señales de carga y etiqueta detectadas no se interfieren entre sí. En la gráfica de la derecha de 2.50 se muestra el caso emplear una  $FBG_{Tx}$  que eliminar la interferencia de la etiqueta banda base sobre la carga, pero que por contra utiliza una  $FBG_{Rx}$  que no es capaz de separar totalmente las señales de carga y etiqueta. Es por tanto, donde se comprueba cómo para valores bajos de etiqueta  $OMI_L < 0.2$ , el parámetro  $FM_{SCML} < 0$ , ya

que la señal de etiqueta tiene una calidad inferior al umbral. En este caso, el valor óptimo corresponde con aquel cuyo niveles de carga y etiqueta son  $OMI_P = 0,1$  y  $OMI_L = 1$ , con  $QF_P=28.25$ ,  $QF_L=27.72$ , siendo  $QF_P^{max}=28.25$ ,  $QF_L^{max}=28.01$ , y  $FM_{SCML}=0.989$ .



**Figura 2.51:** Figura de Mérito del paquete en función de los índices de modulación óptica de carga y etiqueta cuando se emplea el esquema de combinación óptica paralelo con etiqueta en transmisión y detección con prefiltrado óptico basado en  $FBG_{Rx}$  con carga reflejada. El estudio para la configuración óptima de las FBGs empleadas

Por último se muestra en la figura 2.51 el parámetro  $FM_{SCML}$  para una configuración de FBGs de forma que la  $FBG_{Tx}$  se encargue de eliminar el término interferente de etiqueta banda base y la  $FBG_{Rx}$  consiga separar completamente la carga y etiqueta del paquete. Así pues, se puede comprobar en este caso cómo existe un rango amplio de niveles de carga y etiqueta tales que no va a existir interferencias de entre las señales del paquete una vez detectadas. De entre todos los valores posibles nos interesa aquellos niveles de carga y etiqueta mayores,  $OMI_L=1$  y  $OMI_P=1$ , para que el nivel de las señales detectadas sean mayores y más inmunes a otros tipos de ruidos tales como el ruido término de los circuitos electrónicos.

## 2.3. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un modelo analítico que permite evaluar la calidad de las señales que integran un paquete óptico SCML cuando se emplean estructuras de generación basadas en modulador electro-óptico y red de difracción de Bragg, así como técnicas de prefiltrado óptico basadas en red de difracción de Bragg en detección.

Concretamente, en la sección 2.1 se ha tratado el esquema de generación que emplea un único EOM, mientras que en 2.2 se ha analizado la estructura de combinación óptica paralela basada en dos EOM configurados en paralelo y una red de difracción de Bragg. Para cada uno de los esquemas analizados se ha obtenido dicho modelo analítico en dos fases. En un primer momento se ha obtenido la expresión analítica de fotocorriente detectada de las señales de carga y etiqueta del paquete considerando que las respuestas de los dispositivos empleados son ideales (filtros eléctricos, fibra, red de difracción de Bragg).

A partir de la fotocorriente se han definido los parámetros de calidad de las señales individualmente (factor de calidad - QF, apertura del ojo - OE, relación de extinción - ER), así como la definición de un parámetro que determina la calidad del paquete SCML en su conjunto  $FM_{SCML}$ . Cabe destacar que gracias a este primer modelo es posible vislumbrar rápidamente cómo se combinaban las señales de carga y etiqueta a la hora de generar el paquete SCML, identificando las interferencias existente entre ellas tanto en la generación como en el proceso de detección. Posteriormente, el modelo analítico inicial se ha completado incorporando unos coeficientes que incluyen los efectos de las respuestas frecuenciales reales de los dispositivos empleados en el esquema (dispositivos eléctricos en el transmisor y receptor, fibra óptica, FBG) sobre la forma de los bits de los datos de carga y etiqueta. Esto permite realizar un estudio realista, cuyos resultados obtenidos con dichos modelos teóricos se han validado con el programa de simulación comercial de sistemas de comunicaciones ópticos VPISystem<sup>TM</sup>. Una serie de conclusiones se pueden extraer de los modelos desarrollados:

- La existencia de los términos de distorsión de etiqueta modulados en banda base sobre la portadora óptica cuando se emplea un modulador electro-óptico cuya respuesta P-V es no lineal en el proceso de generación del paquete SCML. Estos términos van a degradar la señal de carga del paquete.
- Se han estudiado cuatro configuraciones de generación basadas en un único modulador electro-óptico: Single Drive, Dual Drive Diferencial, Dual Drive Push Pull DSB y SSB. En todas ellas se ha comprobado que es imposible eliminar este término de degradación de etiqueta sobre la carga del paquete.
- Se ha propuesto la estructura de combinación óptica paralela basada en una red de difracción de Bragg,  $FBG_{Tx}$ , que se encarga de eliminar el término de etiqueta banda base generado por el modulador electro-óptico, además de combinar ópticamente la carga y etiqueta del paquete SCML. Se ha verificado que es posible eliminar dicho término mediante la  $FBG_{Tx}$ .
- Se ha estudiado el empleo de la etapa de prefiltrado óptico basada en una red de difracción de Bragg,  $FBG_{Rx}$  para separar ópticamente las dos señales que integran el paquete SCML. Se ha evaluado las prestaciones de la misma, comprobando es posible separar completamente la carga y etiqueta sin que exista interferencia entre ellas en el proceso de detección.
- Se ha comprobado que es posible determinar los niveles de carga y etiqueta óptimos para cada una de las configuraciones estudiadas a través del parámetro  $FM_{SCML}$ .
- Se ha verificado que el esquema de generación de paquetes ópticos SCML basado en la estructura de combinación óptica paralela con FBG presenta mejores prestaciones respecto al de emplear un único modulador, tales como: eliminación total de las diferentes interferencias existentes entre las señales de carga y etiqueta (intra-paquete) en el proceso de generación y/o detección del paquete SCML gracias a las redes de difracción de Bragg empleadas, independencia entre los índices de modulación ópticos empleados en las señales de carga y etiqueta, así como mejor calidad del paquete SCML tanto a nivel global (figura de mérito del paquete óptico SCML,  $FM_{SCML}$ ) como para las señales de carga y etiqueta de forma individual (QF, OE).

Por todo ello, el esquema de combinación óptica paralela va a ser la estructura elegida en esta tesis a la hora de implementar el nodo generador de la red de paquetes ópticos SCML.

## Capítulo 3

# Diseño de las características de las FBGs en la estructura de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con FBGs.

En el capítulo 2 se realizó el modelado matemático y estudio de las prestaciones de las configuraciones empleadas en la generación y detección de paquetes ópticos SCML con uno o varios moduladores electro-ópticos y redes de difracción de Bragg. Se concluyó que el esquema de combinación óptica paralela con EOM y FBG junto con la etapa de prefiltrado óptico basado en FBG son las estructuras elegidas a la hora de implementar la generación y detección de paquetes en una red óptica SCML. También se incidió sobre importancia de los parámetros de las respuestas de transmisión y reflexión de cada FBG empleada ( $T$ , MSLR,  $f_{Bragg}$ , Rolloff y  $BW_{3dB}$ ), debiendo ser diseñados para eliminar las interferencias producidas entre las señales de carga y etiqueta del paquete (interferencia intrapaquete) en generación y/o detección una vez sean detectadas en recepción.

En este capítulo se va proceder a obtener las ecuaciones de diseño de los parámetros de las FBGs empleadas en las tres configuraciones del esquema de combinación óptica paralela y detección por prefiltrado óptico propuestas en el capítulo 2, permitiendo relacionar los parámetros de las FBGs con las interferencias originadas en el paquete SCML, así como la cuantificación de las mismas. Para conseguirlo, primeramente se van a obtener las expresiones de las penalizaciones de las aperturas del diagrama de ojos de las señales de carga y etiqueta para la estructura de combinación óptica paralela a partir de la expresión de la fotocorriente detectada sin incluir las respuestas reales de las FBGs deducida en la ecuación 2.47 (válido ya que se supone que el ancho de banda y Rolloff de la FBG es tal que no afecta sobre la forma de los pulsos de la señal de carga y etiqueta detectados). Este estudio nos permitirá obtener unas expresiones de diseño simples y realistas de los parámetros  $T$  y MSLR de las FBGs. Posteriormente, se procederá a determinar el ancho de banda ( $BW_{3dB}$ ), Rolloff y  $f_{Bragg}$  a partir de las simulaciones de la penalización de la apertura del diagrama de ojos donde se incluyen las respuestas reales de las FBGs en la fotocorriente detectada (ec. 2.50), deduciendo unas expresiones de diseño para estos parámetros.

### 3.1. Estructura de combinación óptica paralela basada en FBG.

En esta sección se van a obtener las expresiones genéricas de la penalización de la apertura del diagrama de ojos de carga y etiqueta sin considerar las respuestas reales de las FBGs en la estructura de combinación óptica paralela basada en FBG y detección por prefiltrado óptico con FBG. Para ello, se parte de la expresión de la fotocorriente detectada deducida en la expresión 2.47 donde se va a particularizar para la configuración típica de los EOMs empleados en la práctica, tal como se indica a continuación:

- El modulador electroóptico de la carga,  $EOM_P$ , está configurado en Dual-Drive Push-Pull ( $C_{p,u} = C_{p,d} = 1/2$ ,  $M_p = -1$ ) y polarizado en cuadratura pendiente positiva ( $V_{Biasp} = 3V_{\pi DC}^{EOMP}/2$ ).
- El modulador electroóptico de etiqueta,  $EOM_L$ , está configurado en Dual-Drive ( $C_{L,u} = C_{L,d} = 1/2$ ), polarizado en cuadratura pendiente positiva ( $V_{BiasL} = 3V_{\pi DC}^{EOML}/2$ ) y empleando un desfase total entre los brazos  $\Delta\varphi_{EOM} = \Delta\varphi_{ud} + (1 + M_L) \cdot \pi/2 = \pi$  para generar etiqueta en doble banda lateral (DSB).

En este caso, la expresión de la fotocorriente detectada en el caso de emitir un bit P de carga con índice de modulación óptico, OMIP, y un bit L de etiqueta con índice de modulación óptico OMIL, donde L y P = 0 o 1, dependiendo de que el bits emitidos sea ceros o unos respectivamente, se expresa como:

$$i_{ph}|_{(P,L)}^{2EOMP} = \left[ \begin{aligned} & \frac{1}{2} \Re D_p^2 [1 + \sin(\pi A_{Pay}^P)] \cdot |H_{FBGT_x,0}^P|^2 \cdot |H_0|^2 + \\ & + \frac{1}{2} \Re D_L^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ |J_k^L|^2 |H_{FBGT_x,k}^L|^2 \cdot |H_k|^2 \right\} - \\ & - \Re D_p D_L \sqrt{2} \sin(\Delta\phi_p) J_0^L \sin(\pi A_{Pay}^P/2 + \pi/4) H_{FBGT_x,0}^L H_{FBGT_x,0}^P |H_0|^2 \end{aligned} \right] \quad (3.1)$$

La respuesta frecuencial de la  $FBG_{Tx}$  a la frecuencia angular  $w_0 + kw_{RF}$ ,  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  encargada de filtrar la carga y etiqueta en la generación del paquete corresponde con  $H_{FBGT_x,k}^P$  y  $H_{FBGT_x,k}^L$  respectivamente. El coeficiente  $H_k$  representa la respuesta frecuencial de la cascada de la fibra y la  $FBG_{Rx}$  a la frecuencia angular  $w_0 + kw_{RF}$ .

La expresión 3.1 está organizada en tres grupos de términos que corresponden con la carga, la etiqueta y el batido de la portadora óptica (OCB) asociado a la estructura interferométrica empleada en la generación del paquete SCML respectivamente:

$$i_{ph}|_{(P,L)}^{2EOMP} = i_{ph}|_{(P,L)}^P + i_{ph}|_{(P,L)}^L + i_{ph}|_{(P,L)}^{OCB} \quad (3.2)$$

Las FBGs empleadas en el transmisor y receptor SCML se encargan de eliminar todas las interferencias existentes entre las señales de carga y etiqueta detectadas. La tabla 3.1 resume qué términos interferentes hay presentes en esta estructura bajo estudio, así como la FBG encargada de eliminarlos:

Señal detectada	Interferencias del paquete SCML	FBG encargada de eliminar
Carga	Contribución interferente por batido de la portadora óptica (OCB)	FBGTx
	Contribución de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica ( $J_0^L$ ) generada por el EOML	FBGTx
	Contribuciones de etiqueta ( $J_k^L$ ) situadas en $w_0 + k \cdot w_{RF}$ con $k \neq 1$ (SSB-USB), $k \neq -1$ (SSB-LSB) o $k \neq \pm 1$ (DSB)	FBGTx y/o FBGRx
	Etiqueta del paquete SCML eliminada ópticamente en recepción. Depende del tipo de etiqueta empleada en el paquete SCML, $J_k^L$ con $k=1$ (SSB-USB), $k=-1$ (SSB-LSB) o $k = \pm 1$ (DSB).	FBGRx
Etiqueta	Residuo de carga filtrada que cae sobre la etiqueta en la generación del paquete SCML	FBGTx
	Carga del paquete SCML eliminada ópticamente en recepción	FBGRx

**Tabla 3.1:** Resumen de las interferencias existentes entre las señales de carga y etiqueta detectadas con el esquema de combinación óptica paralela y la FBG encargada de eliminarlas.

El término de interferencia por batido de portadora óptica (OCB) depende del desfase óptico entre los caminos de la estructura interferométrica del esquema de generación paralela, existiendo independientemente de que se transmita o no la señal carga y/o etiqueta en el paquete óptico. Además, se podrá conseguir que dicho desfase sea tal que esta distorsión desaparezca en función de la tecnología utilizada en la implementación de dicha estructura. En cambio, el resto de términos interferentes dependerán de la existencia de carga y etiqueta en el paquete. Así pues, se van a obtener de forma separada la penalización asociada por OCB y la asociada al resto de distorsiones en el caso de que no exista OCB, ya que de esta forma se puede independizar dichas fuentes de degradación en el caso de que no exista OCB en función de la tecnología empleada. Por último, debe recordarse que las penalizaciones de aperturas del diagrama del ojo de las señales de carga y etiqueta detectadas expresadas en unidades decibélicas se obtienen como  $LOE[dB] = 20 \cdot \log_{10}(LOE)$ , ya que relaciona señales eléctricas (fotocorriente detectada).

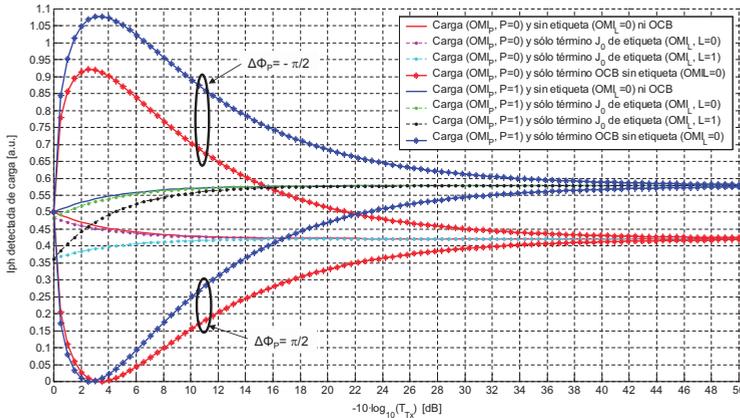
### 3.1.1. Penalización por batido de la portadora óptica en la estructura de combinación óptica paralela.

El desfase óptico  $\Delta\phi_p$ , existente entre los dos caminos de la estructura interferométrica de combinación óptica paralela propuesta en la generación, va a originar un término interferente en la fotocorriente detectada (ec. 3.1) por batido de la portadora óptica (OCB) descrito de la siguiente forma:

$$i_{ph}|_{(P,L)}^{OCB} = -\Re D_p D_L \sqrt{2} \sin(\Delta\phi_p) J_0^L \sin(\pi A_{Pay}^P / 2 + \pi/4) H_{FBGT_x,0}^L H_{FBGT_x,0}^P |H_0|^2 \quad (3.3)$$

Este término existe aunque una o ambas señales del paquete óptico no se transmitan ( $OMI_L$  y/o  $OMI_P$  sean cero), siendo máximo y mínimo cuando  $\Delta\phi_p = -\pi/2$  y  $+\pi/2$  respectivamente. Sin embargo, puede ser eliminado diseñando la longitud de los brazos de la estructura interferométrica de forma que el desfase óptico total entre ambos sea múltiplo impar de  $\pi/2$ . En el esquema propuesto corresponde con  $\Delta\phi_p = k\pi$ ,  $k = 0, 1, \dots$ , ya que existe un desfase  $\pi/2$  inicial entre los brazos al emplear un acoplador 1x2 para distribuir la portadora óptica a ellos. Esta solución es factible en el caso de implementar este esquema de generación en un chip óptico (PIC, Photonic Integrated Circuit) donde se puede controlar que  $\Delta\phi_p$  sea fijo y estable. En el caso de emplear un esquema basado en dispositivos discretos y fibra óptica, esta solución no podría ser utilizada, ya las variaciones

de temperatura y ambientales en la fibra hace que  $\Delta\phi_p$  sea aleatorio. En este caso, será la  $FBG_{Tx}$  la encargada de eliminar el término interferente por OCB. Para ello se diseña el parámetro apropiado de la  $FBG_{Tx}$  ( $T_{Tx}$  o  $MSLR_{Tx}$  dependiendo de que se refleje o transmita la carga con la  $FBG_{Tx}$  en el esquema de combinación óptica paralela) de forma que suprima la contribución de la portadora óptica proveniente del brazo donde se realiza la modulación de etiqueta del paquete cuando se combina con la portadora óptica modulada con la carga en la  $FBG_{Tx}$ . Cabe puntualizar que el término de interferencia por OCB sólo es crítico y predominante cuando se detecta la carga del paquete.



**Figura 3.1:** Fotocorriente detectada de carga (ec. 3.1) de un paquete con carga ( $OMI_p = 0,1$ ) y con/sin etiqueta ( $OMI_L = 0$  o  $1$ ) y  $m_L = 0,75$ , desfases  $\Delta\phi_p = -\pi/2, \pi/2$  en función del parámetro  $T_{Tx}$ . Se ha empleado la configuración óptica paralela con carga en reflexión.

En la figura 3.1 se muestra la influencia del término interferente por OCB (casos más críticos  $\Delta\phi_p = \pi/2$  o  $-\pi/2$ ) en los niveles de la fotocorriente detectada de carga (ec. 3.1) en función del valor del parámetro  $T_{Tx}$  de la  $FBG_{Tx}$  del esquema de combinación óptica paralela con carga en reflexión. Concretamente, se han obtenido los niveles de carga detectada cuando únicamente se considera el término de carga de la expresión 3.1 con bit de carga 0 (curva roja continua) o 1 (curva azul continua). También se ha considerado los niveles de carga detectados incluyendo adicionalmente sólo el término interferente de etiqueta modulado sobre la portadora óptica,  $J_0$ , (curvas continuas magenta, cian, verde y negro según bit de carga y etiqueta sean 0 o 1), así como cuando se considera sólo adicionalmente el término interferente de OCB sin etiqueta junto con el de la carga detectada (curvas roja y azul \*) para los casos más críticos de  $\Delta\phi_p$ . Se comprueba que la interferencia asociada a OCB es mucho mayor que la asociada al término de etiqueta modulado sobre la portadora óptica, además como se puede eliminar mediante el coeficiente de transmisión de la  $FBG_{Tx}$ ,  $T_{Tx}$ , en el esquema de combinación óptica paralela con carga reflejada. Se puede observar cual sería la apertura del diagrama de ojos de carga cuando se considera la interferencia por OCB, donde en azul se representa el nivel mínimo de fotocorriente cuando se transmite un bit uno de carga y en rojo el nivel máximo de fotocorriente cuando se transmite un bit cero de carga para . Se comprueba como los niveles del uno y del cero del diagrama de ojos convergen al caso de no existir OCB (curvas roja y azul continua)

cuando se suprime la portadora óptica del brazo asociado de la estructura interferométrica de generación mediante el coeficiente de transmisión de la  $FBG_{Tx}$ . El término de interferencia de OCB depende tanto del nivel de carga ( $OMI_P$ ) como de etiqueta ( $OMI_L$ ), siendo máximo cuando no hay etiqueta ( $OMI_L=0$  y  $J_0^L = 1$ ). Sin embargo, éste no varía significativamente del caso en que el nivel de etiqueta del paquete sea máximo ( $OMI_L=1$  y  $J_0^L = 0,85$ ). Se define la penalización de la apertura del diagrama de ojos de carga por OCB,  $LOE_p^{OCB}$  para cuantificar esta interferencia como:

$$LOE_p^{OCB} = OE_p^{\sin\_OCB} / OE_p^{con\_OCB} \quad (3.4)$$

definida para las condiciones más restrictivas con OCB (sin etiqueta en el paquete y con los límites de la apertura del diagrama de ojos de carga donde el nivel asociado al bit uno con  $\Delta\phi_p = \pi/2$  y nivel asociado al bit cero con  $\Delta\phi_p = -\pi/2$ ), donde:

$$OE_p^{\sin\_OCB} = i_{ph}|_{(P=1, OMI_L=0, \Delta\phi_p=0)}^{2EOMP} - i_{ph}|_{(P=0, OMI_L=0, \Delta\phi_p=0)}^{2EOMP} \quad (3.5)$$

$$OE_p^{con\_OCB} = i_{ph}|_{(P=1, OMI_L=0, \Delta\phi_p=\pi/2)}^{2EOMP} - i_{ph}|_{(P=0, OMI_L=0, \Delta\phi_p=-\pi/2)}^{2EOMP} \quad (3.6)$$

Particularizando la expresión de la fotocorriente (ec. 3.1) en las ecuaciones 3.5, 3.6 y sustituyéndolas en la expresión de  $LOE_p^{OCB}$  (ec. 3.4), esta última se expresa como:

$$LOE_p^{OCB} = \frac{D_p \cdot \sin\left(\frac{\pi OMI_P}{2}\right) \cdot |H_{FBG_{Tx},0}^p|^2 \cdot |H_0|^2}{D_p \sin\left(\frac{\pi OMI_P}{2}\right) |H_{FBG_{Tx},0}^p|^2 |H_0|^2 - 2D_L \cos\left(\frac{\pi OMI_P}{4}\right) H_{FBG_{Tx},0}^L H_{FBG_{Tx},0}^p |H_0|^2} \quad (3.7)$$

Como se observa en la expresión del  $LOE_p^{OCB}$  (ec. 3.7), la respuesta frecuencial de la  $FBG_{Tx}$  a la pulsación angular  $\omega_0$ ,  $H_{FBG_{Tx},0}^L$ , puede encargarse de eliminar esta interferencia. Por tanto, se puede mitigar el término interferente por OCB bien haciendo el desfase entre los caminos de la estructura interferométrica de combinación óptica paralela,  $\Delta\phi_p$ , sea múltiplo entero de  $\pi$  o bien haciendo que  $H_{FBG_{Tx},0}^L = 0$ , dando lugar a que  $LOE_p^{OCB} = 1$  (0dB).

### 3.1.2. Penalización por interferencias entre las señales de carga y etiqueta en la estructura de combinación óptica paralela.

En el subsección anterior se ha tratado del término interferente por OCB y se ha obtenido una expresión para cuantificarlo, así como las estrategias a seguir para eliminarlo, bien mediante un diseño optimizado del desfase de los caminos en la estructura interferométrica de generación y/o a través de la  $FBG_{Tx}$ . Una vez eliminada esta distorsión, se puede obtener una expresión de la penalización del diagrama de ojos de la señal de carga y etiqueta detectada donde sea posible cuantificar la contribución de cada una de las interferencias existentes entre las componentes de carga y etiqueta del paquete y que contribuyen a la penalización total. Esta expresión nos permitirá vincular el parámetro concreto de las FBGs empleadas con cada término interferente, así como el valor del mismo necesario para eliminar dicha interferencia. Partiendo de la expresión de fotocorriente 3.1 donde se ha eliminado el término por OCB, ésta queda de la siguiente forma:

$$i_{ph}|_{(P,L)}^{2EOMP} = \Re \left[ D_p^2 [1 + \sin(\pi A_{Pay}^P)] |H_{FBG_{Tx},0}^p|^2 |H_0|^2 + D_L^2 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ |J_k^L|^2 |H_{FBG_{Tx},k}^L|^2 |H_k|^2 \right\} \right] \quad (3.8)$$

Se define la penalización de la apertura del diagrama de ojo de la señal de carga,  $LOE_p$  para ésta estructura de generación de paquetes como:

$$LOE_p = OE_p^{\sin\_etiqueta} / OE_p^{\text{con\_etiqueta}} \quad (3.9)$$

donde

$$OE_p^{\text{con\_etiqueta}} = i_{ph}|_{(P=0,L=1)}^{2EOMP} - i_{ph}|_{(P=1,L=0)}^{2EOMP} \quad (3.10)$$

$$OE_p^{\sin\_etiqueta} = i_{ph}|_{(P=0,OMI_L=0)}^{2EOMP} - i_{ph}|_{(P=1,OMI_L=0)}^{2EOMP} \quad (3.11)$$

Sustituyendo la expresión 3.8 en 3.11 y 3.11, y éstas en 3.9, se obtiene la siguiente expresión genérica de  $LOE_p$  sin OCB en la estructura de combinación óptica paralela:

$$LOE_p = \frac{C_P \cdot |H_{FBGT_x,0}^p|^2 \cdot |H_0^p|^2}{C_P \cdot |H_{FBGT_x,0}^p|^2 \cdot |H_0^p|^2 - \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{L,k} |H_{FBGT_x,k}^L|^2 \cdot |H_k^p|^2} \quad (3.12)$$

donde  $C_P = \Re D_P^2 \sin(\pi OMI_P/2)$  y  $C_{L,k} = (\Re D_L^2/2) \cdot \left[ \left( J_k^{(L=0)} \right)^2 - \left( J_k^{(L=1)} \right)^2 \right]$ . Las respuestas frecuenciales de reflexión y transmisión de la  $FBG_{Rx}$  a la frecuencia  $w_0 + kw_{RF}$  se encuentran descritas en los términos  $H_k$ . Para cada configuración concreta empleada en detección (carga reflejada o carga transmitida), se tomará una de las dos respuestas de la  $FBG_{Tx}$  (reflexión o transmisión) para detectar la carga y la otra para la etiqueta, descritas a través de los coeficientes  $H_k^p$  y  $H_k^L$  respectivamente.

En la expresión  $LOE_p$  se identifican cada uno de los términos de carga y etiqueta. Concretamente, el término de carga viene asociado al coeficiente  $C_P$ , las contribuciones de la etiqueta que corresponden del paquete viene asociado al coeficiente  $C_{L,1}$  (etiqueta en SSB - USB) o  $C_{L,-1}$  (etiqueta en SSB-LSB) o  $C_{L,1}$  y  $C_{L,-1}$  (etiqueta en DSB), y el resto de contribuciones de etiqueta asociados a los términos  $C_{L,k}$  (términos de etiqueta en  $w_0 + kw_{RF}$  con  $k \neq 0, 1$ ) y  $C_{L,0}$  (etiqueta banda base en  $w_0$ ). La penalización total de la apertura del diagrama de ojos de carga (ec. 3.12) se puede expresar como suma de las contribuciones parciales asociadas cada término interferente de etiqueta, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$LOE_p = \frac{1}{1 - \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{\Delta LOE_{pL,k}}} \quad (3.13)$$

donde  $\Delta LOE_{pL,k} = OE_p^{\sin\_etiqueta} / \Delta OE_{L,k}$  representa el cociente entre la contribución del término interferente de etiqueta situado en  $w_0 + kw_{RF}$ ,  $\Delta OE_{L,k}$ , respecto a la apertura del diagrama de ojos de carga sin etiqueta ni OCB,  $OE_p^{\sin\_etiqueta}$ , siendo  $OE_p^{\sin\_etiqueta} = C_P \cdot |H_{FBGT_x,0}^p|^2 \cdot |H_0^p|^2$  y  $\Delta OE_{L,k} = C_{L,k} |H_{FBGT_x,k}^L|^2 \cdot |H_k^p|^2$ . Esta expresión nos servirá posteriormente para poder cuantificar la penalización de cada interferencia de etiqueta sobre la carga individualmente.

En el caso de la etiqueta detectada del paquete óptico, se define la penalización de la apertura del diagrama de ojos de etiqueta,  $LOE_L$ , como:

$$LOE_L = OE_L^{\sin\_carga} / OE_L^{\text{concarga}} \quad (3.14)$$

donde

$$OE_L^{\sin\_carga} = i_{ph}|_{(OMI_P=0,L=0)}^{2EOMP} - i_{ph}|_{(OMI_P=0,L=1)}^{2EOMP} \quad (3.15)$$

$$OE_L^{con.carga} = i_{ph}|_{(P=1,L=0)}^{2EOMP} - i_{ph}|_{(P=0,L=1)}^{2EOMP} \quad (3.16)$$

Sustituyendo la expresión 3.8 en 3.16 y 3.16,y éstas en 3.14, obtenemos la siguiente expresión genérica de  $LOE_L$  sin OCB en la estructura de combinación óptica paralela:

$$LOE_L = \frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{L,k} |H_{FBG_{Tx},k}^L|^2 \cdot |H_k^L|^2}{-C_P \cdot |H_{FBG_{Tx},0}^P|^2 \cdot |H_0^L|^2 + \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{L,k} |H_{FBG_{Tx},k}^L|^2 \cdot |H_k^L|^2} \quad (3.17)$$

Así pues, diseñando de forma óptima las FBGs se pueden eliminar los términos interferentes de etiqueta en la carga detectada ( $C_{L,k}$  en la  $LOE_P$ , ec.3.12) y el de carga en la etiqueta detectada ( $C_P$  y  $C_{L,k}$  con  $k \neq 1$  y/o  $-1$  dependiendo de que el paquete SCML esté compuesto por etiqueta DSB o SSB-USB o SSB-LSB en la  $LOE_L$ , ec. 3.17) simultáneamente.

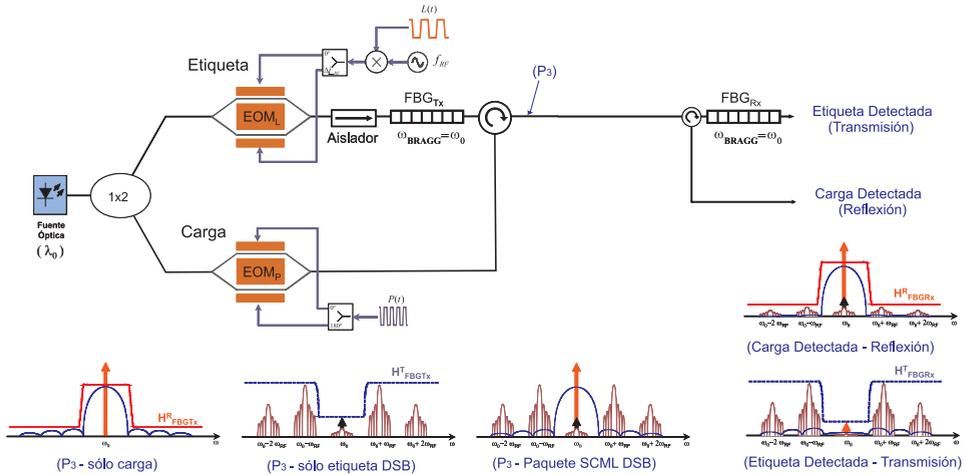
## 3.2. Diseño de las FBGs para la estructura de combinación óptica paralela: 2EOMP

En esta sección se va a proceder a diseñar los parámetros de las FBGs empleadas en las estructuras de combinación óptica paralela (2EOMP) de forma que permitan eliminar cada una de las contribuciones de interferencia existentes entre las señales de carga y etiqueta del paquete óptico indicadas en la tabla 3.1. Concretamente se va a realizar este estudio para las tres configuraciones propuestas en la sección 2.2.2 del capítulo 2:

- Generación 2EOMP con carga reflejada/etiqueta transmitida por la  $FBG_{Tx}$  y detección por prefiltrado óptico con carga reflejada/etiqueta transmitida a través de la  $FBG_{Rx}$  (2EOMP-RR).
- Generación 2EOMP con carga transmitida/etiqueta reflejada por la  $FBG_{Tx}$  y detección por prefiltrado óptico con carga reflejada/etiqueta transmitida a través de la  $FBG_{Rx}$  (2EOMP-TR).
- Generación 2EOMP con carga transmitida/etiqueta reflejada por la  $FBG_{Tx}$  y detección por prefiltrado óptico con carga transmitida/etiqueta reflejada a través de la  $FBG_{Rx}$  (2EOMP-TT).

### 3.2.1. Estructura 2EOMP-RR

La figura 3.2 muestra la configuración 2EOMP-RR. En ella, la generación del paquete óptico SCML se realiza empleando la estructura por combinación óptica paralela con EOMs y FBG donde la carga es reflejada y la etiqueta es transmitida por la  $FBG_{Tx}$ . La detección del paquete se realiza por el esquema de prefiltrado óptico con FBG donde la carga es reflejada y la etiqueta es transmitida a través de la  $FBG_{Rx}$ .



**Figura 3.2:** Esquema de la configuración de generación con combinación óptica paralela con carga en reflexión y detección por prefiltrado óptico con carga en reflexión (2EOMP-RR).

En la tabla 3.2 se indican los parámetros de las FBGs empleadas (T y MSLR) encargados de eliminar las interferencias entre la carga y etiqueta del paquete SCML (interferencias intracanal SCML) en la configuración 2EOMP-RR. El resto de parámetros de la respuesta de reflexión de las FBGs ( $BW_{3dB}$ , RollOff [dB/GHz],  $f_{Bragg}$ ) se consideran que han sido diseñados para poder realizar la supresión de las interferencias intracanal SCML con T y MSLR inicialmente, deduciendo las expresiones de diseño de éstos últimos posteriormente en esta sección.

Señal detectada	Interferencias del paquete SCML	Parámetro - FBG
Carga	Contribución interferente por el batido de la portadora óptica (OCB).	T - FBGTx
	Contribución de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica ( $J_0^{\pm 1}$ ) generada por el EOML.	T - FBGTx
	Contribuciones de etiqueta ( $J_k^{\pm 1}$ ) situadas en $\omega_0 + k \cdot \omega_{RF}$ con $k \neq \pm 1$ (SSB-USB), $k \neq -1$ (SSB-LSB) o $k \neq \pm 1$ (DSB).	MSLR - FBGRx
	Etiqueta del paquete SCML eliminada ópticamente en recepción. Depende del tipo de etiqueta empleada en el paquete SCML, $J_k^{\pm 1}$ con $k=1$ (SSB-USB), $k=-1$ (SSB-LSB) o $k = \pm 1$ (DSB).	MSLR - FBGRx
Etiqueta	Residuo de carga filtrada que cae sobre la etiqueta en la generación del paquete SCML.	MSLR - FBGTx
	Carga del paquete SCML eliminada ópticamente en recepción.	T - FBGRx

**Tabla 3.2:** Interferencias intracanal SCML y los parámetros de las FBGs que los elimina en la configuración 2EOMP-RR.

Para esta configuración, las respuestas de reflexión y transmisión ideales de las FBGs en la pulsación angular  $\omega_0 + k\omega_{RF}$  están descritas en la siguiente tabla.

Señal	Respuesta FBG	$H_k=H(w=w_0+kw_{RF})$		
Carga	FBG <sub>Tx</sub> en reflexión	$H_{FBG_{Tx},k}^p$	$\sqrt{R_{Tx}}$ , k=0	$\sqrt{R_{Tx}/MSLR_{Tx}}$ , k≠0
	FBG <sub>Rx</sub> en reflexión	$H_k^p$	$\sqrt{R_{Rx}}$ , k=0	$\sqrt{R_{Rx}/MSLR_{Rx}}$ , k≠0
Etiqueta	FBG <sub>Tx</sub> en transmisión	$H_{FBG_{Tx},k}^L$	$\sqrt{1-R_{Tx}}$ , k=0	$\sqrt{1-R_{Tx}/MSLR_{Tx}}$ , k≠0
	FBG <sub>Rx</sub> en transmisión	$H_k^L$	$\sqrt{1-R_{Rx}}$ , k=0	$\sqrt{1-R_{Rx}/MSLR_{Rx}}$ , k≠0

**Tabla 3.3:** Valores de las respuestas de reflexión y transmisión de FBGTx y FBGRx a la pulsación angular  $w_0 + kw_{RF}$  en la configuración 2EOMP-RR.

A continuación se van a obtener las ecuaciones de diseño de los parámetros de las FBGs para el caso de la configuración 2EOMP-RR a partir de las expresiones de las penalizaciones deducidas en la sección anterior.

### Cálculo del parámetro $T_{Tx}$ de la $FBG_{Tx}$ .

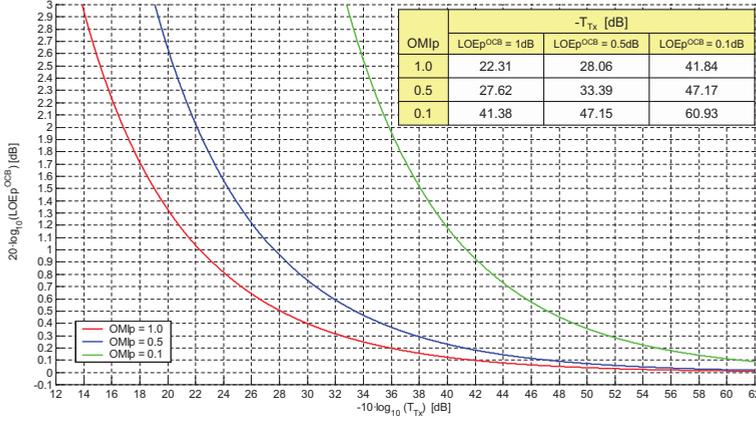
El parámetro T de la  $FBG_{Tx}$ ,  $T_{Tx}$ , es el encargado de eliminar los términos de interferencia por OCB y la contribución de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica ( $J_0^L$ ) generada por el  $EOM_L$  de la fotocorriente de carga detectada. Como se mencionó anteriormente, el término de interferencia sobre la carga puede eliminarse si la implementación de la estructura de generación 2EOMP-RR es tal que  $\Delta\phi_p = k\pi$ . Si no es así, éste debe ser eliminado a través del parámetro  $T_{Tx}$ . En tal caso, la penalización de la apertura el diagrama de ojos de la carga por OCB en esta configuración se obtiene sin más que sustituir las respuestas de las FBGs descritas en la tabla 3.3 en la expresión 3.7, obteniendo:

$$LOE_p^{OCB} = \frac{D_p \cdot \sin\left(\frac{\pi OMI_p}{2}\right) \cdot R_{Tx} \cdot R_{Rx}}{D_p \sin\left(\frac{\pi OMI_p}{2}\right) \cdot R_{Tx} \cdot R_{Rx} - 2D_L \cos\left(\frac{\pi OMI_p}{4}\right) \cdot \sqrt{1-R_{Tx}} \cdot \sqrt{R_{Tx}} \cdot R_{Rx}} \quad (3.18)$$

Despejando  $R_{Tx}$  de la expresión 3.18, se puede determinar el valor de  $T_{Tx}$  ( $T_{Tx} = 1 - R_{Tx}$ ) necesario para conseguir la penalización  $LOE_p^{OCB}$  deseada. Concretamente, éste vale:

$$T_{Tx} = 1 - R_{Tx} = \frac{1}{1 + \left(\frac{2D_L \cos(\pi \cdot OMI_p / 4)}{D_p \cdot \sin(\pi \cdot OMI_p / 2) \cdot (1 - 1 / LOE_p^{OCB})}\right)^2} \quad (3.19)$$

En la figura 3.3 se muestra la evaluación de la penalización de la apertura del diagrama de ojos de carga asociada por OCB en función del coeficiente  $T_{Tx}$  de la  $FBG_{Tx}$  y para varios niveles de carga. Como se puede deducir de la expresión 3.18 éste depende del nivel de carga,  $OMI_p$ , empleado en el paquete SCML y será menor conforme se aumente el nivel de rechazo en transmisión de la  $FBG_{Tx}$  en  $w_0$  definido a través del parámetro  $T_{Tx}$ . También se indican los valores de  $T_{Tx}$ [dB] necesarios para conseguir una penalización de carga por OCB igual a 0.1, 0.5 y 1.0 dB con niveles de carga  $OMI_p = 0.1, 0.5$  y 1.0.



**Figura 3.3:**  $LOE_p^{OCB}$  en función de  $T_{Tx}$  y nivel de carga,  $OMI_p$ , en la configuración 2EOMP-RR.

En el caso de eliminar el término de interferencia asociado al OCB en la configuración 2EOMP-RR, la penalización total de la apertura del diagrama de ojos de carga,  $LOE_p$ , (ec.3.12) se puede expresar de la siguiente forma:

$$LOE_p = \frac{C_P \cdot R_{Tx} \cdot R_{Rx}}{C_P \cdot R_{Tx} \cdot R_{Rx} - \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} C_{L,k} \cdot \left[1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right] \cdot \left[\frac{R_{Rx}}{MSLR_{Rx}}\right] - C_{L,0} \cdot [1 - R_{Tx}] \cdot R_{Rx}} \quad (3.20)$$

y ésta en función de sus contribuciones parciales de interferencia:

$$\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \frac{1}{\Delta LOE_{pL,k}} + \frac{1}{\Delta LOE_{pL,0}} = 1 - \frac{1}{LOE_p} \quad (3.21)$$

La contribución interferente de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica sobre la carga detectada se puede obtener al despejar la penalización parcial asociada a la misma,  $\Delta LOE_{pL,0}$ , de la total (ec. 3.20). Como se observa, ésta depende de  $T_{Tx}$ , ( $T_{Tx} = 1 - R_{Tx}$ ), tal como se había indicado anteriormente.

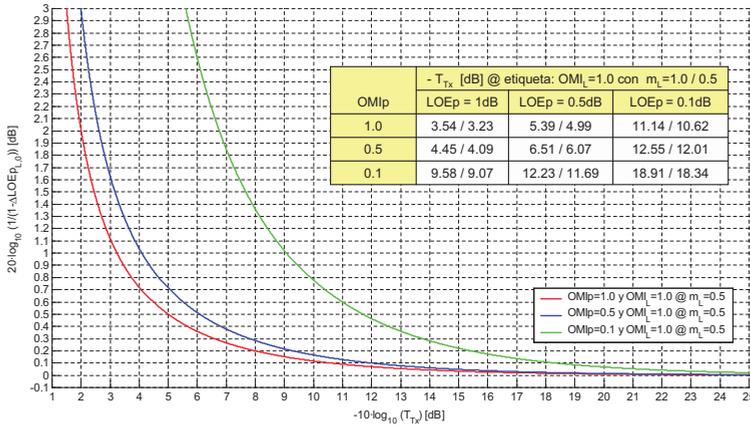
$$\frac{1}{\Delta LOE_{pL,0}} = \frac{C_{L,0} \cdot [1 - R_{Tx}] \cdot R_{Rx}}{C_P \cdot R_{Tx} \cdot R_{Rx}} = \frac{C_{L,0} \cdot [1 - R_{Tx}]}{C_P \cdot R_{Tx}} \quad (3.22)$$

Despejando  $T_{Tx}$  de la expresión 3.22, obtenemos que éste vale:

$$T_{Tx} = 1 - R_{Tx} = \frac{1}{1 + \frac{C_{L,0}}{C_P \cdot (1/\Delta LOE_{pL,0})}} = \frac{1}{1 + \frac{D_L^2 \cdot \left[ \left( J_k^{(L=0)} \right)^2 - \left( J_k^{(L=1)} \right)^2 \right]}{2D_P^2 \sin(\pi OMI_p/2) \cdot (1/\Delta LOE_{pL,0})}} \quad (3.23)$$

La figura 3.4 muestra la evolución de la penalización  $\Delta LOE_{pL,0}$  sin OCB en función del parámetro  $T_{Tx}$  y para un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_p = 0.1, 0.5$  y 1.0 y peor caso de etiqueta ( $OMI_L = 1$  y  $m_L = 0.5$ ). También se indica los valores de  $T_{Tx}$

necesarios para que la contribución asociada al término interferente de etiqueta banda base,  $J_0$ , sobre la penalización de carga  $LOEp$  sea igual a 0.1, 0.5 y 1.0 dB. Como se puede comprobar, los niveles de  $T_{Tx}$  requeridos para eliminar este término de distorsión de etiqueta son inferiores a los de OCB.



**Figura 3.4:**  $1/(1 - 1/\Delta LOEp_{L,0})$  en función de  $T_{Tx}$  y para un paquete con etiqueta ( $(OMI_L = 1, m_L) = 0.5$ ) y carga,  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$ , en la configuración 2EOMP-RR.

### Cálculo del parámetro $MSLR_{Rx}$ de la $FBG_{Rx}$ .

El parámetro MSLR de la  $FBG_{Rx}$ ,  $MSLR_{Rx}$ , se encarga de eliminar todas las contribuciones de etiqueta del paquete situadas a la frecuencia angular  $w_0 + kw_{RF}, k = \pm 1, \pm 2, \dots$ , ópticamente en recepción. Despejando las contribuciones asociadas a estos términos de la expresión general de  $LOE_P$  (ec. 3.20), se obtiene la siguiente relación:

$$\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \frac{1}{\Delta LOE_{P,L,k}} = \frac{\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} C_{L,k} \cdot \left[ 1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \right] \cdot \left[ \frac{R_{Rx}}{MSLR_{Rx}} \right]}{C_P \cdot R_{Tx} \cdot R_{Rx}} \quad (3.24)$$

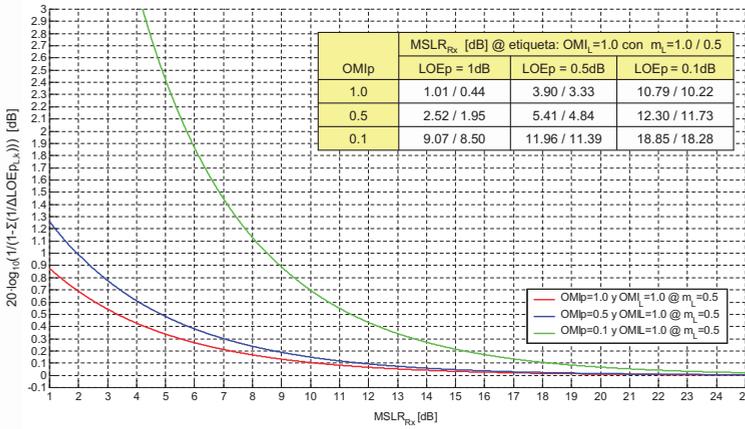
y despejando el parámetro  $MSLR_{Rx}$  de la ecuación anterior, se obtiene el valor de  $MSLR_{Rx}$  necesario para tener una penalización asociada a estos términos respecto a la total de la carga detectada.

$$MSLR_{Rx} = \frac{[1 - R_{Tx}/MSLR_{Tx}]}{R_{Tx} \cdot \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} 1/\Delta LOE_{P,L,k}} \frac{D_L^2 \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \left[ \left( J_k^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_k^{(L=0)} \right)^2 \right]}{2 \cdot D_P^2 \cdot \sin(\pi \cdot OMI_P/2)} \quad (3.25)$$

En el caso real,  $MSLR_{R_{Tx}} \gg 1$  y  $R_{T_x} \approx 1$ , luego  $R_{T_x}/MSLR_{R_{Tx}} \approx 0$ , simplificándose la ecuación anterior en:

$$MSLR_{R_{Rx}} \approx \frac{1}{R_{T_x}} \frac{D_L^2 \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \left[ \left( J_k^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_k^{(L=0)} \right)^2 \right]}{2 \cdot D_P^2 \cdot \sin(\pi \cdot OMI_P/2)} \cdot \frac{1}{\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} 1/\Delta LOE_{P,L,k}} \quad (3.26)$$

La figura 3.5 muestra la evolución de la penalización  $\Delta LOE_{P,L,k}$ , con  $k \neq 0$ , sin OCB en función del parámetro  $MSLR_{R_{Rx}}$  y para un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  y peor caso de etiqueta ( $OMI_L = 1$  y  $m_L = 0.5$ ).



**Figura 3.5:**  $1/(1 - \sum(1/\Delta LOE_{P,L,0}))$  en función de  $MSLR_{R_{Rx}}$  y para un paquete con etiqueta ( $OMI_L = 1, m_L = 0.5$ ) y carga,  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$ , en la configuración 2EOMP-RR.

### Cálculo del parámetro $T_{R_{Rx}}$ de la $FBG_{R_{Rx}}$ .

El parámetro T de la  $FBG_{R_{Rx}}$ ,  $T_{R_{Rx}}$ , se encarga de eliminar la contribución de carga del paquete SCML ópticamente en recepción. Este se puede deducir de la penalización  $LOE_L$  (ec.3.17) sin más que particularizarla con los valores de las FBGs descritos en la tabla 3.3 y despejando el parámetro  $R_{R_{Rx}}$ , obteniendo la siguiente expresión:

$$R_{R_{Rx}} = \frac{C_P \cdot R_{T_x} - \left[ 1 - \frac{1}{LOE_L} \right] \cdot \left\{ \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} C_{L,k} \cdot \left[ 1 - \frac{R_{T_x}}{MSLR_{R_{Tx}}} \right] + C_{L,0} \cdot [1 - R_{T_x}] \right\}}{C_P \cdot R_{T_x} - \left[ 1 - \frac{1}{LOE_L} \right] \cdot \left\{ \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} C_{L,k} \cdot \left[ 1 - \frac{R_{T_x}}{MSLR_{R_{Tx}}} \right] \cdot \left[ \frac{1}{MSLR_{R_{Rx}}} \right] + C_{L,0} \cdot [1 - R_{T_x}] \right\}} \quad (3.27)$$

En el caso real,  $MSLR_{R_{Tx}} \gg 1$  y  $R_{T_x} \approx 1$ , luego  $R_{T_x}/MSLR_{R_{Tx}} \approx 0$ . También suele darse el caso de que la  $FBG_{R_{Rx}}$  presente un valor de  $MSLR_{R_{Rx}} \gg 1$ , luego  $1/MSLR_{R_{Rx}} \approx 0$ . Bajo

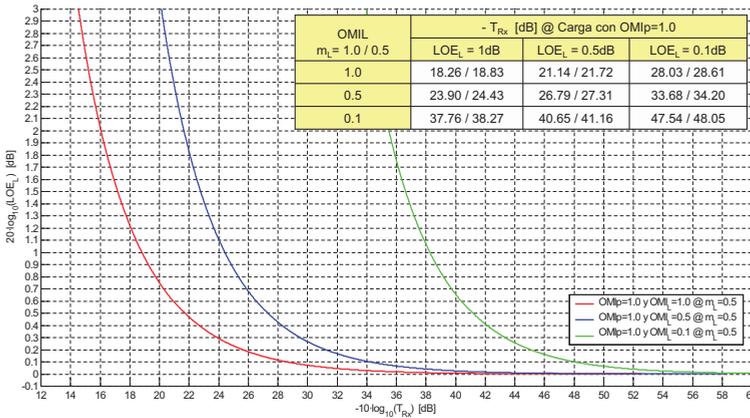
estas condiciones, la expresión 3.27 se simplifica de la siguiente forma:

$$R_{Rx} \approx 1 - \left[ 1 - \frac{1}{LOE_L} \right] \cdot \frac{1}{C_P \cdot R_{Tx}} \cdot \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} C_{L,k} \quad (3.28)$$

dando lugar a una expresión de  $T_{Rx}$  para este caso igual a:

$$T_{Rx} = 1 - R_{Rx} \approx \left[ 1 - \frac{1}{LOE_L} \right] \cdot \frac{D_L^2 \cdot \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0}}^{\infty} \left[ \left( J_k^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_k^{(L=0)} \right)^2 \right]}{2 \cdot D_P^2 \cdot \sin(\pi \cdot OMI_p / 2) \cdot R_{Tx}} \quad (3.29)$$

La figura 3.6 muestra la evolución de la penalización  $LOE_L$  sin OCB en función del parámetro  $T_{Rx}$  y para un paquete SCML con niveles de etiqueta  $OMI_L = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  con  $m_L = 0,5$  y peor caso de carga ( $OMI_p = 1,0$ ). También se indican los valores de  $T_{Rx}$  requeridos para una penalización  $LOE_L$  de  $0.1, 0.5$  y  $1.0$  dB.



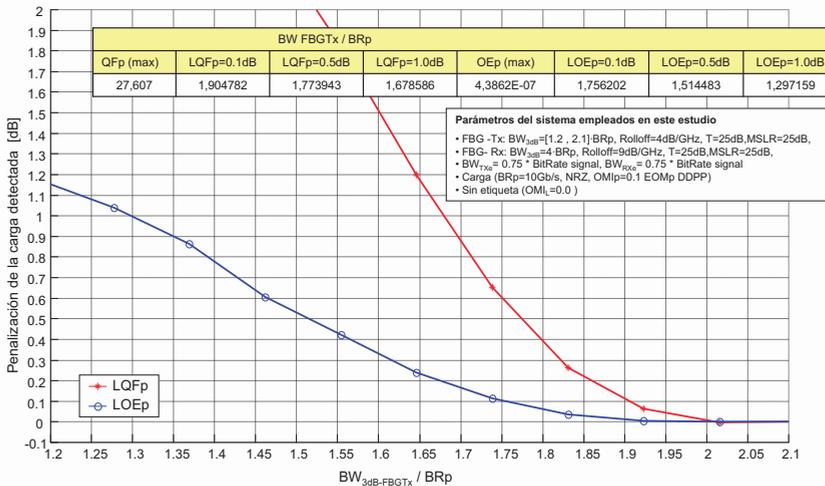
**Figura 3.6:**  $LOE_L$  en función de  $T_{Rx}$  y para un paquete con carga  $OMI_p=1.0$  y etiqueta,  $OMI_L = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  con  $m_L = 0,5$  empleando la configuración 2EOMP-RR.

El resto de parámetros de las respuestas de las FBGs utilizadas en la configuración 2EOMP-RR se obtienen a partir de las penalizaciones de la apertura de los diagramas de ojos de carga y etiqueta cuando se incluyen la forma de los filtros reales (utilizando la ecuación de la fotocorriente detectada 2.50) y que afectarán sobre la forma de los pulsos de las señales detectadas. Concretamente se debe obtener los valores del  $BW_{3dB}$ , Rolloff y MSLR de la  $FBG_{Tx}$ , así como el  $BW_{3dB}$  y Rolloff de la  $FBG_{Rx}$ . Para ello, se va a determinar el  $BW_{3dB}$  y Rolloff de las FBGs necesarios para combinar y separar las señales de carga y etiqueta que integran el paquete SCML, empleando los valores de  $T_{Tx}$ ,  $MSLR_{Rx}$  y  $T_{Rx}$  calculados previamente mediante las expresiones analíticas 3.23, 3.26 y 3.29 respectivamente. Por último, se calculará el término  $MSLR_{Tx}$  empleando el resto de los valores de las respuestas de las FBGs determinados previamente.

### Cálculo de los parámetros $BW_{3dB}$ y Rolloff de la $FBG_{Tx}$ .

La  $FBG_{Tx}$  debe diseñarse con un ancho de banda de paso de la respuesta de reflexión,  $BW_{3dB_{FBG_{Tx}}}$ , mínimo sin que degrade la señal de carga filtrada por la respuesta de reflexión de la misma. En la figura 3.7 se muestra los resultados del estudio realizado de la penalización del factor de calidad y la apertura del diagrama de ojos de carga detectado incluyendo las respuesta real de las FBGs y en función del ancho de banda de la  $FBG_{Tx}$ . Se ha determinado la relación entre el ancho de banda de paso de la  $FBG_{Tx}$  y la tasa de transmisión de carga para que exista una penalización  $LQF_P$  y  $LOE_P$  igual a 0.1, 0.5 y 1.0 dB. Se comprueba que el ancho de banda mínimo de la FBG<sub>Tx</sub> necesario para que no exista penalización en la carga por filtrado de sus componentes debe ser mayor que dos veces la tasa de transmisión de carga,  $BR_P$ :

$$BW_{3dB_{FBG_{Tx}}} \geq 2 \cdot BR_P \quad (3.30)$$



**Figura 3.7:**  $LQF_P$  y  $LOE_P$  en función de  $BW_{3dB}$  de la  $FBG_{Tx}$  empleando la configuración 2EOMP-RR.

El Rolloff de la  $FBG_{Tx}$ ,  $Rolloff_{FBG_{Tx}}$ , corresponde con la pendiente de los flancos de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Tx}$ . Éste debe diseñarse para que dicha respuesta cumpla los siguientes requisitos:

1. La  $FBG_{Tx}$  debe suprimir  $MSLR_{Tx}$  [dB] en el rango de frecuencias donde se localizan las bandas espectrales de la etiqueta de la  $FBG_{Tx}$  ( $f_0 \pm f_{RF}$ ), eliminando las componentes espectrales de la carga que caen en dichas frecuencias. Concretamente, el valor mínimo de frecuencia respecto a la portadora óptica del canal ( $f_0$ ) para conseguirlo es  $f_{RF} - BR_L$ , donde  $BR_L$  corresponde con la tasa de transmisión de la señal de etiqueta y  $f_{RF}$  la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta.
2. Se debe verificar que el  $BW_{3dB}$  de la banda de paso de la respuesta de reflexión será como mínimo de  $2 \cdot BR_P$ , tal como se ha deducido anteriormente.

Por tanto, el  $Rollof f_{FBGT_x}$  debe verificar la siguiente relación:

$$f_0 + BW_{3dB\text{-}FBGT_x}/2 + (MSLR_{Tx} - 3)/Rollof f_{FBGT_x} \leq f_0 + f_{RF} - BR_L \quad (3.31)$$

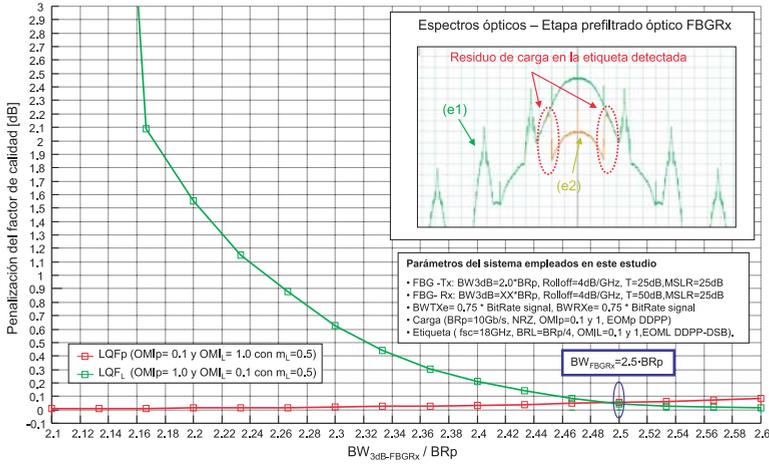
Despejando el término de  $Rollof f_{FBGT_x}$  de la expresión anterior, obtenemos:

$$Rollof f_{FBGT_x} \geq \frac{MSLR_{Tx} - 3}{(f_{RF} - BR_L) - BW_{3dB\text{-}FBGT_x}/2} \quad (3.32)$$

### Cálculo de los parámetros $BW_{3dB}$ y Rolloff de la $FBG_{Rx}$ .

En esta configuración de generación paralela, la  $FBG_{Rx}$  se encarga de separar las señales del paquete SCML reflejando la carga y transmitiendo la etiqueta en la misma. Por tanto, el  $BW_{3dB}$  de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe de diseñarse para que cumpla los siguientes requisitos:

1. La respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe tener un ancho de banda de paso superior a  $2 \cdot BR_p$  para no afectar la calidad de la carga en detección, tal como se ha deducido en el estudio del ancho de banda de la  $FBG_{Tx}$ .
2. La respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$  deber tener un ancho de la banda eliminada (que coincide con la de paso de la respuesta de reflexión) que elimine las componentes espectrales de la carga del paquete SCML que son transmitidos por la  $FBG_{Rx}$  y que interfieren a la señal de etiqueta del paquete en detección (ver espectro (e2) de la figura 3.8). Esta interferencia depende de la relación entre los índices de modulación óptica de carga y etiqueta empleados en el paquete SCML. Se ha determinado que el  $BW_{3dB\text{-}BR_x}$  de la  $FBG_{Rx}$  debe ser como mínimo  $2.5 \cdot BR_p$  para un paquete óptico SCML donde se ha considerado las peores condiciones a la hora de obtener la penalización del factor de calidad ( $OMI_p = 0.1$  y  $OMI_L = 1$  para la carga y  $OMI_p = 1$  y  $OMI_L = 0.1$  para la etiqueta), tal como se muestra en la figura 3.8.



**Figura 3.8:** Penalización del factor de carga y etiqueta, LQF, en función de  $BW_{3dB}$  de la  $FBG_{Rx}$  empleando la configuración 2EOMP-RR. Espectros ópticos del paquete SCML en la etapa de prefiltrado óptico con  $FBG_{Rx}$  con  $BW_{3dBRx}=2 \cdot BRp$ : (e1) entrada de la  $FBG_{Rx}$ ; (e2) salida de la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ .

El Rolloff de la  $FBG_{Rx}$ ,  $Rolloff_{FBGRx}$ , corresponde con la pendiente de los flancos de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ . Este debe diseñarse para que dicha respuesta cumpla los siguientes requisitos:

1. La respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe suprimir  $MSLR_{Rx}$  [dB] en el rango de frecuencias donde se localizan las bandas espectrales de la etiqueta de la  $FBG_{Rx}$  ( $f_0 \pm f_{RF}$ ), eliminando las componentes espectrales de la carga que caen en dichas frecuencias. Concretamente, el valor mínimo de frecuencia respecto a la portadora óptica del canal para conseguirlo es  $f_{RF} - BR_L$ , donde  $BR_L$  corresponde con la tasa de transmisión de la señal de etiqueta.
2. La  $FBG_{Rx}$  debe tener un ancho de la banda eliminada de la respuesta de transmisión,  $BW_{3dB Rx}$ , de forma que las componentes espectrales de la carga del paquete SCML que son transmitidas por la  $FBG_{Tx}$  tengan unos niveles muy bajos respecto a las bandas de la etiqueta.

Por tanto, el  $Rolloff_{FBGRx}$  debe verificar la siguiente relación:

$$f_0 + BW_{3dB-FBG_{Rx}}/2 + (MSLR_{Rx} - 3)/Rolloff_{FBGRx} \leq f_0 + f_{RF} - BR_L \quad (3.33)$$

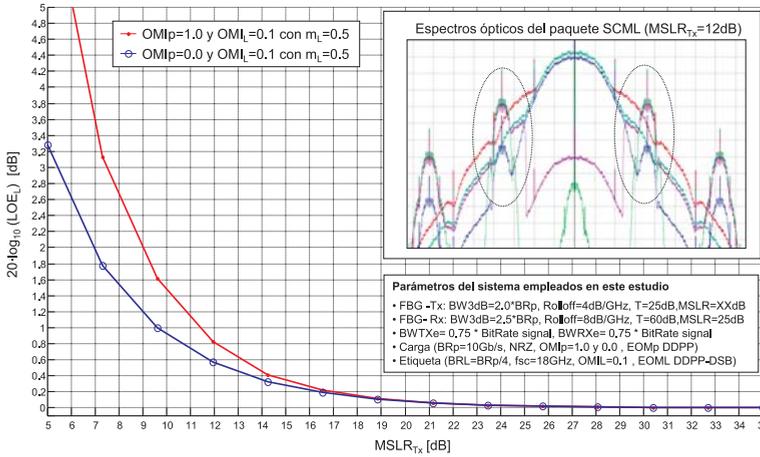
Despejando el término de  $Rolloff_{FBGRx}$  de la expresión anterior, obtenemos:

$$Rolloff_{FBGRx} \geq \frac{MSLR_{Rx} - 3}{(f_{RF} - BR_L) - BW_{3dB-FBG_{Rx}}/2} \quad (3.34)$$

#### Cálculo del parámetro $MSLR_{Tx}$ de la $FBG_{Tx}$ .

El parámetro MSLR de la  $FBG_{Tx}$ ,  $MSLR_{Tx}$  se encarga de eliminar parte del espectro de carga localizado sobre la etiqueta del paquete SCML ( $f_0 \pm f_{RF}$ ) y que interfiere sobre

la etiqueta detectada. Este parámetro dependerá de los índices de modulación óptico de carga y etiqueta.



**Figura 3.9:**  $LOE_L$  en función del  $MSLR_{Tx}$  de la  $FBG_{Tx}$  empleando la configuración 2EOMP-RR. Espectros ópticos del paquete SCML cuando  $MSLR_{Tx} = 12dB$ : carga salida EOMP (rojo), carga reflejada  $FBG_{Tx}$  (cian), etiqueta salida EOML (verde), carga reflejada  $FBG_{Rx}$  (azul),etiqueta transmitida  $FBG_{Rx}$  (morado).

En la figura 3.9 se muestra la penalización de la apertura de ojos de la etiqueta detectada en función del parámetro  $MSLR_{Tx}$  y en el peor caso de que exista o no carga,  $OMI_p = 1$  o  $0$  respectivamente. En este estudio se ha empleado el resto de los parámetros determinados previamente para esta configuración. Además de la penalización de la etiqueta por las componentes frecuenciales de carga que caen cerca de la etiqueta y que no son eliminadas en recepción, tenemos el hecho de que el 100% de la etiqueta no se transmita a través de la  $FBG_{Tx}$  (las bandas de etiqueta se transmiten  $1 - R_{Tx}/MSLR_{Tx}$ ) y se produzca una penalización en la etiqueta. Por tanto, interesa que  $MSLR_{Tx} \gg 1$  para transmitir prácticamente el 100% de la etiqueta del paquete por la  $FBG_{Rx}$ , tal como se observa en la figura 3.9 cuando  $OMI_p=0$  (curva azul). También se muestran los espectros ópticos del paquete SCML en distintos puntos del esquema empleado: (rojo) carga antes de pasar por la  $FBG_{Tx}$ , (cian) carga filtrada por la  $FBG_{Tx}$ , (verde) etiqueta filtrada por la  $FBG_{Tx}$ , (morado) paquete después de transmitirse por la  $FBG_{Rx}$  para recuperar la etiqueta y (azul) paquete después de reflejarse por la  $FBG_{Rx}$  para recuperar la carga. Se puede observar los residuos de carga que caen en las frecuencias donde se sitúa la etiqueta del paquete y como éstos sólo pueden eliminarse con el parámetro  $MSLR_{Rx}$ .

Paquete SCML		MSLR <sub>Tx</sub> [dB]		
OMI <sub>p</sub>	OMI con m <sub>l</sub> =0.5	LOE <sub>L</sub> = 1dB	LOE <sub>L</sub> = 0.5dB	LOE <sub>L</sub> = 0.1dB
0.5	0.5	9.6	12.5	19.3
1.0	0.1	11.5	13.5	19.6
0.0	X.X	9.6	12.5	19.3

**Tabla 3.4:** Valores de  $MSLR_{Tx}$  necesarios para una  $LOE_L=0.1, 0.5$  y  $1.0$  dB empleando la configuración 2EOMP-RR con niveles de carga y etiqueta de interés.

La tabla 3.4 resume los valores de la  $MSLR_{Tx}$  para conseguir una penalización del diagrama de ojos de etiqueta  $LOE_L=0.1, 0.5$  y  $1.0$  con varios niveles de interés de carga y etiqueta. Así pues, diseñando una  $FBG_{Rx}$  con un  $MSLR_{Tx} > 19,6dB$  conseguimos que la penalización de etiqueta originada por las componentes espectrales de carga que caen sobre la bandas de la etiqueta del paquete SCML sea menor de  $0.1dB$  ( $1.16\%$ ). También se ha mostrado el valor de  $MSLR_{Tx}$  para el caso de la penalización de la etiqueta por no transmitirse al  $100\%$  por la  $FBG_{Tx}$  sea  $0.1, 0.5$  (se ha transmitido únicamente la etiqueta en el paquete SCML y con  $OMI_L=X.X$ , donde  $X.X \in [0.1, 1.0]$ ).

### Tabla resumen de diseño de $FBG_{Tx}$ y $FBG_{Rx}$ con la configuración 2EOMP-RR.

En el estudio realizado para el diseño de los parámetros de la  $FBG_{Tx}$  y  $FBG_{Rx}$  depende de las señales que constituyen el paquete SCML. Concretamente:

- Señal de carga: señal NRZ con tasa de transmisión  $BR_P$  e índice de modulación óptica  $OMI_P$ .
- Señal de etiqueta: señal NRZ con tasa de transmisión  $BR_L$ , modulada en amplitud con índice de modulación  $m_L$  sobre una subportadora de radiofrecuencia  $f_{RF}$  e índice de modulación óptico  $OMI_L$ .

En la sección 3.2.1 se han estudiado cada uno de los parámetros (T, MSLR,  $BW_{3dB}$ , Rolloff) de las  $FBG_{Tx}$  y  $FBG_{Rx}$  empleadas en la configuración 2EOMP-RR, estableciendo unas ecuaciones de diseño que permitan cuantificar cada una de las distorsiones existentes entre las señales del paquete una vez sean detectadas. A modo de conclusión, se van a indicar los valores de dichos parámetros para dos casos de interés. La tabla 3.5 muestra el caso más desfavorable posible, donde los índices de modulación ópticos de cada una de las señales del paquete pueden tomar valores entre  $0.1$  y  $1.0$ . En este caso, se ha calculado el valor de cada parámetro considerando el valor máximo del nivel de la señal interferente ( $OMI_{interferente}=1.0$ ) y el nivel mínimo de la señal a detectar ( $OMI_{detectar}=0.1$ ) para una penalización de la apertura del diagrama de ojos de la señal a detectar inferior a  $0.1dB$  ( $\approx 1,16\%$ ).

Parámetros de la FBG	FBGTx	FBGRx
$BW_{3dB}$ (mínimo)	$2 \cdot BR_P$	$2.5 \cdot BR_P$
Desintonía: $ \Delta f_{FBG}  =  f_{BRAGG} - f_0 $ [GHz]	0	0
T [dB] (mínimo)	- 18.34 (sin OCB) o - 60.93 (con OCB) (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea reflejar el 100% de carga en la FBGTx)	-48.05
MSLR [dB] (mínimo)	19.6 (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de etiqueta en la FBGTx)	18.28 (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de etiqueta en la FBGRx)
Rolloff [dB/GHz] (mínimo)	Ver expresión Ejemplo: $BR_P=10Gb/s, BR_L=625Mb/s, f_{RF}=18GHz$ => 2.25	Ver expresión Ejemplo: $BR_P=10Gb/s, BR_L=625Mb/s$ y $f_{RF}=18GHz$ => 3.13

**Tabla 3.5:** Parámetros de las FBGs empleadas en la configuración 2EOMP-RR y un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_P \in [0,1,1,0]$  y etiqueta  $OMI_L \in [0,1,1,0]$  con  $m_L=0.5$  respectivamente.

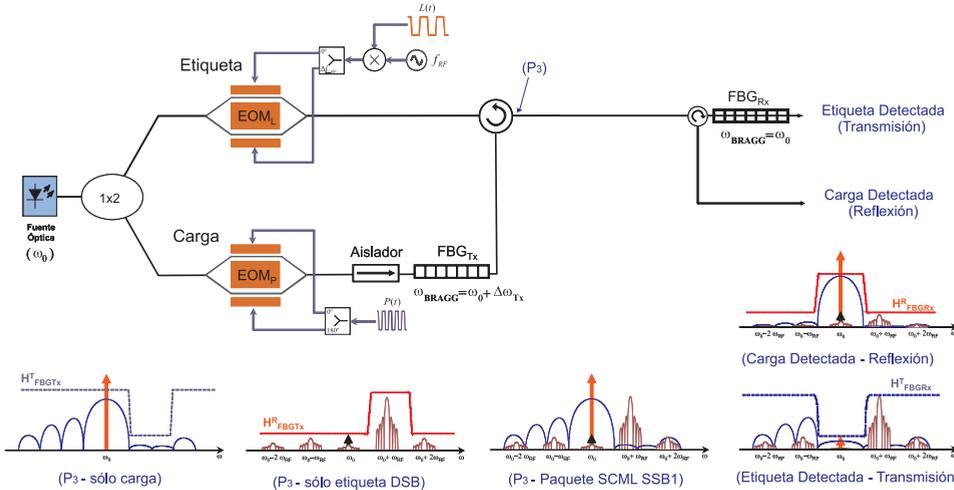
En la tabla 3.6 se ha realizado lo mismo pero en este caso los índices de modulación ópticos de ambas señales del paquete valen  $0.5$ .

Parámetros de la FBG	FBGTx	FBGRx
BW <sub>3dB</sub> (mínimo)	2 · BRp	2.35 · BRp
Desintonía: $ \Delta f_{FBG}  =  f_{BRAGG} - f_0 $ [GHz]	0	0
T [dB] (mínimo)	- 7.07 (sin OCB) o - 47.17 (con OCB) (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea reflejar el 100% de carga en la FBGTx)	-32.70
MSLR [dB] (mínimo)	19.3 (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de etiqueta en la FBGTx)	6.12 (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de etiqueta en la FBGRx)
Rolloff [dB/GHz] (mínimo)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s, BR <sub>L</sub> =625Mb/s, f <sub>RF</sub> =18GHz => 2.21	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s, BR <sub>L</sub> =625Mb/s, f <sub>RF</sub> =18GHz y MSLR <sub>Rx</sub> =20dB=> 3.02

**Tabla 3.6:** Parámetros de las FBGs empleadas en la configuración 2EOMP-RR y un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_P = 0.5$  y etiqueta  $OMI_L = 0.5$  con  $m_L = 0.5$  respectivamente.

### 3.2.2. Estructura 2EOMP-TR

La figura 3.10 muestra la estructura propuesta 2EOMP-TR. En este caso, la generación del paquete óptico se basa en la estructura por combinación óptica paralela con EOMs y FBG donde la carga es transmitida y la etiqueta es reflejada por la  $FBG_{Tx}$ . Para conseguirlo, la  $FBG_{Tx}$  debe estar desintonizada respecto a la frecuencia central del canal SCML  $f_0$ ,  $\Delta f_{Tx} = f_{Bragg} - f_0$ , siendo  $f_{Bragg}$  la frecuencia central de la banda de paso en reflexión de la  $FBG_{Tx}$ . La detección del paquete se realiza por el esquema de prefiltrado óptico con FBG donde la carga es reflejada y la etiqueta es transmitida a través de la  $FBG_{Rx}$ .



**Figura 3.10:** Esquema de la configuración de generación con combinación óptica paralela con carga en transmisión y detección por prefiltrado óptico con carga en reflexión (2EOMP-TR).

En la tabla 3.7 se indican los parámetros de las FBGs empleadas (T y MSLR) encargados de eliminar las interferencias intracanal SCML en la configuración 2EOMP-TR. El

resto de parámetros de la respuesta de reflexión de las FBGs ( $BW_{3dB}$ , Roll-off [dB/GHz], desintonía  $\Delta f$ ) se consideran que están diseñados para poder realizar la supresión de interferencias intracanal SCML con T y MSLR inicialmente, deduciendo las expresiones de diseño de los mismos posteriormente en esta sección.

Señal detectada	Interferencias del paquete SCML	Parámetro - FBG
Carga	Contribución interferente por el batido de la portadora óptica (OCB).	MSLR - FBGTx
	Contribución de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica ( $J_0^L$ ) generada por el EOML.	MSLR - FBGTx
	Contribuciones de etiqueta ( $J_k^L$ ) situadas en $w_0 + k \cdot w_{RF}$ con $k \neq 1$ (SSB-USB) o $k \neq -1$ (SSB-LSB).	MSLR - FBGTx y MSLR-FBGRx
	Etiqueta del paquete SCML eliminada ópticamente en recepción. Depende del tipo de etiqueta empleada en el paquete SCML, $J_k^L$ con $k=1$ (SSB-USB) o $k=-1$ (SSB-LSB).	MSLR - FBGRx
Etiqueta	Residuo de carga filtrada que cae sobre la etiqueta en la generación del paquete SCML.	T - FBGTx
	Carga del paquete SCML eliminada ópticamente en recepción.	T - FBGRx

**Tabla 3.7:** Interferencias intracanal SCML y los parámetros de las FBGs que los elimina en la configuración 2EOMP-TR.

Para esta configuración, las respuestas de reflexión y transmisión ideales de las FBGs en la pulsación angular  $w_0 + k w_{RF}$  están descritas en la siguiente tabla.

Señal	Respuesta FBG	$H_k = H(w = w_0 + k w_{RF})$		
Carga	FBGTx en transmisión	$H_{FBGTx,k}^p$	$\sqrt{1 - R_{Tx}}, k=1$	$\sqrt{1 - R_{Tx} / MSLR_{Tx}}, k \neq 1$
	FBGRx en reflexión	$H_k^p$	$\sqrt{R_{Rx}}, k=0$	$\sqrt{R_{Rx} / MSLR_{Rx}}, k \neq 0$
Etiqueta	FBGTx en reflexión	$H_{FBGTx,k}^L$	$\sqrt{R_{Tx}}, k=1$	$\sqrt{R_{Tx} / MSLR_{Tx}}, k \neq 1$
	FBGRx en transmisión	$H_k^L$	$\sqrt{1 - R_{Rx}}, k=0$	$\sqrt{1 - R_{Rx} / MSLR_{Rx}}, k \neq 0$

**Tabla 3.8:** Valores de las respuestas de reflexión y transmisión de FBGTx y FBGRx a la pulsación angular  $w_0 + k w_{RF}$  en la configuración 2EOMP-TR.

A continuación se van a obtener las ecuaciones de diseño de los parámetros de las FBGs para el caso de la configuración 2EOMP-TR particularizando las expresiones de las penalizaciones deducidas en la sección 3.1.

### Cálculo del parámetro $MSLR_{Tx}$ de la $FBG_{Tx}$ .

El parámetro MSLR de la  $FBG_{Tx}$ ,  $MSLR_{Tx}$ , es el encargado de eliminar los términos de interferencia por OCB y la contribución de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica ( $J_0^L$ ) generada por el  $EOM_L$  de la fotocorriente de carga detectada. También se emplea para suprimir junto con el parámetro  $MSLR_{Rx}$  el resto de términos de etiqueta salvo la situada en la frecuencia angular  $w_0 + w_{RF}$ , y que corresponde con la etiqueta a transmitir en el paquete SCML. Tal como se comentó en la estructura 2EOMP-RR, la interferencia sobre la carga por OCB puede eliminarse si la implementación de la estructura de generación 2EOMP-TR es tal que  $\Delta\phi_p = k\pi$ . En caso contrario, éste debe

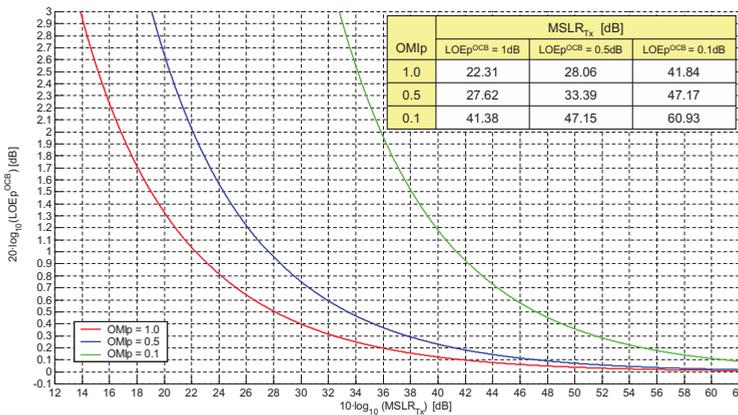
ser eliminado a través del parámetro  $MSLR_{Tx}$ . Así pues, la penalización de la apertura el diagrama de ojos de la carga por OCB en esta configuración se obtiene sin más que sustituir las respuestas de las FBGs descritas en la tabla 3.8 en la ecuación 3.7, obteniendo:

$$LOE_p^{OCB} = \frac{D_p \sin\left(\frac{OMI_p}{2}\right) \left[1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right]}{D_p \sin\left(\frac{OMI_p}{2}\right) \left[1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right] - 2D_L \cos\left(\frac{OMI_p}{4}\right) \sqrt{\frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \sqrt{1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}}}} \quad (3.35)$$

El parámetro  $MSLR_{Tx}$  necesario para conseguir una penalización  $LOE_p^{OCB}$  en la configuración 2EOMP-TR se obtiene sin más que despejarlo de la expresión anterior:

$$MSLR_{Tx} = R_{Tx} \cdot \left[1 + \left(\frac{2D_p D_L \cos(\pi \cdot OMI_p/4)}{D_p^2 \cdot \sin(\pi \cdot OMI_p/2) \cdot (1 - 1/LOE_p^{OCB})}\right)^2\right] \quad (3.36)$$

En la figura 3.11 se muestra la evaluación de la penalización de la apertura del diagrama de ojos de carga asociada por OCB en función del coeficiente  $MSLR_{Tx}$  de la  $FBG_{Tx}$  y para varios niveles de carga. Como se puede deducir de la expresión 3.35 éste depende del nivel de carga,  $OMI_p$ , empleado en el paquete SCML y será menor conforme se aumente el nivel de rechazo fuera de la banda de paso en reflexión de la  $FBG_{Tx}$  en  $w_0$  definido a través del parámetro  $MSLR_{Tx}$ . También se indican los valores de  $MSLR_{Tx}$ [dB] necesarios para conseguir una penalización de carga por OCB igual a 0.1, 0.5 y 1.0 dB con niveles de carga  $OMI_p$  de 0.1, 0.5 y 1.0. Se puede comprobar cómo el  $MSLR_{Tx}$  en la configuración 2EOMP-TR es equivalente al  $T_{Tx}$  en la configuración 2EOMP-RR.



**Figura 3.11:**  $LOE_p^{OCB}$  en función de  $MSLR_{Tx}$  y nivel de carga del paquete,  $OMI_p$ , con la configuración 2EOMP-TR.

En el caso de eliminar el término de interferencia asociado al OCB en la configuración 2EOMP-TR, la penalización total de la apertura del diagrama de ojos de carga,  $LOE_p$ , (ec. 3.12) se puede expresar de la siguiente forma:

$$LOE_p = \frac{C_P \left[ 1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \right] R_{Rx}}{C_P \left[ 1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \right] R_{Rx} - C_{L,1} R_{Tx} \left[ \frac{R_{Rx}}{MSLR_{Rx}} \right] - \left[ \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \right] \left\{ \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0,1}}^{\infty} C_{L,k} \left[ \frac{R_{Rx}}{MSLR_{Rx}} \right] - \right.} \left. - C_{L,0} R_{Rx} \right\}} \quad (3.37)$$

y ésta en función de sus contribuciones parciales sería:

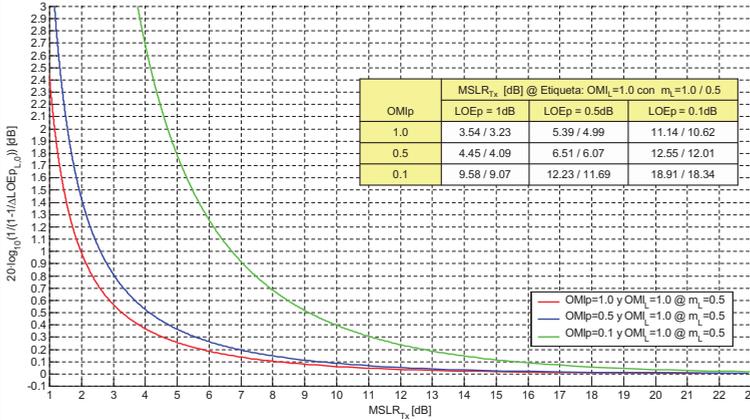
$$\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0,1}}^{\infty} \frac{1}{\Delta LOE_{pL,k}} + \frac{1}{\Delta LOE_{pL,0}} + \frac{1}{\Delta LOE_{pL,1}} = 1 - \frac{1}{LOE_P} \quad (3.38)$$

La contribución interferente de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica sobre la carga detectada se puede obtener al despejar la penalización parcial asociada a la misma,  $\Delta LOE_{pL,0}$ , de la total (ec. 3.37). Como se observa, ésta depende de  $MSLR_{Tx}$  tal como se había indicado anteriormente.

$$\frac{1}{\Delta LOE_{pL,0}} = \frac{C_{L,0} \cdot \left[ \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \right] \cdot R_{Rx}}{C_P \cdot \left[ 1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \right] \cdot R_{Rx}} = \frac{C_{L,0} \cdot R_{Tx}}{C_P \cdot [MSLR_{Tx} - R_{Tx}]} \quad (3.39)$$

Despejando  $MSLR_{Tx}$  de la expresión 3.39, obtenemos que éste vale:

$$MSLR_{Tx} = R_{Tx} \left[ 1 - \frac{C_{L,0}}{C_P \cdot (1/\Delta LOE_{pL,0})} \right] = R_{Tx} \left[ 1 - \frac{D_L^2 \left[ \left( J_0^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_0^{(L=0)} \right)^2 \right]}{2D_P^2 \sin \left( \frac{OMI_P}{2} \right) (1/\Delta LOE_{pL,0})} \right] \quad (3.40)$$



**Figura 3.12:**  $1/(1 - 1/\Delta LOE_{pL,0})$  en función de  $MSLR_{Tx}$  y para un paquete con niveles de etiqueta,  $OMI_L = 1$  con  $m_L = 0,5$ , y carga,  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$ , empleando la configuración 2EOMP-TR.

La figura 3.12 muestra la evolución de la penalización asociada a  $\Delta LOE_{pL,0}$  sin OCB en función del parámetro  $MSLR_{Tx}$  y para un paquete SCML con niveles de etiqueta ( $OMI_L = 1$  con  $m_L = 0.5$ ) y carga  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$ . Como se puede comprobar, los niveles de  $MSLR_{Tx}$  requeridos para eliminar este término de distorsión de etiqueta son inferiores a los de OCB.

### Cálculo del parámetro $MSLR_{Rx}$ de la $FBG_{Rx}$ .

El parámetro MSLR de la  $FBG_{Rx}$ ,  $MSLR_{Rx}$ , se encarga de eliminar principalmente la contribución de etiqueta del paquete SCML situada a la frecuencia angular  $w_0 \pm w_{RF}$  dependiendo que la etiqueta empleada en el paquete sea SSB-USB o SSB-LSB respectivamente. El resto de contribuciones de etiqueta, salvo la modulada sobre la propia portadora óptica, serán eliminados doblemente por la  $FBG_{Tx}$  a través de  $MSLR_{Tx}$  como por la  $FBG_{Rx}$  mediante el parámetro  $MSLR_{Rx}$ . Por tanto, no serán significativos éstos últimos términos en el cálculo del  $MSLR_{Rx}$ , ya que tal como se ha obtenido en el punto anterior  $MSLR_{Tx} \gg 1$ . Despejando la contribución asociada al término de etiqueta del paquete de la expresión general de  $LOE_P$  3.37, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\Delta LOE_{pL,1}} = \frac{C_{L,1} \cdot R_{Tx} \cdot \left[ \frac{R_{Rx}}{MSLR_{Rx}} \right]}{C_P \cdot \left[ 1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \right] \cdot R_{Rx}} \quad (3.41)$$

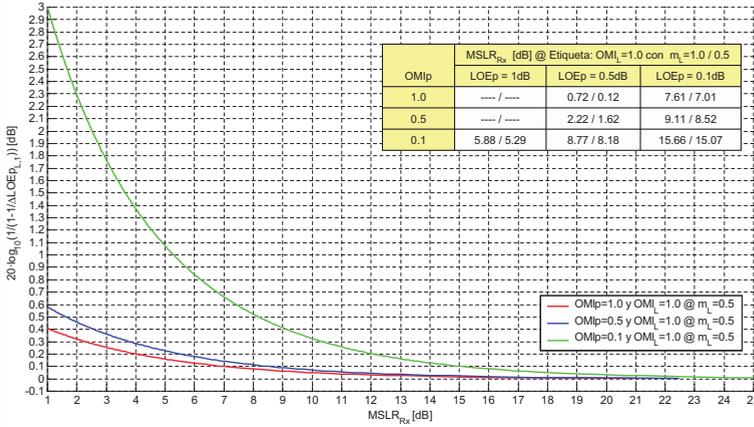
y despejando el parámetro  $MSLR_{Rx}$  de la ecuación anterior, se obtiene el valor de  $MSLR_{Rx}$  necesario para tener una penalización asociada a este término respecto a la total de la carga detectada.

$$MSLR_{Rx} = \frac{R_{Tx}}{[1 - R_{Tx}/MSLR_{Tx}]} \cdot \left[ \frac{D_L^2 \cdot \left[ \left( J_1^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_1^{(L=0)} \right)^2 \right]}{2D_P^2 \sin \left( \frac{OMI_P}{2} \right) \cdot (1/\Delta LOE_{pL,1})} \right] \quad (3.42)$$

En el caso real,  $MSLR_{Tx} \gg 1$  y  $R_{Tx} \approx 1$ , luego  $R_{Tx}/MSLR_{Tx} \approx 0$ , simplificándose la ecuación anterior en:

$$MSLR_{Rx} \approx R_{Tx} \cdot \left[ \frac{D_L^2 \cdot \left[ \left( J_1^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_1^{(L=0)} \right)^2 \right]}{2D_P^2 \sin \left( \frac{OMI_P}{2} \right) \cdot (1/\Delta LOE_{pL,1})} \right] \quad (3.43)$$

La figura 3.13 muestra la evolución de la penalización asociada a  $\Delta LOE_{pL,1}$  sin OCB en función del parámetro  $MSLR_{Rx}$  y para un paquete SCML con niveles de etiqueta ( $OMI_L = 1$  y  $m_L = 0.5$ ) y carga  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$ .



**Figura 3.13:**  $1/(1 - \Delta LOEP_{L,1})$  en función de  $MSLR_{Rx}$  y para un paquete con niveles de etiqueta,  $OMI_L = 1$  con  $m_L = 0.5$ , y carga,  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$ , empleando la configuración 2EOMP-TR.

### Cálculo del parámetro $T_{Rx}$ de la $FBG_{Rx}$ .

El parámetro T de la  $FBG_{Rx}$ ,  $T_{Rx}$ , se encarga de eliminar la contribución de carga del paquete SCML ópticamente en recepción. Este se puede deducir de la penalización  $LOE_L$  (ec. 3.17) sin más que particularizarla con los valores de las FBGs descritos en la tabla 3.8 y despejando el parámetro  $R_{Rx}$ , obteniendo la siguiente expresión:

$$R_{Rx} = \frac{C_P \cdot \left[1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right] - \left[1 - \frac{1}{LOE_L}\right] \cdot \left[ \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 1}}^{\infty} C_{L,k} \cdot \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} + C_{L,1} \cdot R_{Tx} \right]}{C_P \cdot \left[1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right] - \left[1 - \frac{1}{LOE_L}\right] \left\{ \begin{aligned} &C_{L,0} \cdot \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} + C_{L,1} \cdot \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Rx}} + \\ &+ \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0,1}}^{\infty} C_{L,k} \cdot \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx} \cdot MSLR_{Rx}} \end{aligned} \right\}} \quad (3.44)$$

En el caso real,  $MSLR_{Tx} \gg 1$  y  $R_{Tx} \approx 1$ , luego  $R_{Tx}/MSLR_{Tx} \approx 0$ . También suele darse la situación de que la  $FBG_{Rx}$  presente un valor de  $MSLR_{Rx} \gg 1$ , luego  $1/MSLR_{Rx} \approx 0$ . Bajo estas condiciones, la expresión 3.46 se simplifica de la siguiente forma:

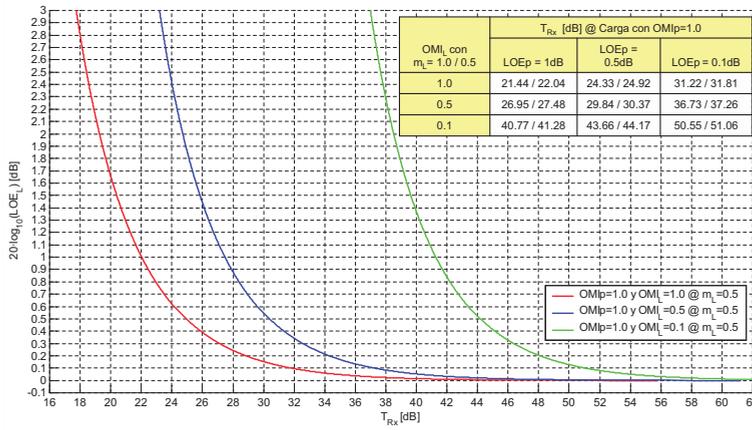
$$R_{Rx} \approx 1 - \left[1 - \frac{1}{LOE_L}\right] \cdot \frac{C_{L,1}}{C_P} \cdot R_{Tx} \quad (3.45)$$

dando lugar a una expresión de  $T_{Rx}$  para este caso igual a:

$$T_{Rx} = 1 - R_{Rx} \approx \left[1 - \frac{1}{LOE_L}\right] \cdot \frac{D_L^2 \cdot \left[ \left(J_1^{(L=1)}\right)^2 - \left(J_1^{(L=0)}\right)^2 \right]}{2D_P^2 \sin\left(\frac{OMI_P}{2}\right)} \cdot R_{Tx} \quad (3.46)$$

La figura 3.14 muestra la evolución de la penalización  $LOE_L$  sin OCB en función del parámetro  $T_{Rx}$  y para un paquete SCML con niveles de etiqueta  $OMI_L = 0.1, 0.5$  y  $1.0$

con  $m_L = 0.5$  y peor caso de carga,  $OMI_P = 1.0$ . También se indican los valores de  $T_{Rx}$  requeridos para una penalización  $LOE_L$  de 0.1, 0.5 y 1.0 dB.



**Figura 3.14:**  $LOE_L$  en función de  $T_{Rx}$  y para un paquete SCML con nivel de carga  $OMI_P = 1.0$  y etiqueta  $OMI_L = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  con  $m_L = 0.5$  empleando la configuración 2EOMP-TR.

El resto de parámetros de las respuestas de las FBGs utilizadas en la configuración 2EOMP-TR van a ser obtenidos a partir de las penalizaciones de la apertura de los diagramas de ojos de carga y etiqueta cuando se incluyen la forma de los filtros reales, tal que afectan sobre la forma de los pulsos de las señales detectadas. Para ello se hará uso de la fotocorriente deducida en la ecuación 2.50 del capítulo 2. Concretamente, se debe obtener los valores del  $f_{Bragg}$ ,  $BW_{3dB}$ , Rolloff y T de la  $FBG_{Tx}$ , así como el  $f_{Bragg}$ ,  $BW_{3dB}$  y Rolloff de la  $FBG_{Rx}$ . Se va a comenzar determinando las  $f_{Bragg}$  de las FBGs empleadas, ya que deben estar desintonizadas respecto a la frecuencia central del canal SCML, así como el  $BW_{3dB}$  y Rolloff de las FBGs, utilizando los valores de  $MSLR_{Tx}$ ,  $MSLR_{Rx}$  y  $T_{Rx}$  calculados previamente mediante las expresiones analíticas 3.40, 3.43 y 3.46 respectivamente. Por último, se calculará el término  $T_{Tx}$  empleando el resto de los valores de las respuestas de las FBGs determinados previamente.

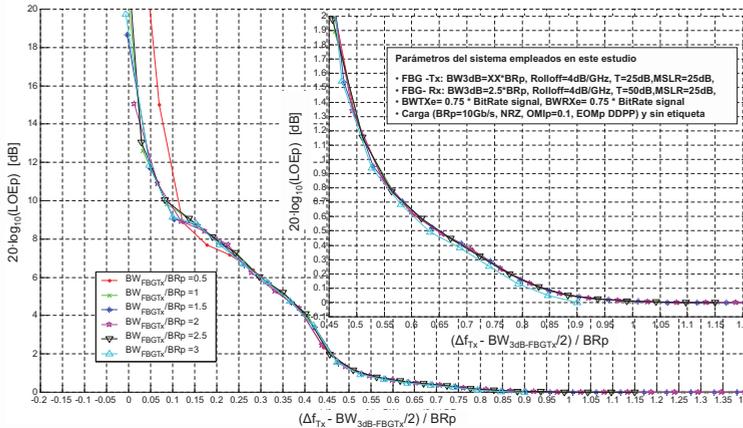
### Cálculo del parámetro $\Delta f_{Tx}$ de la $FBG_{Tx}$ .

La configuración 2EOMP-TR emplea la  $FBG_{Tx}$  desintonizada sobre la portadora óptica del canal,  $\Delta f_{Tx} = f_{Bragg-FBG_{Tx}} - f_0$ , para realizar la combinación óptica de la carga y etiqueta del paquete SCML en generación. Esta desintonía va a originar un el recorte espectral de la carga, debiendo determinar su valor para que no afecte sobre su calidad una vez detectada. Para determinarlo se va a analizar la penalización de la apertura del diagrama de ojos de carga detectada cuando se transmite el paquete SCML sin etiqueta. En la figura 3.15 se muestra los resultados de  $LOE_P$  en función de  $\Delta f_{Tx}$  y variando el ancho de la banda de paso de la  $FBG_{Tx}$ ,  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}$ . Se comprueba que dicha penalización viene asociada al recorte espectral de la carga cuando se desintoniza la  $FBG_{Tx}$  con un ancho de banda de paso de reflexión de la  $FBG_{Tx}$ . Concretamente, dicha penalización será nula cuando la desintonía  $\Delta f_{Tx}$  sea tal que el flanco de la banda eliminada

que recorta espectralmente la carga corresponda con la frecuencia equivalente a la tasa de transmisión de la señal de carga,  $BR_p$ . Así pues, se obtiene la siguiente ecuación de diseño de  $\Delta f_{Tx}$  para el caso de generar un paquete SCML SSB-USB sin penalización de carga por recorte espectral:

$$\Delta f_{Tx} = BR_p + BW_{3dB-FBG_{Tx}}/2 \quad (3.47)$$

Esta desintonía será  $-\Delta f_{Tx}$  en el caso de que el paquete SCML generado emplee la banda inferior de etiqueta (SCML SSB-LSB).



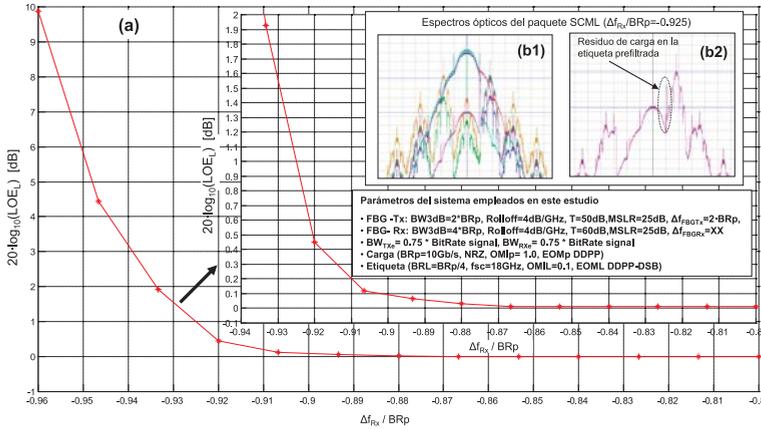
**Figura 3.15:**  $LOE_p$  en función de  $\Delta f_{Tx}$  y  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}$  de la  $FBG_{Tx}$  transmitiendo paquetes SCML con sólo carga ( $OMIp = 0.1$ ) en la configuración 2EOMP-TR.

### Cálculo del parámetro $\Delta f_{Rx}$ de la $FBG_{Rx}$ .

La  $FBG_{Rx}$  se encarga de separar la carga y la etiqueta del paquete en la configuración 2EOMP-TR, empleando la respuesta de transmisión de la misma para extraer la etiqueta del paquete (ver figura 3.10). Será crucial situar el flanco de la banda de rechazo de la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$  asociada a la banda de etiqueta empleada en el paquete SCML, USB o LSB, lo más próximo a la carga pero de forma que elimine todas las frecuencias espectrales de ésta última transmitida dentro de la banda frecuencial donde se sitúa la etiqueta del paquete SCML.

En la figura 3.16(b1) se muestran los espectros ópticos del paquete SCML en varios puntos del transmisor y receptor: (roja) carga a la salida del EOMP, (cian) carga reflejada en la  $FBG_{Tx}$ , (amarillo) etiqueta a la salida del EOML, (verde) etiqueta transmitida en la  $FBG_{Tx}$ , (azul) carga reflejada en la  $FBG_{Rx}$  y (morado) etiqueta transmitida en la  $FBG_{Rx}$ . En la figura 3.16(b2) se muestra el espectro de la etiqueta transmitido en la  $FBG_{Rx}$  y desintonizada de forma que no suprime totalmente el espectro de la carga que interfiere sobre la etiqueta detectada. En la figura 3.16(a) se ha calculado la penalización de la apertura del diagrama de ojos de etiqueta en función de la desintonía de la  $FBG_{Rx}$ ,  $\Delta f_{Rx} = f_0 - f_{Bragg-FBG_{Rx}}$ , dada la tasa de transmisión de carga ( $BR_p$ ), la  $FBG_{Tx}$  ( $Rolloff_{FBG_{Tx}}$ ) y la  $FBG_{Rx}$  ( $BW_{3dB-FBG_{Rx}}$ ,  $Rolloff_{FBG_{Rx}}$ ). Cabe destacar que se ha

considerado un ancho de banda de paso de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  de  $BW_{3dB_{FBGRx}} = 4 \cdot BR_P$ , suficiente para que no afecte sobre la carga y a la etiqueta detectada.



**Figura 3.16:** (a)  $LOE_L$  en función de  $\Delta f_{Rx}$  para un paquete con niveles de carga  $OMI_P = 1$  y etiqueta  $OMI_L = 0.1$  con  $m_L = 0.5$  empleando la configuración 2EOMP-TR, (b1) espectros ópticos del paquete SCML en varios puntos de interés del generador y receptor de la configuración 2EOMP-TR, (b2) espectro óptico de la etiqueta detectada del paquete SCML en la salida de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ .

De este estudio se extrae la siguiente expresión de diseño para la desintonía de la  $FBG_{Rx}$ :

$$\Delta f_{Rx} = BR_P + 3 \cdot (1/Roloff_{FBGTx} + 1/Roloff_{FBGRx}) - BW_{3dB-FBGRx}/2 \quad (3.48)$$

Por último, cabe puntualizar que el valor de esta desintonía  $\Delta f_{Rx}$  será positiva o negativa dependiendo de que se emplee un paquete SCML SSB-USB o SSB-LSB respectivamente.

### Cálculo de los parámetros $BW_{3dB}$ y Rolloff de la $FBG_{Tx}$ .

En esta configuración de generación paralela, la  $FBG_{Tx}$  se encarga de generar el paquete SCML transmitiendo la carga y reflejando la etiqueta en la misma. Por tanto, el ancho de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Tx}$  debe de cumplir los siguientes requisitos:

1. El límite inferior de la banda de paso,  $f_{min-FBGTx}$ , debe ser aquel que consiga eliminar las componentes frecuenciales de la carga sin afectar sobre su calidad en detección. Este valor se ha analizado previamente cuando se ha determinado la desintonía de la  $FBG_{Tx}$ ,  $\Delta f_{Tx}$  y corresponde con la frecuencia igual a la tasa de transmisión de la carga,  $BR_P$ , para que no exista penalización.
2. El límite superior de la banda de paso,  $f_{max-FBGTx}$ , depende del valor de la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia donde se modula la etiqueta, así como de la velocidad de transmisión de etiqueta,  $BR_L$ . También debe ser capaz de eliminar

las componentes de carga situadas en las frecuencias donde se localiza la banda de la etiqueta empleada en el paquete. Así pues, el valor de la frecuencia superior de la banda de paso de la  $FBG_{Tx}$  debe ser como mínimo el valor mínimo entre  $(f_{RF} + BR_L)$  y  $2.2 \cdot BR_P$  (frecuencia donde las componentes de carga se encuentran por debajo de 27.5 dB ópticos respecto de la etiqueta en las condiciones más críticas desde el punto de vista de etiqueta y que corresponde para una carga máxima,  $OMI_P = 1$ , y etiqueta mínima,  $OMI_L = 0.1$  con  $m_L = 0.5$ ).

Así pues, el ancho de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Tx}$ ,  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}$ , se puede expresar de la siguiente forma:

$$BW_{3dB-FBG_{Tx}} \geq f_{max-FBG_{Tx}} - f_{min-FBG_{Tx}} = \min [(f_{RF} + BR_L), 2.2 \cdot BR_P] - BR_P \quad (3.49)$$

El Rolloff de la  $FBG_{Tx}$ ,  $Rolloff_{FBG_{Tx}}$ , debe ser aquel que consiga suprimir  $MSLR_{Tx}$  [dB] la contribución de etiqueta en banda base o el término de OCB sabiendo que el valor de la frecuencia inferior del ancho de banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Tx}$  está situada a la frecuencia  $BR_P$ . Para esta situación se obtiene la siguiente relación:

$$f_0 + BR_L + (MSLR_{Tx} - 3)/Rolloff_{FBG_{Tx}} \leq f_0 + BR_P \quad (3.50)$$

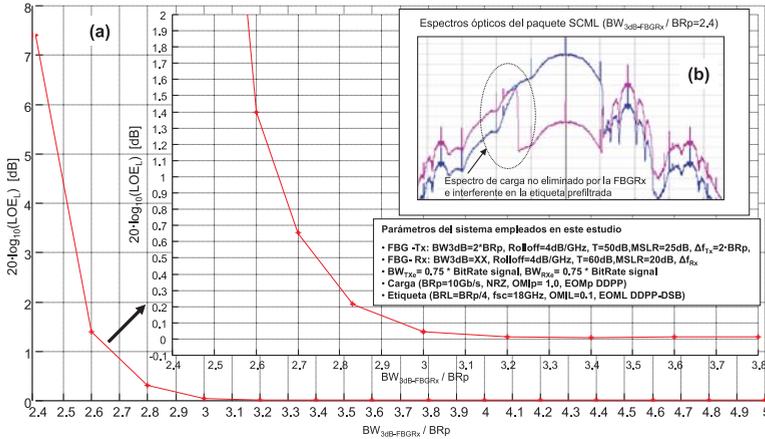
donde el valor de  $Rolloff_{FBG_{Tx}}$  se obtiene sin más que despejarlo de la expresión anterior:

$$Rolloff_{FBG_{Tx}} \geq (MSLR_{Tx} - 3)/(BR_P - BR_L) \quad (3.51)$$

### Cálculo de los parámetros $BW_{3dB}$ y Rolloff de la $FBG_{Rx}$ .

En la configuración 2EOMP-TR, la  $FBG_{Rx}$  se encarga de separar ópticamente las señales del paquete SCML, reflejando la carga y transmitiendo la etiqueta a través de ella. Por tanto, el ancho de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ ,  $BW_{3dB-FBG_{Rx}}$ , desintonizada  $\Delta f_{Rx}$  debe de cumplir los siguientes requisitos:

1. El límite inferior de la banda de paso de la  $FBG_{Rx}$ ,  $f_{min-FBG_{Rx}}$ , debe ser aquel que consiga eliminar las componentes frecuenciales de la carga sin afectar sobre su calidad en detección. Este valor se ha estudiado en la configuración anterior 2EOMP-RR, concluyendo que corresponde con la frecuencia igual a la tasa de transmisión de la carga,  $BR_P$  ( $f_{min-FBG_{Rx}} = -BR_P$ ). Además, debe suprimir el espectro de carga que interfiere a la etiqueta en el proceso de detección por prefiltrado óptico con la  $FBG_{Rx}$  (traza morada de la figura 3.17(b)). Cabe destacar que no sólo consiste en la eliminación del lóbulo principal de carga sino además los lóbulos secundarios inferiores del espectro de carga que no son eliminados en el proceso de generación del paquete SCML y una vez detectados afectan a la calidad de la etiqueta detectada. Se ha verificado mediante simulación que corresponde con las componentes frecuenciales de carga que sean superiores a -27.5 dB ópticos respecto al nivel de etiqueta. Para el caso más restrictivo respecto a la etiqueta (nivel carga máxima,  $OMI_P = 1$ , y etiqueta mínimo,  $OMI_L = 0.1$  con  $m_L = 0.5$ ,  $f_{min-FBG_{Rx}} = -2.2 \cdot BR_P$ ). Por tanto, dependiendo de los niveles de carga y etiqueta  $f_{min-FBG_{Rx}} \in [-2.2 \cdot BR_P, -BR_P]$ .
2. El límite superior de la banda de paso de la  $FBG_{Rx}$ ,  $f_{max-FBG_{Rx}}$ , viene asociado al valor calculado cuando se determinó la desintonía de la  $FBG_{Rx}$ . Concretamente, éste corresponde con  $BR_P + 3/Rolloff_{FBG_{Tx}} + 3/Rolloff_{FBG_{Rx}}$ .



**Figura 3.17:** (a)  $LOEL$  en función de  $BW_{3dB-FBGRx}$  para paquetes SCML con niveles de carga  $OMIp=1$  y etiqueta  $OMIL=0.1$  con  $m_L=0.5$  en la configuración 2EOMP-TR, (b) espectros ópticos del paquete SCML a la salida de la etapa de prefiltrado óptico: (azul) carga en reflexión y (morado) etiqueta en transmisión.

Por tanto, se deduce la siguiente expresión de diseño para el  $BW_{3dB-FBGRx}$  de la  $FBG_{Rx}$  desintonizada  $\Delta f_{rx}$  como  $BW_{3dB-FBGRx} \geq f_{m\acute{a}x-FBGRx} - f_{m\acute{i}n-FBGRx}$ , que en este caso vale:

$$BW_{3dB-FBGRx} \geq BRp + 3 \cdot (1/Rolloff_{f_{FBGTx}} + 1/Rolloff_{f_{FBGRx}}) + Cof_{BW-FBGRx} \cdot BRp \quad (3.52)$$

donde  $Cof_{BW-FBGRx} \in [1, 2.2]$  viene asociado con los niveles de carga y etiqueta que hacen que las componentes de carga residuo al detectar etiqueta, donde el rango de valores está comprendido entre los límites 1 ( $OMIp = OMIL$ ) y 2.2 ( $OMIp=1$  y  $OMIL=0.1$  con  $m_L=0.5$ )

El Rolloff de la  $FBG_{Rx}$  debe ser aquel que consiga suprimir  $MSLR_{Rx}$  [dB] la contribución de etiqueta situada a la frecuencia  $f_0 + f_{RF}$  con tasa de transmisión de etiqueta  $BR_L$ . Por tanto, la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe valer  $MSLR_{Rx}$  [dB] a la frecuencia  $f_0 + f_{RF} - BR_L$ . Además, el valor de la frecuencia superior del ancho de banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  está situada a la frecuencia  $f_0 + BRp + 3/Rolloff_{f_{FBGTx}} + 3/Rolloff_{f_{FBGRx}}$ , según se dedujo al calcular la desintonía de la  $FBG_{Rx}$ . Con todo ello, se obtiene la siguiente relación:

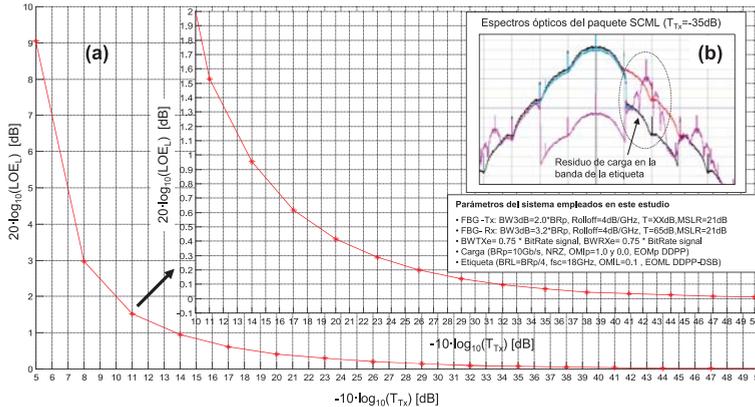
$$f_0 + BRp + \frac{3}{Rolloff_{f_{FBGTx}}} + \frac{3}{Rolloff_{f_{FBGRx}}} + \frac{MSLR_{Tx} - 3}{Rolloff_{f_{FBGRx}}} \leq f_0 + f_{RF} - BR_L \quad (3.53)$$

Sustituyendo el  $Rolloff_{f_{FBGTx}}$  (ec. 3.51) en la expresión anterior, se consigue la siguiente ecuación de diseño para el  $Rolloff_{f_{FBGRx}}$

$$Rolloff_{f_{FBGRx}} \geq \frac{MSLR_{Rx}}{f_{RF} - BRp \cdot [1 + 3/(MSLR_{Tx} - 3)] - BR_L \cdot [1 - 3/(MSLR_{Tx} - 3)]} \quad (3.54)$$

### Cálculo del parámetro $T_{Tx}$ de la $FBG_{Tx}$ .

El parámetro T de la  $FBG_{Tx}$  se encarga de eliminar parte del espectro de carga que se sitúa sobre la etiqueta del paquete SCML ( $f_0 + f_{RF}$  o  $f_0 - f_{RF}$  dependiendo de emplear etiqueta SSB-USB o SSB-LSB en el paquete SCML) y que interfiere sobre la etiqueta detectada. Este parámetro dependerá de los índices de modulación óptico de carga y etiqueta.



**Figura 3.18:**  $LOE_L$  en función del  $MSLR_{Tx}$  de la  $FBG_{Tx}$  empleando la configuración 2EOMP-TR. Espectros ópticos del paquete SCML cuando  $T_{Tx} = -35$  dB: carga salida EOMP (rojo), carga reflejada  $FBG_{Tx}$  (cian), etiqueta salida EOML (verde), carga reflejada  $FBG_{Rx}$  (azul), etiqueta transmitida  $FBG_{Rx}$  (morado).

En la figura 3.18 se muestra la penalización de la apertura de ojos de la etiqueta detectada en función del parámetro  $T_{Tx}$  cuando se considera un paquete con nivel de etiqueta  $OMI_L=0.1$  con  $m_L=0.5$  y carga  $OMI_P=1$ , respecto a un paquete donde únicamente se transmite etiqueta. En este estudio se ha empleado el resto de los parámetros determinados previamente para esta configuración. Cabe destacar que además de la penalización de la etiqueta por las frecuencias de carga que caen cerca de la etiqueta y que no son eliminadas en recepción, tenemos el hecho de que el 100% de la etiqueta no se transmita a través de la  $FBG_{Rx}$  (las bandas de etiqueta se transmiten  $1 - R_{Tx}/MSLR_{Rx}$ ) y se produzca una penalización en la etiqueta. Por tanto, interesa que  $MSLR_{Tx} \gg 1$  para transmitir prácticamente el 100% de la etiqueta del paquete por la  $FBG_{Rx}$ .

Paquete SCML		- $T_{Tx}$ [dB]		
OMIp	OMIL con $m_L=0.5$	LOEp = 1dB	LOEp = 0.5dB	LOEp = 0.1dB
0.5	0.5	10.0	13.0	20.5
1.0	0.1	14.5	18.5	32.0

**Tabla 3.9:** Valores de  $T_{Tx}$  necesarios para una  $LOE_L = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  dB empleando la configuración 2EOMP-TR con niveles de carga y etiqueta de interés.

La tabla 3.9 resume los valores del  $T_{Tx}$  para conseguir una penalización de la apertura del diagrama de ojos de etiqueta  $LOE_L = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  dB con varios niveles de interés

de carga y etiqueta. Así pues, diseñando una  $FBG_{Rx}$  con un  $T_{Tx} > 19,6dB$  conseguimos que la penalización de etiqueta por las componentes espectrales que caen sobre la bandas de la etiqueta del paquete SCML sea menor de 0.1dB (1.16%).

**Tabla resumen de diseño de  $FBG_{Tx}$  y  $FBG_{Tx}$  con la configuración 2EOMP-TR.**

El cálculo de los parámetros de la  $FBG_{Tx}$  y  $FBG_{Rx}$  depende de las señales que constituyen el paquete SCML, tal como se ha explicado previamente. Concretamente, en la sección 3.2.2 se han determinado cada uno de los parámetros (T, MSLR,  $BW_{3dB}$  y Rolloff) empleados en la  $FBG_{Tx}$  y  $FBG_{Rx}$  con la configuración 2EOMP-TR, estableciendo unas ecuaciones de diseño que permitan cuantificar cada una de las distorsiones existentes entre las señales del paquete una vez sean detectadas. A continuación, se indica los valores de dichos parámetros para dos casos de niveles de carga y etiqueta de los paquetes SCML de interés. La tabla 3.10 muestra el caso más desfavorable posible, donde los índices de modulación ópticos de cada una de las señales del paquete pueden tomar valores entre 0.1 y 1.0. En este caso, se calculado el valor de cada parámetro considerando el valor máximo del nivel de la señal interferente ( $OMI_{interferente}=1.0$ ) y el nivel mínimo de la señal a detectar ( $OMI_{detectar}=0.1$ ) para una penalización de la apertura del diagrama de ojos de la señal a detectar inferior a 0.1dB ( $\approx 1,16\%$ ).

Parámetros de la FBG	FBGTx	FBGRx
BW3dB (mínimo)	1.2 · BRp	3.2 · BRp + 3{1/Rolloff <sub>FBGTx</sub> + 1/Rolloff <sub>FBGRx</sub> }
Desintonía: $ \Delta f_{FBG}  =  f_{BRAGG} - f_0 $ [GHz]	1.6 · BRp	- 0.6 · BRp + 3{1/Rolloff <sub>FBGTx</sub> + 1/Rolloff <sub>FBGRx</sub> }/2
T [dB] (mínimo)	- 32	-51.06
MSLR [dB] (mínimo)	18.34 (sin OCB) o 60.93 (con OCB) (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de la carga en la FBGTx)	15.07 (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de etiqueta en la FBGRx)
Rolloff [dB/Ghz] (mínimo)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s y BR <sub>L</sub> =625Mb/s => 1.64 (sin OCB) o 6.18 (con OCB)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s y BR <sub>L</sub> =625Mb/s, f <sub>RF</sub> =18GHz => 2.71 (sin OCB) o 2.18 (con OCB)

**Tabla 3.10:** Parámetros de las FBGs empleadas en la configuración 2EOMP-TR para transmisión de paquetes SCML con niveles de carga  $OMI_P \in [0,1,1,0]$  y etiqueta  $OMI_L \in [0,1,1,0]$  con  $m_L=0.5$  respectivamente.

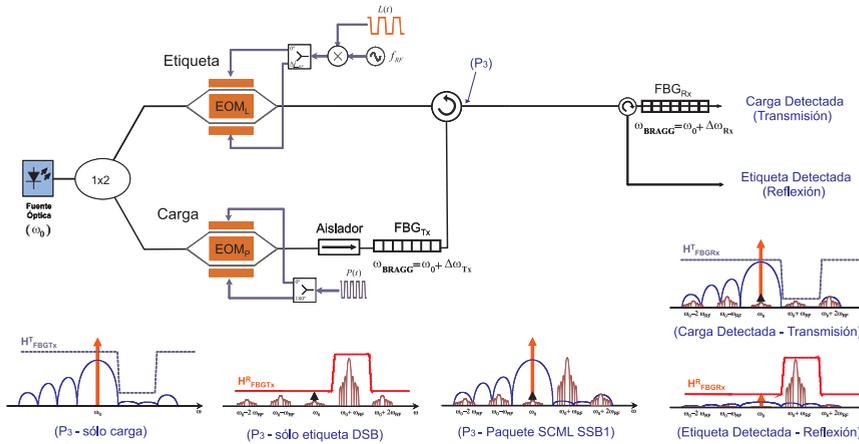
En la tabla 3.11 se ha realizado lo mismo pero en este caso los índices de modulación ópticos de ambas señales del paquete valen 0.5.

Parámetros de la FBG	FBGTx	FBGRx
BW3dB (mínimo)	1.05 · BRp (ver expresión, limitado la fmax por recorte etiqueta)	2 · BRp + 3{1/Rolloff <sub>FBGTx</sub> + 1/Rolloff <sub>FBGRx</sub> } (limitado por recorte de carga)
Desintonía: $ \Delta f_{FBG}  =  f_{BRAGG} - f_0 $ [GHz]	1.525 · BRp	(3/2){1/Rolloff <sub>FBGTx</sub> + 1/Rolloff <sub>FBGRx</sub> }
T [dB] (mínimo)	-5 ( por interferencia de la carga) o -20.5 (reflectividad de etiqueta 100%)	-35.76
MSLR [dB] (mínimo)	4.87 (sin OCB) o 47.17 (con OCB) (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de la carga en la FBGTx)	3.07 (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de etiqueta en la FBGRx)
Rolloff [dB/Ghz] (mínimo)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s y BR <sub>L</sub> =625Mb/s => 0.20 (sin OCB) o 4.71 (con OCB)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s y BR <sub>L</sub> =625Mb/s, f <sub>RF</sub> =18GHz => 0.1 (sin OCB) o 0.46 (con OCB)

**Tabla 3.11:** Parámetros de las FBGs empleadas en la configuración 2EOMP-TR para transmisión de paquetes SCML con niveles de carga  $OMI_P = 0,5$  y etiqueta  $OMI_L = 0,5$  con  $m_L=0.5$  respectivamente.

### 3.2.3. Estructura 2EOMP-TT.

La figura 3.19 muestra la estructura propuesta 2EOMP-TT. En este caso, la generación del paquete óptico se basa en la estructura por combinación óptica paralela con EOMs y FBG donde la carga es transmitida y la etiqueta es reflejada por la  $FBG_{Tx}$ . Para conseguirlo, la  $FBG_{Tx}$  debe estar desintonizada respecto a la frecuencia angular central del canal SCML  $f_0$ ,  $\Delta f_{Tx} = f_{Bragg} - f_0$ , siendo  $f_{Bragg}$  la frecuencia central de la banda de paso en reflexión de la  $FBG_{Tx}$ . La detección del paquete se realiza por el esquema de prefiltrado óptico con FBG donde la carga es transmitida y la etiqueta es reflejada a través de la  $FBG_{Rx}$ .



**Figura 3.19:** Esquema de la configuración de generación con combinación óptica paralela con carga en transmisión y detección por prefiltrado óptico con carga en transmisión (2EOMP-TT).

Señal detectada	Interferencias del paquete SCML	Parámetro - FBG
Carga	Contribución interferente por el batido de la portadora óptica (OCB).	MSLR - FBGTx
	Contribución de etiqueta banda base modulada sobre la portadora óptica ( $J_0^L$ ) generada por el EOML.	MSLR - FBGTx
	Contribuciones de etiqueta ( $J_k^L$ ) situadas en $\omega_0 + k \cdot \omega_{RF}$ con $k \neq 1$ (SSB-USB) o $k = -1$ (SSB-LSB).	MSLR - FBGTx
	Etiqueta del paquete SCML eliminada ópticamente en recepción. Depende del tipo de etiqueta empleada en el paquete SCML, $J_k^L$ con $k=1$ (SSB-USB) o $k=-1$ (SSB-LSB).	T - FBGRx
Etiqueta	Residuo de carga filtrada que cae sobre la etiqueta en la generación del paquete SCML.	T - FBGTx
	Carga del paquete SCML eliminada ópticamente en recepción.	MSLR - FBGRx

**Tabla 3.12:** Interferencias intracanal del paquete SCML y los parámetros de las FBGs que los elimina en la configuración 2EOMP-TT.

En la tabla 3.12 se indican los parámetros de las FBGs empleadas (T y MSLR) encargados de eliminar las interferencias intracanal SCML en la configuración 2EOMP-TT. El resto de parámetros de la respuesta de de la respuesta de reflexión de las FBGs ( $BW_{3dB}$ , Roll-off,  $\Delta f$ ) se consideran que están diseñados para poder realizar la supresión de interferencias intracanal SCML con T y MSLR inicialmente, deduciendo las expresiones de diseño de los mismos posteriormente en esta sección.

Para esta configuración, las respuestas de reflexión y transmisión ideales de las FBGs en la pulsación angular  $w_0 + kw_{RF}$  están descritas en la siguiente tabla.

Señal	Respuesta FBG	$H_k=H(w=w_0+kw_{RF})$		
Carga	FBG <sub>Tx</sub> en transmisión	$H_{FBG_{Tx,k}}^p$	$\sqrt{1-R_{Tx}}$ , k=1	$\sqrt{1-R_{Tx}/MSLR_{Tx}}$ , k≠1
	FBG <sub>Rx</sub> en transmisión	$H_k^p$	$\sqrt{1-R_{Rx}}$ , k=1	$\sqrt{1-R_{Rx}/MSLR_{Rx}}$ , k≠1
Etiqueta	FBG <sub>Tx</sub> en reflexión	$H_{FBG_{Tx,k}}^L$	$\sqrt{R_{Tx}}$ , k=1	$\sqrt{R_{Tx}/MSLR_{Tx}}$ , k≠1
	FBG <sub>Rx</sub> en reflexión	$H_k^L$	$\sqrt{R_{Rx}}$ , k=1	$\sqrt{R_{Rx}/MSLR_{Rx}}$ , k≠1

**Tabla 3.13:** Valores de las respuestas de reflexión y transmisión de FBGTx y FBGRx a la pulsación angular  $w_0 + kw_{RF}$  en la configuración 2EOMP-TT.

A continuación se van a obtener las ecuaciones de diseño de los parámetros de las FBGs para el caso de la configuración 2EOMP-TT particularizando las expresiones de las penalizaciones deducidas en la sección 3.1.

### Cálculo del parámetro $MSLR_{Tx}$ de la $FBG_{Tx}$ .

El parámetro MSLR de la  $FBG_{Tx}$ ,  $MSLR_{Tx}$ , es el encargado de eliminar los términos de interferencia por OCB y todas las contribuciones de etiqueta excepto el situado en la frecuencia angular  $w_0 + w_{RF}$  o  $w_0 - w_{RF}$  que corresponde con la etiqueta SSB-USB o SSB-LSB a transmitir en el paquete SCML. Al igual que en el resto de configuraciones 2EOMP, la interferencia sobre la carga por OCB puede eliminarse si la implementación de la estructura de generación 2EOMP-TT es tal que  $\Delta\phi_p = k\pi$ . En caso contrario, éste debe ser eliminado a través del parámetro  $MSLR_{Tx}$ . Así pues, la penalización de la apertura el diagrama de ojos de la carga por OCB en esta configuración se obtiene sin más que sustituir las respuestas de las FBGs descritas en la tabla 3.13 en la ecuación 3.7, y de ésta, el parámetro  $MSLR_{Tx}$  necesario para conseguir un valor de  $LOE_P^{OCB}$  en la configuración 2EOMP-TT. Se comprueba que tanto el  $LOE_P^{OCB}$  como el parámetro  $MSLR_{Tx}$  coinciden con el caso de la estructura 2EOMP-TR, descritos a través de las ecuaciones 3.35 y 3.36 respectivamente.

En el caso de eliminar el término de interferencia asociado al OCB en la configuración 2EOMP-TT, la penalización total de la apertura del diagrama de ojos de carga,  $LOE_P$ , (ec. 3.12) queda expresada de la siguiente forma:

$$LOE_p = \frac{C_P \cdot \left[1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right] \cdot \left[1 - \frac{R_{Rx}}{MSLR_{Rx}}\right]}{\left[1 - \frac{R_{Rx}}{MSLR_{Rx}}\right] \cdot \left\{ C_P \left[1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right] - \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 1}}^{\infty} C_{L,k} \left[ \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}} \right] \right\} - C_{L,1} R_{Tx} [1 - R_{Rx}]}$$

(3.55)

y ésta en función de sus contribuciones parciales asociadas a los términos interferentes sobre la carga detectada:

$$\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0,1}}^{\infty} \frac{1}{\Delta LOE_{pL,k}} + \frac{1}{\Delta LOE_{pL,0}} + \frac{1}{\Delta LOE_{pL,1}} = 1 - \frac{1}{LOE_P} \quad (3.56)$$

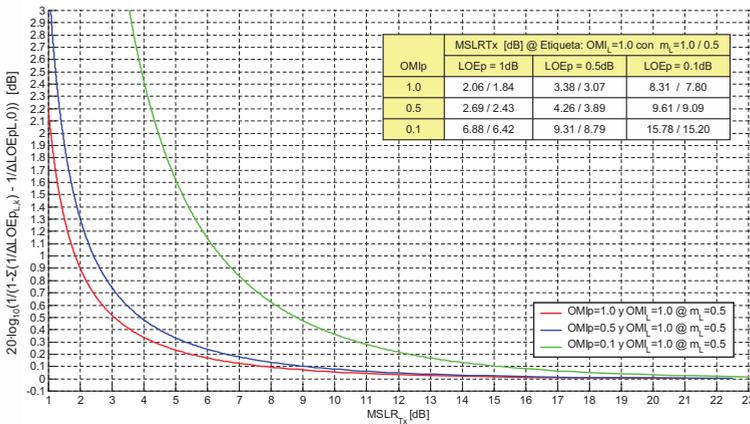
Las contribuciones interferentes de etiqueta situadas en la frecuencia angular  $w_0 + kw_{RF}$ , con  $k \neq 1$  o  $k \neq -1$  para el paquete con etiqueta SSB-USB o SSB-LSB respectivamente, sobre la carga detectada se puede obtener al despejar sus penalizaciones parcial asociadas,  $\Delta LOE_{pL,k}$ , con  $k \neq 1$  o  $-1$  (etiqueta SSB-USB o SSB-LSB) de la total (ec. 3.55). La expresión 3.57 se ha obtenido para el caso de emplear una etiqueta SSB-USB en el paquete (en caso de emplear SSB-LSB, deberemos de excluir en los sumatorios el término de  $k \neq -1$  en lugar de  $k \neq 1$ ). Se comprueba como ésta depende de  $MSLR_{Tx}$ , tal como se había indicado anteriormente.

$$\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0,1_{\omega}-1}}^{\infty} \frac{1}{\Delta LOE_{pL,k}} + \frac{1}{\Delta LOE_{pL,0}} = \frac{\sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 1_{\omega}-1}}^{\infty} C_{L,k} \cdot R_{Tx}}{C_P \cdot [MSLR_{Tx} - R_{Tx}]} \quad (3.57)$$

Despejando  $MSLR_{Tx}$  de la expresión 3.57, obtenemos que éste vale:

$$MSLR_{Tx} = R_{Tx} \cdot \left[ 1 - \frac{D_L^2 \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 1}}^{\infty} \left[ \left( J_k^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_k^{(L=0)} \right)^2 \right]}{2D_P^2 \cdot \sin(\pi \cdot OMI_P/2) \left( \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 0,1}}^{\infty} 1/\Delta LOE_{pL,k} + 1/\Delta LOE_{pL,0} \right)} \right] \quad (3.58)$$

La figura 3.20 muestra la evolución de la penalización parcial asociada a  $\Delta LOE_{pL,k}$ , con  $k \neq 1$  sin OCB en función del parámetro  $MSLR_{Tx}$  y para un paquete SCML con niveles de etiqueta ( $OMI_L = 1$  con  $m_L = 0.5$ ) y carga  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$ . Como se puede comprobar, los niveles de  $MSLR_{Tx}$  requeridos para eliminar este término de distorsión de etiqueta son inferiores a los de OCB.



**Figura 3.20:**  $1/(1 - \sum(1/\Delta LOEP_{L,k}) - 1/\Delta LOEP_{L,0})$  en función de  $MSLR_{Tx}$  y para un paquete SCML con niveles de etiqueta  $OMI_L = 1$  con  $m_L = 0.5$  y carga  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  en la configuración 2EOMP-TT.

### Cálculo del parámetro $T_{Rx}$ de la $FBG_{Rx}$ .

El parámetro T de la  $FBG_{Rx}$ ,  $T_{Rx}$ , va a permitir eliminar la contribución de etiqueta del paquete SCML en la etapa de prefiltrado óptico empleado en la configuración 2EOMP-TT. Cabe recordar que esta etiqueta está localizada en la frecuencia angular  $w_0 + w_{RF}$  o  $w_0 - w_{RF}$  dependiendo de emplear una etiqueta SSB-USB o SSB-LSB en el paquete óptico. El término interferente asociado en la penalización de la apertura del diagrama de ojos de la carga detectada corresponde con  $\Delta LOEP_{L,1}$  para el caso de etiqueta SSB-USB en la ecuación 3.56, que se expresa como:

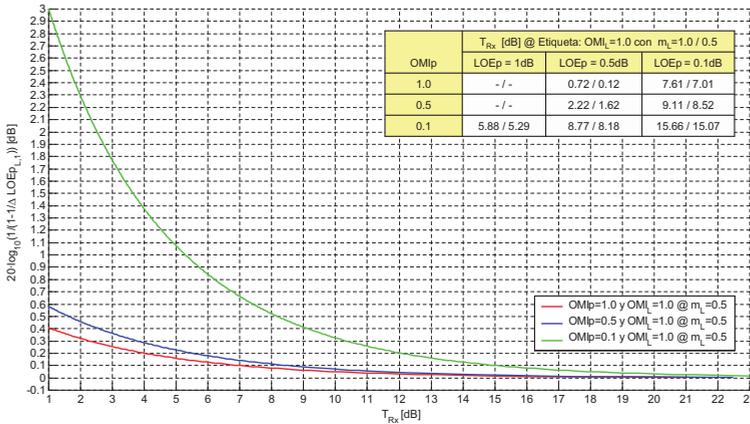
$$\frac{1}{\Delta LOEP_{L,1}} = \frac{C_{L,1} \cdot R_{Tx} \cdot [1 - R_{Rx}]}{C_P \cdot \left[1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right] \cdot \left[1 - \frac{R_{Rx}}{MSLR_{Rx}}\right]} \quad (3.59)$$

y despejando el parámetro  $R_{Rx}$  de la ecuación 3.59, se obtiene que éste vale:

$$R_{Rx} = \frac{1 - \frac{C_P}{C_{L,1}} \cdot \left[\frac{1 - R_{Tx}/MSLR_{Tx}}{R_{Tx}}\right] \cdot \left[\frac{1}{\Delta LOEP_{L,1}}\right]}{1 - \frac{C_P}{C_{L,1}} \cdot \left[\frac{1 - R_{Tx}/MSLR_{Tx}}{R_{Tx}}\right] \cdot \left[\frac{1}{MSLR_{Rx}}\right] \cdot \left[\frac{1}{\Delta LOEP_{L,1}}\right]} \quad (3.60)$$

En caso real, la  $FBG_{Tx}$  está diseñada con  $MSLR_{Tx} \gg 1$  y  $R_{Tx} \approx 1$  (reflejar la etiqueta del paquete un 100% aprox), por lo que  $R_{Tx}/MSLR_{Tx} \approx 0$ . Además, la  $FBG_{Rx}$  suele diseñarse con  $MSLR_{Rx} \gg 1$ , aproximándose al valor ideal de  $R_{Rx}$  y por lo tanto de  $T_{Rx} = 1 - R_{Rx}$ :

$$T_{Rx} = 1 - R_{Rx} = \frac{1}{R_{Tx}} \left[ \frac{D_P^2 \cdot \sin(\pi \cdot OMI_P/2)}{D_L^2 \cdot \left[ \left( J_1^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_1^{(L=0)} \right)^2 \right]} \right] \cdot \left[ \frac{1}{\Delta LOEP_{L,1}} \right] \quad (3.61)$$



**Figura 3.21:**  $1/(1-\Delta LOE_{p_{L,1}})$  en función de  $T_{Rx}$  y para un paquete con niveles de etiqueta  $OMI_L=1$  con  $m_L=0.5$  y carga  $OMI_P=0.1, 0.5$  y  $1.0$  en la configuración 2EOMP-TT.

En la figura 3.21 muestra la evolución de la penalización  $\Delta LOE_{p_{L,1}}$  sin OCB en función del parámetro  $T_{Rx}$  y para un paquete SCML con niveles de etiqueta  $OMI_L = 1$  con  $m_L = 0.5$  y carga  $OMI_P = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  empleando la configuración 2EOMP-TT. También se indican los valores de  $T_{Rx}$  necesarios para que esta contribución en la penalización total sea de  $0.1, 0.5$  y  $1.0$  dB. Se ha de destacar que el parámetro  $T_{Rx}$  en la configuración 2EOMP-TT es equivalente al  $MSLR_{Rx}$  de la configuración 2EOMP-TR, tal como se muestran sus ecuaciones de diseño 3.61 y 3.43, así como gráficas de evaluación de sus contribuciones en la penalización de carga 3.21 y 3.13 respectivamente. Por último, cabe mencionar que este estudio se realiza de igual forma en el caso de tener una etiqueta SSB-LSB en el paquete. En tal caso, se ha de extraer el término  $\Delta LOE_{p_{L,-1}}$  en la ecuación 3.56, obteniendo una ecuación de analítica de diseño para  $T_{Rx}$  equivalente al caso de etiqueta SSB-USB (ec. 3.61).

### Cálculo del parámetro $MSLR_{Rx}$ de la $FBG_{Rx}$ .

El parámetro MSLR de la  $FBG_{Rx}$ ,  $MSLR_{Rx}$  permitirá eliminar ópticamente la contribución de carga del paquete SCML en la etapa de prefiltrado óptico de la configuración 2EOMP-TT. La expresión de diseño de éste puede deducirse de la penalización de la apertura del diagrama de ojos de etiqueta detectada,  $LOE_L$ , (ec. 3.17) sin más que particularizarla con los valores de las FBGs descritos en la tabla 3.13 y despejando el parámetro  $MSLR_{Rx}$ . Como resultado se obtiene la siguiente expresión:

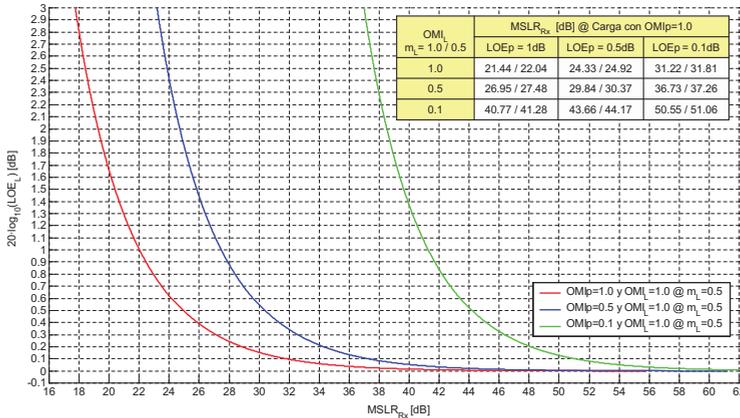
$$MSLR_{Rx} = \frac{1}{R_{Tx}} \cdot \left[ \frac{C_P \cdot \left(1 - \frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right)}{C_{L,1} \cdot \left(1 - \frac{1}{LOE_L}\right)} - \sum_{\substack{k=-\infty \\ k \neq 1}}^{\infty} \frac{C_{L,k}}{C_{L,1}} \cdot \left(\frac{R_{Tx}}{MSLR_{Tx}}\right) \right] \quad (3.62)$$

En condiciones reales, la  $FBG_{Tx}$  está diseñada con  $MSLR_{Tx} \gg 1$  y  $R_{Tx} \approx 1$  (reflejar la etiqueta del paquete un 100% aprox), por lo que podemos utilizar la aproximación  $R_{Tx}/MSLR_{Tx} \approx 0$  en la ecuación 3.62. Bajo estas condiciones, la expresión de diseño del

parámetro  $MSLR_{Rx}$  se aproxima al caso ideal de:

$$MSLR_{Rx} \approx \frac{1}{R_{Tx}} \cdot \frac{2D_P^2 \cdot \sin(\pi \cdot OMI_P/2)}{\left[ \left( J_1^{(L=1)} \right)^2 - \left( J_1^{(L=0)} \right)^2 \right] \cdot [1 - 1/LOE_L]} \quad (3.63)$$

En la figura 3.21 muestra la evolución de la penalización  $LOE_L$  sin OCB en función del parámetro  $MSLR_{Rx}$  y para un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_P=1$  y etiqueta  $OMI_L=0.1, 0.5$  y  $1.0$  con  $m_L=0.5$  empleando la configuración 2EOMP-TT. También se indican los valores de  $MSLR_{Rx}$  requeridos para que  $LOE_L$  sea de  $0.1, 0.5$  y  $1.0$  dB. Se ha de destacar que el parámetro  $MSLR_{Rx}$  en la configuración 2EOMP-TT es equivalente al  $T_{Rx}$  de la configuración 2EOMP-TR, tal como se muestran sus ecuaciones de diseño 3.63 y 3.46, así como gráficas de evaluación de sus contribuciones en la penalización de etiqueta 3.22 y 3.14 respectivamente.



**Figura 3.22:**  $LOE_L$  en función de  $MSLR_{Rx}$  y para un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_P=1$  y etiqueta  $OMI_L=0.1, 0.5$  y  $1.0$  con  $m_L=0.5$  en la configuración 2EOMP-TT.

El resto de parámetros de las respuestas de las FBGs utilizadas en la configuración 2EOMP-TT van a ser obtenidos a partir de las penalizaciones de la apertura de los diagramas de ojos de carga y etiqueta cuando se incluyen la forma de los filtros reales y que afectan sobre la forma de los pulsos de las señales detectadas. Para ello se hará uso de la fotocorriente deducida en la ecuación 2.50 del capítulo 2 a para obtener dichas penalizaciones. Concretamente, se debe obtener los valores del  $f_{Bragg}$ ,  $BW_{3dB}$ , Rolloff y T de la  $FBG_{Tx}$ , así como el  $f_{Bragg}$ ,  $BW_{3dB}$ , Rolloff y T de la  $FBG_{Rx}$ . Se va a comenzar determinando los parámetros mencionados de la  $FBG_{Tx}$ , así como el  $BW_{3dB}$  y Rolloff de la  $FBG_{Rx}$ , utilizando los valores de  $MSLR_{Tx}$ ,  $T_{Rx}$  y  $MSLR_{Rx}$  calculados previamente mediante las expresiones analíticas 3.58, 3.61 y 3.63 respectivamente.

### Cálculo de los parámetros $\Delta f_{Tx}$ , $BW_{3dB}$ , Rolloff y T de la $FBG_{Tx}$ .

Los parámetros de desintonía,  $\Delta f_{Tx}$ , ancho de la banda de paso de la respuesta de reflexión,  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}$  y Rolloff,  $Rolloff_{FBG_{Tx}}$ , de la  $FBG_{Tx}$  coinciden con los obtenidos

en la 2EOMP-RT (ec. 3.47, 3.49 y 3.51 respectivamente), ya que se emplea la misma configuración de la  $FBG_{Tx}$  en la generación del paquete óptico.

El parámetro  $T$  de la  $FBG_{Tx}$ ,  $T_{Tx}$ , tiene la misión de eliminar las componentes frecuenciales de la carga que se localizan sobre la etiqueta del paquete SCML durante el proceso de generación del mismo. En la determinación del parámetro  $T_{Tx}$  hay que tener en cuenta que además de la penalización de la etiqueta por las frecuencias de carga que caen cerca de la etiqueta comentadas y que no son eliminadas en recepción, está directamente relacionado con el porcentaje de etiqueta reflejada a través de la  $FBG_{Tx}$ . Por tanto interesará que  $T_{Tx}$  sea tal que refleje casi el 100 % de la etiqueta ( $T_{Tx} \approx -20$ dB corresponde con una reflexión de la etiqueta a través de la  $FBG_{Tx}$  de 99.99%). En la tabla 3.14 se indican los valores del coeficiente de transmisión  $T_{Tx}$  necesarios para conseguir una penalización de la apertura del diagrama de ojos de la etiqueta,  $LOE_L = 0.1, 0.5$  y  $1.0$  dB para dos casos de interés. El primero corresponde con un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_P=0.5$  y etiqueta  $OMI_L=0.5$  con  $m_L=0.5$ , donde la penalización de etiqueta  $LOE_L$  está limitada por el porcentaje de ésta que es reflejada en la  $FBG_{Tx}$ , y cuantificada con  $T_{Tx} = 1 - R_{Rx}$ . Por lo tanto, es necesario que  $T_{Tx}=-20.5$ dB para que  $LOE_L$  sea menor de  $0.1$  dB. El segundo caso mostrado corresponde con un paquete SCML con nivel de carga  $OMI_P=1$  y etiqueta  $OMI_L=0.1$  con  $m_L=0.5$ , donde la penalización de etiqueta  $LOE_L$  se encuentra limitado por la interferencia de las componentes de carga localizadas sobre la etiqueta del paquete y eliminadas con  $T_{Tx}$  en la generación del mismo. En este caso, será necesario un valor de  $T_{Tx}=-32$ dB para que dicha penalización sobre la etiqueta sea menor de  $0.1$ dB.

Paquete SCML		- $T_{Tx}$ [dB]		
OMI <sub>p</sub>	OMI <sub>L</sub> con $m_L=0.5$	LOE <sub>p</sub> = 1dB	LOE <sub>p</sub> = 0.5dB	LOE <sub>p</sub> = 0.1dB
0.5	0.5	10.0	13.0	20.5
1.0	0.1	14.5	18.5	32.0

**Tabla 3.14:** Valores de  $T_{Tx}$  necesarios para conseguir una  $LOE_L = 0.1, 0.5$  y  $1$ dB en la configuración 2EOMP-TT

### Cálculo de los parámetros $\Delta f_{Rx}$ , $BW_{3dB}$ y Rolloff de la $FBG_{Rx}$ .

La  $FBG_{Rx}$  se encarga de separar las señales del paquete SCML transmitiendo la carga y reflejando la etiqueta en la misma empleando la configuración 2EOMP-TT. Para conseguirlo, el ancho de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ ,  $BW_{3dB-FBG_{Rx}}$ , se puede expresar como:

$$BW_{3dB-FBG_{Rx}} = f_{\max\_BW_{3dB-FBG_{Rx}}} - f_{\min\_BW_{3dB-FBG_{Rx}}} \quad (3.64)$$

donde los límites inferior,  $f_{\min\_BW_{3dB-FBG_{Rx}}}$ , y superior,  $f_{\max\_BW_{3dB-FBG_{Rx}}}$ , del mismo deben cumplir los siguientes requisitos:

1. La frecuencia inferior de la banda de paso de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe elegirse para que sea menor de la frecuencia  $f_{RF} - BR_L$  respecto a la central del canal SCML. De esta forma, el recorte de las frecuencias bajas de etiqueta modulada sobre la portadora de radiofrecuencia no van a degradar la calidad de la etiqueta

una vez detectada. Además, también cumplirse que la carga del paquete SCML, y que interfiere a la etiqueta detectada, sea suprimido  $MSLR_{Rx}$  [dB] en el proceso de detección por prefiltrado óptico con la  $FBG_{Rx}$ , tal como se ha estudiado anteriormente. A partir de estas premisas, la frecuencia  $f_{\min_{BW}3dB_{FBGRx}}$  debe cumplir la siguiente relación:

$$f_0 + BR_P + \frac{3}{\text{Rollof}f_{FBGT_x}} + \frac{MSLR_{Rx} - 3}{\text{Rollof}f_{FBGRx}} \leq f_{\min_{BW}3dB_{FBGRx}} \leq f_0 + f_{RF} - BR_L \quad (3.65)$$

Se ha de puntualizar que la  $FBG_{Rx}$  debe tener el diseño de los parámetros  $MSLR_{Rx}$  y  $\text{Rollof}f_{FBGRx}$  de forma que asegure que  $f_{\min_{BW}3dB_{FBGRx}}$  sea menor que el límite  $f_{RF} - BR_L$ .

2. La frecuencia superior de la banda de paso de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe encargarse de no eliminar las frecuencias superiores de la etiqueta modulada sobre la portadora de radiofrecuencia  $f_{RF}$  que originarían la degradación de la calidad de la etiqueta detectada. Concretamente, se puede expresar en función de  $f_{RF}$  y de la tasa de transmisión de etiqueta,  $BR_L$ , tal como se indica en la siguiente expresión:

$$f_{\max_{BW}3dB_{FBGRx}} \geq f_0 + f_{RF} + BR_L \quad (3.66)$$

La  $FBG_{Rx}$  debe estar desintonizada respecto a la portadora óptica del canal SCML para poder realizar correctamente el prefiltrado óptico propuesto en la configuración 2EOMP-TT. En concreto, dicha desintonía,  $\Delta f_{Rx}$ , se obtiene a partir de los valores inferior y superior de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  calculados en 3.65 y 3.66, tal como se indica en la siguiente expresión:

$$\Delta f_{Rx} = (f_{\min_{BW}3dB_{FBGRx}} + f_{\max_{BW}3dB_{FBGRx}})/2 \quad (3.67)$$

Por último, el Rolloff de la  $FBG_{Rx}$ ,  $\text{Rollof}f_{FBGRx}$ , en la configuración 2EOM-TT deber cumplir las siguientes premisas:

1. La respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  debe suprimir  $MSLR_{Rx}$  [dB] la contribución de carga del paquete sin que degrade la carga una vez sea detectada tras transmitirse por la  $FBG_{Rx}$ . Para conseguirlo, la frecuencia del límite inferior de la pendiente de la banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$ , utilizado para determinar el  $\text{Rollof}f_{FBGRx}$ , debe ser como mínimo  $f_0 + BR_P + 3/\text{Rollof}f_{FBGT_x}$ , tal como se explicó en el cálculo del  $BW_{3dB-FBGT_x}$ .
2. La respuesta de reflexión debe filtrar la etiqueta sin recortar las frecuencias bajas de la etiqueta modulada sobre la portadora de radiofrecuencia, tal como se explicó al calcular la  $f_{\min_{BW}3dB_{FBGRx}}$ .

Como resultado se deduce la siguiente expresión del  $\text{Rollof}f_{FBGRx}$ :

$$\text{Rollof}f_{FBGRx} \geq \frac{MSLR_{Rx} - 3}{f_{\min_{BW}3dB_{FBGRx}} - f_0 - BR_P - 3/\text{Rollof}f_{FBGT_x}} \quad (3.68)$$

y substituyendo el valor de  $\text{Rollof}f_{FBGT_x}$  (ec.3.51) de la  $FBG_{Tx}$  en 3.68, se obtiene:

$$\text{Rollof}f_{FBGRx} \geq \frac{MSLR_{Rx} - 3}{f_{\min_{BW}3dB_{FBGRx}} - f_0 - BR_P \left[ 1 + \frac{3}{MSLR_{Tx-3}} \right] + \frac{3 \cdot BR_L}{MSLR_{Tx-3}}} \quad (3.69)$$

En el caso de elegir una  $FBG_{Rx}$  con el ancho de banda menor posible,  $f_{\min\_BW3dB\_FBGRx} = f_0 + f_{RF} - BR_L$ , éste puede expresarse como:

$$\text{Rollof } f_{FBGRx} \geq \frac{MSLR_{Rx} - 3}{f_{RF} - BR_P [1 + 3/(MSLR_{Tx} - 3)] - BR_L [1 - 3/(MSLR_{Tx} - 3)]} \quad (3.70)$$

### Tabla resumen de diseño de $FBG_{Tx}$ y $FBG_{Rx}$ con la configuración 2EOMP-TT.

En la sección 3.2.3 se han diseñado cada uno de los parámetros (T, MSLR,  $BW_{3dB}$ , Rolloff) empleados en el diseño de las  $FBG_{Tx}$  y  $FBG_{Rx}$  en la configuración 2EOMP-TT, estableciendo unas ecuaciones de diseño que permitan cuantificar cada una de las distorsiones existentes entre las señales del paquete una vez sean detectadas. A continuación, se indica los valores de dichos parámetros para dos casos de interés. La tabla 3.15 muestra el caso más desfavorable posible, donde los índices de modulación ópticos de cada una de las señales del paquete pueden tomar valores entre 0.1 y 1.0. En este caso, se calculado el valor de cada parámetro considerando el valor máximo del nivel de la señal interferente ( $OMI_{interferente}=1.0$ ) y el nivel mínimo de la señal a detectar ( $OMI_{detectar}=0.1$ ) para una penalización de la apertura del diagrama de ojos de la señal a detectar inferior a 0.1dB ( $\approx 1,16\%$ ).

Parámetros de la FBG	FBGTx	FBGRx
BW3dB (mínimo)	1.2 · BRp	2.0 · BR <sub>L</sub>
Desintonía: $ \Delta f_{FBG}  =  f_{BRAGG} - f_0 $ [GHz]	1.6 · BRp	$f_{RF}$
T [dB] (mínimo)	-32	-15.07 (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de la carga en la FBGRx)
MSLR [dB] (mínimo)	18.34 (sin OCB) o 60.93 (con OCB) (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de la carga en la FBGTx)	51.06
Rolloff [dB/GHz] (mínimo)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s y BR <sub>L</sub> =625Mb/s => 1.64 (sin OCB) o 6.18 (con OCB)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s y BR <sub>L</sub> =625Mb/s, $f_{RF}$ =18GHz => 8.67 (sin OCB) o 6.97 (con OCB)

**Tabla 3.15:** Parámetros de las FBGs empleadas en la configuración 2EOMP-TT y un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_P \in [0,1,1,0]$  y etiqueta  $OMI_L \in [0,1,1,0]$  con  $m_L=0.5$  respectivamente.

En la tabla 3.16 se ha realizado lo mismo pero en este caso los índices de modulación ópticos de ambas señales del paquete valen 0.5.

Parámetros de la FBG	FBGTx	FBGRx
BW3dB (mínimo)	1.05 · BRp (ver expresión, limitado la fmax por recorte etiqueta)	2.0 · BR <sub>L</sub>
Desintonía: $ \Delta f_{FBG}  =  f_{BRAGG} - f_0 $ [GHz]	1.525 · BRp	$f_{RF}$
T [dB] (mínimo)	-5 (por interferencia de la carga) o -20.5 (reflectividad de etiqueta 100%)	-3.07 (este parámetro debe ser mayor de 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de la carga en la FBGRx)
MSLR [dB] (mínimo)	4.87 (sin OCB) o 47.17 (con OCB) (este parámetro debe valer 20dB aprox si se desea transmitir el 100% de la carga en la FBGTx)	35.76
Rolloff [dB/GHz] (mínimo)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s y BR <sub>L</sub> =625Mb/s => 0.20 (sin OCB) o 4.71 (con OCB)	Ver expresión Ejemplo: BRp=10Gb/s y BR <sub>L</sub> =625Mb/s, $f_{RF}$ =18GHz => 5.72 (sin OCB con MSLR <sub>Tx</sub> =20dB) o 4.86 (con OCB)

**Tabla 3.16:** Parámetros de las FBGs empleadas en la configuración 2EOMP-TT y un paquete SCML con niveles de carga  $OMI_P = 0,5$  y etiqueta  $OMI_L = 0,5$  con  $m_L=0.5$  respectivamente.

### 3.3. Conclusiones.

En la sección 2.2 del capítulo 2 se propuso el modelo matemático para la estructura de combinación óptica paralela con FBG en la generación del paquete SCML y prefiltrado óptico con FBG en la detección del mismo (referenciado en este documento con las siglas 2EOMP). También se propusieron tres configuraciones de interés del esquema 2EOMP en función de la configuración de las FBGs empleadas.

Este capítulo se ha dedicado a la obtener las características de las FBGs empleadas en el esquema 2EOMP. Para conseguirlo se ha realizado los siguientes pasos:

- Determinación de las penalizaciones de la apertura del diagrama de ojos de carga y etiqueta para la estructura 2EOMP, diferenciando la contribución sobre las mismas asociadas al batido de la portadora óptica de las asociadas a las interferencias existentes entre las señales de carga y etiqueta del paquete.
- Se ha determinado los parámetros de las FBGs encargado de eliminar las distorsiones existentes en el paquete SCML para las tres configuraciones propuestas de la estructura 2EOMP.
- Se han determinado las ecuaciones de diseño de los parámetros de interés en las respuestas de transmisión y reflexión de las FBGs empleadas ( $T$ ,  $MSLR$ ,  $\Delta f$ ,  $BW_{3dB}$  y Rolloff) de forma que permitan eliminar las distorsiones existentes en el paquete SCML en las tres configuraciones propuestas del esquema 2EOMP.
- Se ha obtenido los valores dichos parámetros para casos dos casos de interés del paquete SCML: cuando los niveles de carga y etiqueta son del 50% y para el caso en que el rango de los niveles de ambas señales sea del 10% al 100%.



## Capítulo 4

# Compactación espectral del paquete SCML en la estructura de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con FBGs.

El uso eficiente del ancho de banda disponible en las actuales redes ópticas está siendo centro de estudio en los últimos años. En el caso de redes ópticas implementadas con tecnología SCML la eficiencia espectral es crucial, ya que el ancho espectral necesario dependerá de las velocidades de transmisión de las informaciones de carga y etiqueta transmitidas, así como de la frecuencia de la subportadora empleada para transmitir la etiqueta. Se han propuesto diversas estrategias que van desde el empleo de modulaciones eficientes desde el punto de vista espectral [41], [42], dispositivos que permitan reducir el ancho de banda requerido [43], [44], etc. Se ha propuesto el uso de la banda lateral vestigial para conseguir reducir el ancho de banda necesario directamente en el dominio óptico [45]. Esto suscita la posibilidad de emplear las redes de difracción de Bragg de la estructura de combinación óptica paralela, encargadas de combinar las señales de carga y etiqueta, de forma que permitan conformar el paquete óptico SCML eficientemente desde el punto de vista espectral.

Este capítulo se centra en el estudio del ancho de banda requerido del paquete óptico así como estrategias que permitan reducirlo en los sistemas SCML. Para ello, primeramente se define un parámetro relacionado con el grado de compactación espectral de los paquetes ópticos con tecnología SCML, siendo analizado para las tres configuraciones de la estructura de combinación óptica paralela (2EOMP) y detección con prefiltrado óptico basada en FBG. Posteriormente se proponen estrategias de mejora de la compactación espectral del paquete óptico en la estructura 2EOMP variando las características de ancho de banda y desintonía de las FBGs empleadas.

### 4.1. Compactación espectral del paquete SCML en la estructura 2EOMP.

El paquete óptico con tecnología SCML transmite la información de enrutado óptico (etiqueta) del mismo modulada sobre una subportadora de radiofrecuencia ( $f_{RF}$ ) y multiplexada en frecuencia junto a la información del paquete (carga) situada en banda base.

La anchura espectral del paquete óptico SCML depende de las tasas de transmisión de la información de la carga ( $BR_P$ ) y etiqueta ( $BR_L$ ) y del valor de la subportadora de radiofrecuencia empleada para multiplexar la etiqueta sobre la carga en el paquete (ver figura 4.1). Es por ello importante determinar el valor de la frecuencia de la subportadora  $f_{RF}$  que consiga minimizar el ancho espectral requerido del paquete.

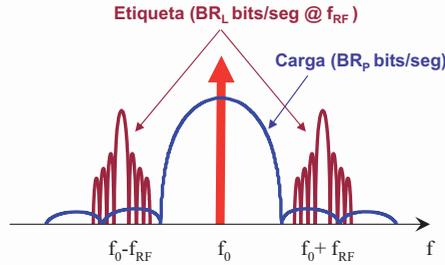


Figura 4.1: Espectro del paquete óptico SCML.

Para ello, se define el parámetro figura de mérito espectral del paquete SCML (FOM, Figure Of Merit), que permite cuantificar el grado de compactación espectral del paquete óptico:

$$FOM = \frac{BR_P}{f_{RF}} \quad (4.1)$$

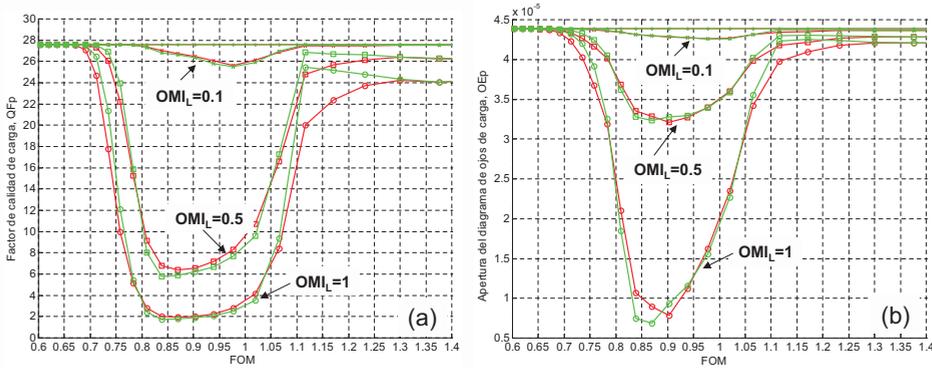
A partir de la definición anterior se puede maximizar dicho parámetro diseñando determinados componentes del sistema SCML (EOM, FBG, etc) de forma que se consiga:

- El máximo valor de la tasa de transmisión de la carga del paquete óptico en el sistema.
- El mínimo valor de la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia de etiqueta ( $f_{RF}$ ) sin que exista interferencia entre las señales de carga y etiqueta del paquete óptico.

A continuación se procede a estudiar la compactación espectral de los paquetes SCML para las tres configuraciones de la estructura 2EOMP propuestas en el capítulo 2 de esta tesis. Cabe puntualizar que en este estudio se emplearán los valores óptimos de los parámetros de las respuestas de las FBGs utilizadas en dichas estructuras 2EOMP a partir de las ecuaciones de diseño obtenidas en el capítulo 3, de forma que no existan penalizaciones iniciales en la calidad de las señales de carga y etiqueta del paquete óptico detectadas cuando la frecuencia de la subportadora de la etiqueta está muy alejada del rango espectral ocupado por la carga en el paquete óptico. Concretamente, este estudio va a consistir en observar como evolucionan los parámetros de calidad (QF y OE) de las señales de carga y etiqueta, así como sus penalizaciones, en función del parámetro FOM conforme varía la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta,  $f_{RF}$ , y una tasa de transmisión de carga,  $BR_P$ , fija. Existen otros parámetros de interés del paquete SCML (tasa de transmisión de etiqueta  $BR_L$  y niveles de las señales de carga  $OMI_P$  y etiqueta  $OMI_L$ ) que también van a influir en el grado de compactación del paquete, por lo que será necesario incluirlos en el estudio.

En primer lugar se va a comenzar con el estudio del grado de compactación espectral del paquete SCML para la estructura 2EOMP-RR. En la figura 4.2 se muestran el

factor de calidad y la apertura del diagrama de ojos de la señal de carga detectada en función del parámetro de compactación espectral del paquete FOM. Cabe recordar que el parámetro FOM se ha obtenido de la ecuación 4.1 variando la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia con una tasa de transmisión de carga de 10Gb/s. En este estudio se ha empleado paquetes SCML con carga ( $BR_P=10\text{Gb/s}$ , NRZ,  $OMI_P=0.1$ ) y varias configuraciones de etiqueta con tasa de transmisión  $BR_P/BR_L=BR_P/x$ , con  $x = 4$  y 16, y nivel  $OMI_L = 0, 0.1, 0.5$  y 1 con  $m_L=0.5$ . Se han empleado la siguiente configuración para las FBGs:  $FBG_{Tx}$  ( $BW_{3dB}=2\cdot BR_P$ , Rolloff=4dB/GHz, T=-25dB, MSLR=25dB) y  $FBG_{Rx}$  ( $BW_{3dB}=2.5\cdot BR_P$ , Rolloff=9dB/GHz, T=-50dB,MSLR=25dB).

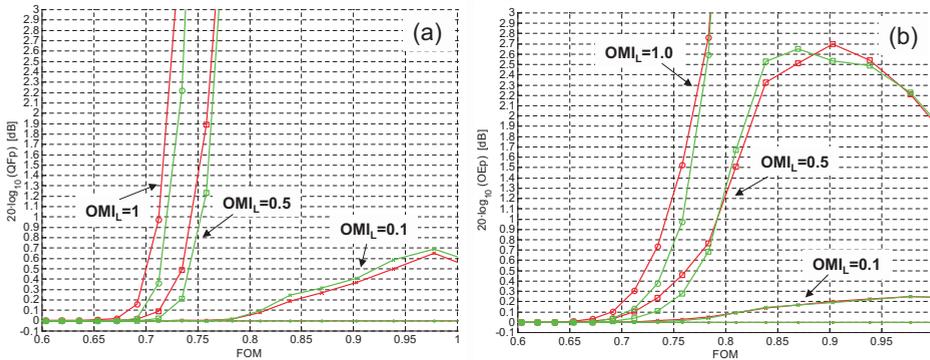


**Figura 4.2:** (a) Factor de calidad y (b) apertura del diagrama de ojos de la carga detectada en función de FOM para paquetes SCML con carga ( $BR_P=10\text{Gb/s}$  y  $OMI_P=0.1$ ) y etiqueta ( $BR_L, OMI_L=0, 0.1, 0.5$  y 1.0) con  $m_L=0.5$ , donde  $BR_P/BR_L = 4$  (rojo) y 16 (verde) con la configuración 2EOMP-RR.

En la figura 4.2 se comprueba que la calidad de la carga (QFp y OEp) depende del valor concreto de FOM empleado y que está relacionado con la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia donde es modulada la etiqueta, tal como era de esperar. Concretamente, la degradación de la calidad de la carga se debe a la interferencia de la etiqueta sobre ésta primera de la siguiente forma:

- Cuando  $f_{RF}$  es menor a la mitad del ancho de banda de la  $FBG_{Rx}$  pero mayor que el de la  $FBG_{Tx}$  ( $BR_P/(BW_{3dB-FBG_{Tx}}/2) \geq FOM \geq BR_P/(BW_{3dB-FBG_{Rx}}/2)$ ), la etiqueta es reflejada por la  $FBG_{Rx}$  cuando en principio únicamente debería transmitirse por la  $FBG_{Rx}$ , tal como se ha propuesto en la estructura 2EOMP-RR. Como consecuencia de este hecho, la etiqueta va a interferir sobre la carga reflejada por la  $FBG_{Rx}$ . Esto se puede observar para valores bajos de FOM.
- Cuando  $f_{RF}$  es menor a la mitad del ancho de banda de la  $FBG_{Tx}$  ( $FOM \geq BR_P/(BW_{3dB-FBG_{Tx}}/2)$ ), la etiqueta es reflejada por la  $FBG_{Tx}$ , eliminándose ésta en la generación del paquete SCML según la estructura 2EOMP-RR donde la etiqueta es transmitida por la  $FBG_{Tx}$ . Por tanto, la interferencia de la etiqueta sobre la carga desaparece al eliminarse la etiqueta del paquete. En realidad esta distorsión no desaparece totalmente ya que hay componentes de etiqueta situadas a  $f_0 \pm k f_{RF}$ , con  $k > 1$ , que interfieren sobre la carga ya que se encuentran en el rango de frecuencias entre  $BW_{3dB-FBG_{Rx}}/2$  y  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}/2$ . Esto se observa para valores altos de FOM.
- La interferencia de la etiqueta sobre la carga depende de los niveles de ambas.

Por tanto, se puede obtener el valor de FOM que proporcione la máxima compactación espectral del paquete para una cota en penalización de carga. En la figura 4.3 se muestran las penalizaciones del factor de calidad y apertura del diagrama de ojos de carga en función del FOM respecto al caso de transmitir únicamente carga en el paquete. Se observa como la penalización de la calidad de la carga es prácticamente independiente de la tasa de transmisión de etiqueta ( $BR_L$ ) pero sí depende de los niveles de carga y etiqueta utilizados en el paquete SCML. En la tabla 4.2 se muestran los valores del parámetro FOM que va a producir una penalización  $LQF_P$  y  $LOE_P$  de 0.1, 0.5 y 1dB. Se comprueba como estas penalizaciones son prácticamente independientes de la tasa de transmisión de etiqueta  $BR_L$ . Así pues, para una  $LOE_P=1$ dB y con los niveles del paquete más críticos desde el punto de vista de calidad de carga detectada ( $OMI_P=0.1$  y  $OMI_L=1$ ), obtenemos un valor aproximado de  $FOM=0.75$ , que equivale a una  $f_{RF}$  de 13.33 GHz con  $BR_P=10$ Gb/s.

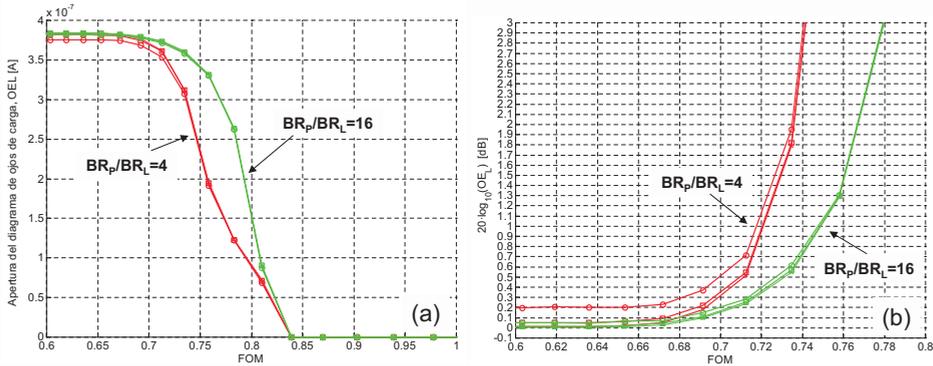


**Figura 4.3:** Penalizaciones del factor de calidad,  $LQF_P$ , y apertura del diagrama de ojos,  $LOE_P$ , de la carga detectada en función de FOM para paquetes SCML con carga ( $BR_P=10$ Gb/s y  $OMI_P=0.1$ ) y etiqueta ( $BR_L$ ,  $OMI_L=0, 0.1, 0.5$  y  $1.0$  con  $m_L=0.5$ ), donde  $BR_P/BR_L = 4$  (rojo) y  $16$  (verde) con la configuración 2EOMP-RR.

Paquete SCML				FOM						
BRp/BRL	OMIp	OMIL	QFp (max)	LQFp=0.1dB	LQFp=0.5dB	LQFp=1.0dB	OEp (max)	LOEp=0.1dB	LOEp=0.5dB	LOEp=1.0dB
4	0,1	0,1	27,606	0,816043	0,939263	---	4,3849E-05	0,816043	---	---
4	0,1	0,5	27,606	0,712909	0,734829	0,743248	4,3849E-05	0,712350	0,761956	0,791852
4	0,1	1,0	27,606	0,683404	0,700266	0,712909	4,3849E-05	0,690680	0,722552	0,742641
8	0,1	0,1	27,606	0,813121	0,928698	---	4,3849E-05	0,816043	---	---
8	0,1	0,5	27,606	0,719689	0,739616	0,750000	4,3849E-05	0,729517	0,768402	0,791162
8	0,1	1,0	27,606	0,694908	0,713470	0,718550	4,3849E-05	0,701890	0,737814	0,753735
16	0,1	0,1	27,606	0,810942	0,922097	---	4,3849E-05	0,814579	---	---
16	0,1	0,5	27,606	0,721404	0,741428	0,752486	4,3849E-05	0,731868	0,771667	0,791852
16	0,1	1,0	27,606	0,696507	0,714030	0,720260	4,3849E-05	0,705708	0,739616	0,758773
64	0,1	0,1	27,606	0,803765	0,912829	---	4,3849E-05	0,815311	---	---
64	0,1	0,5	27,606	0,719119	0,740219	0,751863	4,3849E-05	0,734235	0,771667	0,791162
64	0,1	1,0	27,606	0,695440	0,714030	0,719689	4,3849E-05	0,706806	0,740219	0,759407

**Tabla 4.1:** Valores de FOM para penalizaciones del (a) factor de calidad,  $LQF_P$ , y (b) apertura del diagrama de ojos,  $LOE_P$ , de la carga detectada igual a 0.1, 0.5 y 1dB empleando paquetes SCML con carga ( $BR_P=10$ Gb/s y  $OMI_P=0.1$ ) y etiqueta ( $BR_L$ ,  $OMI_L=1.0$  con  $m_L=0.5$ ), donde  $BR_P/BR_L = 4, 8, 16$  y  $64$  con la configuración 2EOMP-RR.

En la figura 4.4 se obtiene la calidad de la etiqueta del paquete SCML empleada con la configuración 2EOMP-RR en función del parámetro FOM. Se comprueba como la apertura del diagrama de ojos de etiqueta va disminuyendo conforme aumenta FOM, que corresponde con una disminución de la frecuencia de subportadora de radiofrecuencia de etiqueta,  $f_{RF}$ . Disminución, que se materializa en una penalización  $LOEL$  debida a la supresión de ésta por el filtrado con la  $FBG_{Rx}$  cuando  $f_{RF}$  se aproxima al flanco de la banda eliminada de la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Rx}$ . Esto se corrobora al observar que dicha penalización es independiente de transmitir o no carga en el paquete (ver  $OMI_P = 0$  y  $OMI_P \neq 0$  en la gráfica 4.4(b)), pero sí de la tasa de transmisión de la señal de etiqueta,  $BR_L$ , siendo mayor la penalización cuando  $BR_L$  es mayor. En la tabla 4.1 se han obtenido los valores de FOM que originan una  $LOEL=0, 0.1, 0.5$  y 1dB. Se comprueba que los valores de FOM para una penalización de etiqueta son más restrictivos que para la misma penalización de carga. Esto es debido a la forma en que es utilizada la  $FBG_{Rx}$  en la estructura 2EOMP-RR, donde la etiqueta es transmitida por la  $FBG_{Rx}$ , siendo más abrupta el flanco de la banda eliminada que su correspondiente en reflexión, y por tanto afectando mucho más a la etiqueta del paquete óptico.



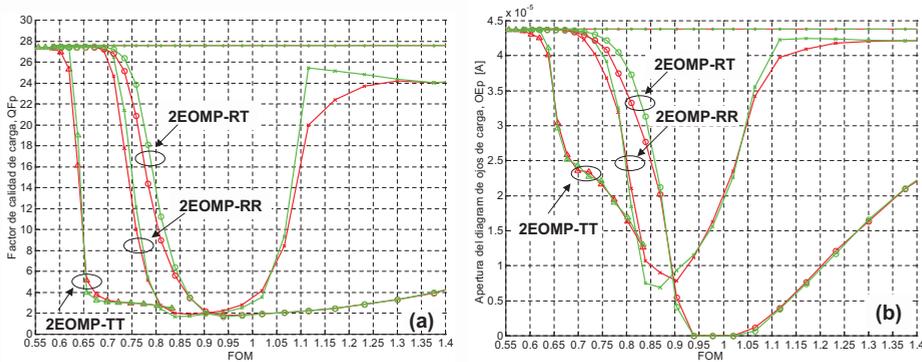
**Figura 4.4:** (a) Apertura del diagrama de ojos,  $OE_L$ , y (b) penalización de la misma,  $LOEL$ , de la etiqueta detectada en función de FOM para paquetes SCML con carga ( $BR_P=10\text{Gb/s}$  y  $OMI_P=0, 0.1$  ( $\cdot$ ),  $0.5$ (cuadrado) y  $1$ (o)) y etiqueta ( $BR_L, OMI_L=0.1$  con  $m_L=0.5$ ), donde  $BR_P/BR_L = 4$  (rojo) y  $16$  (verde) con la configuración 2EOMP-RR.

Paquete SCML			FOM							
$BR_P/BR_L$	$OMI_P$	$OMI_L$	QFL (max)	LQFL=0.1dB	LQFL=0.5dB	LQFL=1.0dB	OE_L (max)	LOEL=0.1dB	LOEL=0.5dB	LOEL=1.0dB
4	1.0	0.1	28,484	0,588235	0,724859	0,726598	3,8432E-07	0,588235	0,699188	0,717415
8	1.0	0.1	28,467	0,592843	0,768402	0,769053	3,8433E-07	0,588235	0,719689	0,741428
16	1.0	0.1	28,469	0,588235	0,795319	0,796714	3,8433E-07	0,679315	0,727180	0,747531
64	1.0	0.1	26,758	0,812393	0,812393	0,812393	3,8442E-07	0,688064	0,730103	0,748147

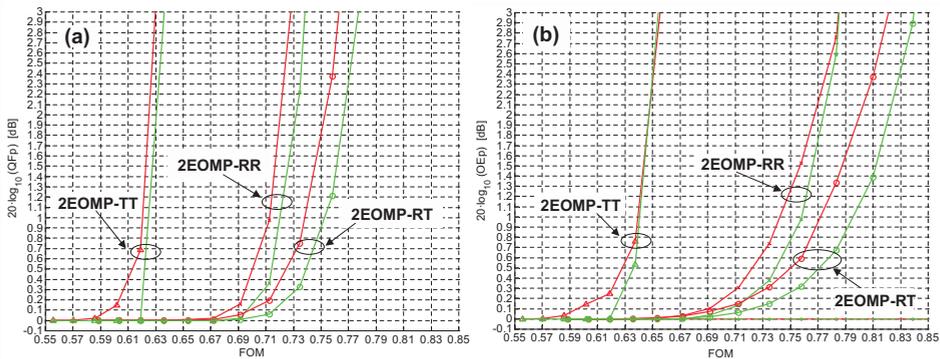
**Tabla 4.2:** Valores de FOM para penalizaciones del (a) factor de calidad,  $LQFL$ , y (b) apertura del diagrama de ojos,  $LOEL$ , de la etiqueta detectada igual a 0.1, 0.5 y 1 dB empleando paquetes SCML con carga ( $BR_P=10\text{Gb/s}$  y  $OMI_P=1$ ) y etiqueta ( $BR_L, OMI_L= 0.1$  con  $m_L=0.5$ ), donde  $BR_P/BR_L = 4, 8, 16$  y  $64$  con la configuración 2EOMP-RR.

A partir de los estudios realizados, se puede afirmar que la  $FBG_{Rx}$  es el dispositivo que va a limitar el factor de compactación espectral del paquete SCML en la estructura

2EOMP-RR. Esto es extrapolable al resto de configuraciones de la estructura 2EOMP, así como los mecanismos que provocan que la calidad de la carga y etiqueta del paquete se degrade conforme aumentamos la compactación espectral del paquete SCML. La figura 4.5 muestra el factor de calidad y apertura del diagrama de ojos de la carga detectada para las tres configuraciones propuestas de la estructura 2EOMP (2EOMP-RR, 2EOMP-TR y 2EOMP-TT). Se comprueba que la distorsión sobre la carga incrementa conforme FOM aumenta (equivalentemente a que la  $f_{RF}$  disminuye) para todas las configuraciones, provocando que la etiqueta se localice en la banda de frecuencias donde la  $FBG_{Rx}$  se encarga de extraer la carga del paquete.



**Figura 4.5:** (a) Factor de calidad,  $QFP$ , y (b) apertura del diagrama de ojos,  $OEP$ , de la señal de carga detectada en función de FOM para paquetes con carga ( $BR_P=10\text{Gb/s}$ ,  $OMI_P=0.1$ ) y etiqueta ( $BR_L$ ,  $OMI_L=1$  con  $m_L=0.5$ ) donde  $BR_P/BR_L=4$  (rojo) y 16 (verde) con las configuración 2EOMP-RR, 2EOMP-TR y 2EOMP-TT.



**Figura 4.6:** Penalizaciones del (a) factor de calidad,  $QFP$ , y (b) apertura del diagrama de ojos,  $OEP$ , de la señal de carga detectada en función de FOM para paquetes con carga ( $BR_P=10\text{Gb/s}$ ,  $OMI_P=0.1$ ) y etiqueta ( $BR_L$ ,  $OMI_L=1$  con  $m_L=0.5$ ) donde  $BR_P/BR_L=4$  (rojo) y 16 (verde) con las configuración 2EOMP-RR, 2EOMP-TR y 2EOMP-TT.

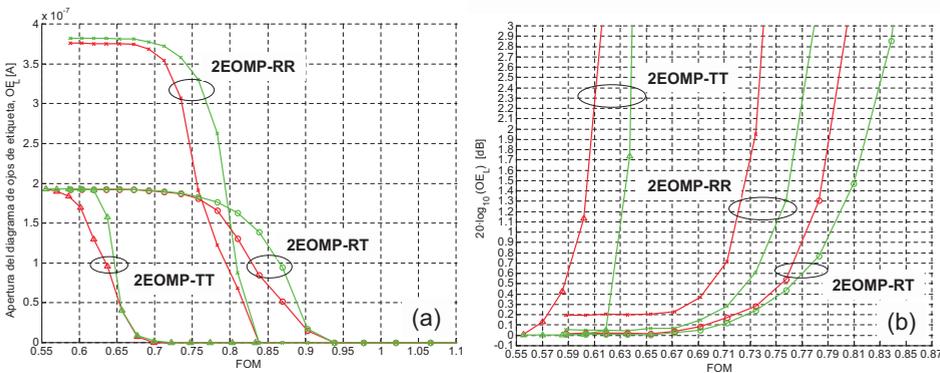
En la figura 4.6 se muestra la evolución de las penalizaciones  $LQFP$  y  $LOEP$  en función de FOM respecto al caso de que  $f_{RF}$  sea tal que no exista interferencia de etiqueta sobre la carga detectada. En la tabla 4.3 se muestra los valores de FOM requeridos para obtener una  $LQFP$  y  $LOEP$  igual a 0.1, 0.5 y 1.0dB. Se observa que la configuración 2EOMP-TR es la que mejor factor de compactación espectral del paquete consigue respecto al resto de

las estructuras 2EOMP propuestas. Esto se debe a la combinación de utilizar la respuesta de transmisión de la  $FBG_{Tx}$  para insertar la carga en el paquete y la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Rx}$  para extraerla en recepción.

Configuración paquete SCML				FOM							
2EOMP	BR <sub>P</sub> /BR <sub>L</sub>	OM <sub>P</sub>	OM <sub>L</sub>	QF <sub>P</sub> (max)	LQF <sub>P</sub> =0.1dB	LQF <sub>P</sub> =0.5dB	LQF <sub>P</sub> =1.0dB	OE <sub>P</sub> (max)	LOE <sub>P</sub> =0.1dB	LOE <sub>P</sub> =0.5dB	LOE <sub>P</sub> =1.0dB
RR	4	0.1	1.0	27.606	0.683404	0.700266	0.712909	4.3849E-05	0.690680	0.722552	0.742641
TR	4	0.1	1.0	27.431	0.698650	0.724859	0.738414	4.3771E-05	0.698650	0.750620	0.771667
TT	4	0.1	1.0	27.431	0.595920	0.613034	0.620574	4.3771E-05	0.595281	0.627828	0.639155
RR	8	0.1	1.0	27.606	0.694908	0.713470	0.718550	4.3849E-05	0.701890	0.737814	0.753735
TR	8	0.1	1.0	27.431	0.714030	0.737814	0.750000	4.3771E-05	0.719119	0.765811	0.790473
TT	8	0.1	1.0	27.431	0.619420	0.621269	0.623596	4.3771E-05	0.619881	0.632839	0.639892
RR	16	0.1	1.0	27.606	0.696507	0.714030	0.720260	4.3849E-05	0.705708	0.739616	0.758773
TR	16	0.1	1.0	27.431	0.715719	0.739015	0.752486	4.3771E-05	0.721977	0.771012	0.795319
TT	16	0.1	1.0	27.431	0.619650	0.621965	0.624765	4.3771E-05	0.622430	0.636225	0.640385
RR	64	0.1	1.0	27.606	0.695440	0.714030	0.719689	4.3849E-05	0.706806	0.740219	0.759407
TR	64	0.1	1.0	27.431	0.714030	0.739015	0.751863	4.3771E-05	0.722552	0.771667	0.796016
TT	64	0.1	1.0	27.431	0.619881	0.622663	0.626175	4.3771E-05	0.623829	0.637931	0.640878

**Tabla 4.3:** Valores de FOM para penalizaciones del (a) factor de calidad,  $LQF_P$ , y (b) apertura del diagrama de ojos,  $LOE_P$  de la señal de carga detectada igual a 0.1, 0.5 y 1dB empleando paquetes con carga ( $BR_P=10\text{Gb/s}$ ,  $OMI_P=0.1$ ) y etiqueta ( $BR_L$ ,  $OMI_L=1$  con  $m_L=0.5$ ) donde  $BR_P/BR_L=4, 8, 16$  y  $64$  con las configuraciones 2EOMP-RR, 2EOMP-TR y 2EOMP-TT.

En la figura 4.7 se muestra los resultados de la calidad de etiqueta en función del parámetro FOM para las tres configuraciones propuestas de la estructura 2EOMP. El nivel de  $OE_L$  en la configuración 2EOMP-RR que es el doble respecto al de las otras dos configuraciones. Esto se debe al empleo de la etiqueta en doble banda lateral en la 2EOMP-RR, mientras que las otras dos, aunque la etiqueta ha sido generada en doble banda lateral, la  $FBG_{Tx}$  se ha encargado de convertirla en banda lateral única, perdiendo la mitad de potencia la etiqueta. Observando la penalización  $LOE_L$  de etiqueta, se comprueba que la configuración 2EOMP-TR es la que mejor grado de compactación espectral de paquete presenta respecto al resto de estructuras 2EOMP estudiadas. Esto se debe, tal como se mencionó cuando se ha hecho la comparación de la carga, a la forma de emplear las FBGs para combinar y separar las señales que integran el paquete.



**Figura 4.7:** (a) Apertura del diagrama de ojos,  $OE_L$ , y (b) penalización de la misma,  $LOE_L$ , de la etiqueta detectada en función de FOM para paquetes con carga ( $BR_P=10\text{Gb/s}$ ,  $OMI_P=1$ ) y etiqueta ( $BR_L$ ,  $OMI_L=0.1$  con  $m_L=0.5$ ) donde  $BR_P/BR_L=4$  (rojo) y  $16$  (verde) con las configuraciones 2EOMP-RR, 2EOMP-TR y 2EOMP-TT.

En la tabla 4.4 se muestran los resultados de compactación espectral del paquete con las tres configuraciones 2EOMP y para unas penalizaciones  $LQF_L$  y  $LOE_L$  igual a 0.1, 0.5 y 1dB. Concretamente, se obtienen unos factores de compactación  $FOM = 0.79$ , 0.74 y 0.63 para una penalización de etiqueta  $LOE_L$  igual a 1dB con las configuraciones 2EOMP-TR, 2EOMP-RR y 2EOMP-TT respectivamente.

Configuración paquete SCML				FOM								
2EOMP	BRp/BRl	OMIp	OMIL	QFL (max)	LQFL=0.1dB	LQFL=0.5dB	LQFL=1.0dB	OEL (max)	LOEL=0.1dB	LOEL=0.5dB	LOEL=1.0dB	
RR		4	1.0	0.1	28,484	0,588235	0,724859	0,726598	3,8432E-07	0,588235	0,699188	0,717415
TR		4	1.0	0.1	28,486	0,791852	0,792543	0,793928	1,9269E-07	0,694908	0,754361	0,772980
TT		4	1.0	0.1	28,821	0,557602	0,565557	0,592316	1,9287E-07	0,566519	0,587302	0,598705
RR		8	1.0	0.1	28,467	0,592843	0,768402	0,769053	3,8433E-07	0,588235	0,719689	0,741428
TR		8	1.0	0.1	28,469	0,848768	0,849345	0,850502	1,9269E-07	0,714286	0,764112	0,792228
TT		8	1.0	0.1	28,469	0,590635	0,626411	0,627119	1,9269E-07	0,603698	0,619881	0,622663
RR		16	1.0	0.1	28,469	0,588235	0,795319	0,796714	3,8433E-07	0,679315	0,727180	0,747531
TR		16	1.0	0.1	28,470	0,888711	0,890454	0,891328	1,9269E-07	0,706806	0,763236	0,791852
TT		16	1.0	0.1	28,470	0,614618	0,641371	0,642609	1,9269E-07	0,619650	0,623829	0,629252
RR		64	1.0	0.1	26,758	0,812393	0,812393	0,812393	3,8442E-07	0,688064	0,730103	0,748147
TR		64	1.0	0.1	26,759	0,911912	0,911912	0,912829	1,9273E-07	0,706806	0,764521	0,792543
TT		64	1.0	0.1	26,759	0,653454	0,656028	0,699874	1,9273E-07	0,621037	0,628776	0,637443

**Tabla 4.4:** Valores de FOM para penalizaciones del (a) factor de calidad,  $LQF_L$ , y (b) apertura del diagrama de ojos,  $LOE_L$ , de la etiqueta detectada igual a 0.1, 0.5 y 1dB empleando paquetes con carga ( $BR_p=10\text{Gb/s}$ ,  $OMI_p=1$ ) y etiqueta ( $BR_L$ ,  $OMI_L=0.1$  con  $m_L=0.5$ ) donde  $BR_p/BR_L=4, 8, 16$  y  $64$  con las configuraciones 2EOMP.

## 4.2. Incremento de la compactación espectral del paquete SCML en la estructura 2EOMP.

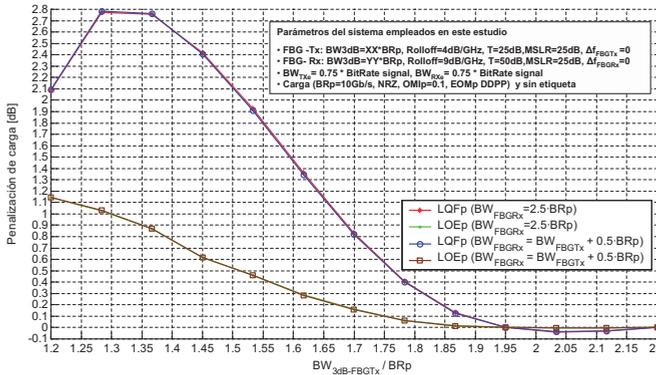
Las FBGs juegan un papel importante en el grado de compactación espectral del paquete SCML, tal como se ha comprobado en la sección anterior. Dependiendo de la configuración de las mismas en el esquema 2EOMP (2EOMP-RR, 2EOMP-TR y 2EOMP-TT), así como sus características de ancho de banda de la banda de paso o desintonía respecto a la frecuencia central del canal óptico SCML, se puede conseguir mejorar dicho factor de compactación. A continuación se van a proponer estrategias de mejora del FOM actuando sobre dichas características de las FBGs en las tres configuraciones de la estructura 2EOMP.

### 4.2.1. Incremento del FOM en la estructura 2EOMP-RR.

La estrategia propuesta para mejorar el grado de compactación espectral del paquete SCML en la estructura 2EOMP-RR consiste en reducir el ancho de banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Tx}$ ,  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}$ . Esto ocasiona una reducción del ancho de banda requerido para transmitir la señal de carga del paquete a cambio de sufrir una penalización inicial asociada al recorte espectral de dicha señal. Además, va a permitir reducir el ancho de banda de la  $FBG_{Rx}$  con el mismo factor y como consecuencia mejorar el factor de compactación FOM. A continuación se procede a describir el procedimiento seguido para finalmente obtener una expresión que permita cuantificar el grado de mejora de la compactación espectral del paquete SCML con la estructura 2EOMP-RR.

En la figura 4.8 se muestra la evolución penalización del factor de calidad,  $QF_p$ , y de la apertura del diagrama de ojos,  $OE_p$ , de la señal de carga en función del ancho de banda de paso de la respuesta de reflexión de la  $FBG_{Tx}$  normalizado respecto a la tasa de transmisión de la señal de carga,  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}/BR_p$ , cuando únicamente se transmite

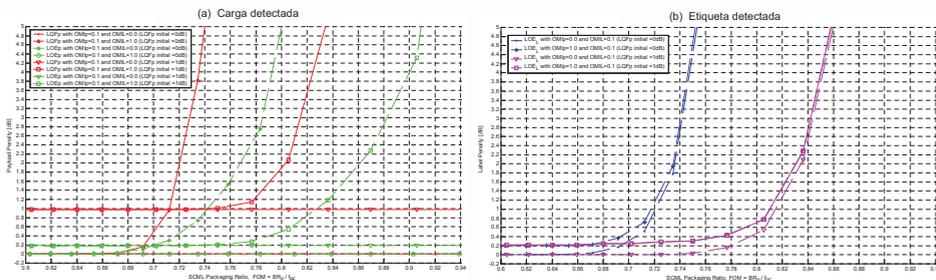
carga en el paquete SCML. Esta penalización es debida al recorte espectral de la carga al ser reflejada por la  $FBG_{Tx}$  con ancho de banda  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}$ . En la tabla de la figura 4.8 se indican cuales son los valores de  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}/BR_P$  para unas penalizaciones del  $QF_p$  y  $OE_p$  de 0,1, 0,5 y 1,0 dB.



Paquete SCML			$BW_{3dB-FBG_{Tx}} / BR_P$								
2EOMP	OMIp	OMIL	$QF_p$ (max)	$LQF_p=0,1dB$	$LQF_p=0,5dB$	$LQF_p=1,0dB$	$OE_p$ (max)	$LOE_p=0,1dB$	$LOE_p=0,5dB$	$LOE_p=1,0dB$	
RR	0,1	0,0	27,607	1,904782	1,773943	1,678586	4,382E-07	1,756202	1,514483	1,297159	

**Figura 4.8:** Penalizaciones de la señal de carga detectada ( $LQF_p$ ,  $LOE_p$ ) en función del ancho de banda de la  $FBG_{Tx}$  empleando la configuración 2EOMP-RR.

Una vez determinado la relación que debe existir entre la tasa de transmisión de la carga y el ancho de la banda de paso en reflexión de la  $FBG_{Tx}$ , se puede analizar la mejora del grado de compactación espectral del paquete SCML dejando fijo el  $BR_P=10Gb/s$  y variando el ancho de banda de paso de las FBGs,  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}$  y  $BW_{3dB-FBG_{Rx}} = BW_{3dB-FBG_{Tx}} + 0,5 \cdot BR_P$ , para un valor inicial de penalización de  $LQF_p$  o  $LOE_p$ . De forma equivalente, se podría haber conseguido la misma mejora del grado de compactación espectral si se variaba la tasa de transmisión de la carga ( $BR_P$ ) y se dejan fijos los anchos de banda de paso de las  $FBG_{Tx}$  y  $FBG_{Rx}$  (20GHZ, 25GHZ).



**Figura 4.9:** Penalizaciones de las señales de carga (a) y etiqueta (b) detectadas en función de FOM y para varios casos de penalización inicial de carga con la configuración 2EOMP-RR.

En la figura 4.9 se ha analizado la primera forma de mejora de la compactación espectral del paquete SCML para el caso de una penalización inicial de  $LQF_p=1dB$ , donde el

$BR_P=10\text{Gb/s}$ ,  $BR_L=BR_P/4$  con  $m_L=0.5$  y FBGs con ancho  $BW_{3dB-FBGTx}=16.78586\text{GHz}$ ,  $BW_{3dB-FBGRx}=21.78586\text{GHz}$ , respecto al caso de  $LQF_P$  inicial igual a  $0\text{dB}$  donde los anchos de banda de las FBGs son  $BW_{3dB-FBGTx}=20\text{GHz}$  y  $BW_{3dB-FBGRx}=25\text{GHz}$ . El resto de parámetros de las FBGs son los mismos que en el caso con  $LQF_P=0\text{dB}$ .

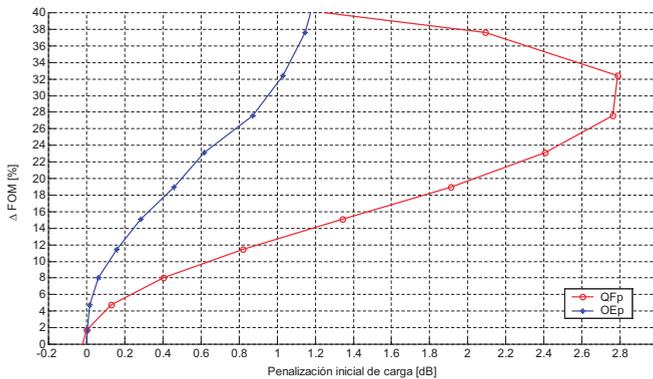
Se define el coeficiente de mejora de FOM,  $\Delta FOM$  [%], como el porcentaje del incremento del factor de compactación espectral conseguido en el paquete SCML a costa de penalizar inicialmente la carga por filtrado respecto al caso de no hacerlo. Concretamente, éste puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\Delta FOM [\%] = \frac{FOM_{carga\_penalizada} - FOM_{carga\_no\_penalizada}}{FOM_{carga\_no\_penalizada}} \cdot 100 \quad (4.2)$$

En el caso de la configuración 2EOMP-RR, el parámetro  $\Delta FOM$  se expresa como:

$$\Delta FOM [\%] = \left[ \frac{1}{1 - (\Delta BW_{FBGTx} / (2 \cdot f_{RF}))} - 1 \right] \cdot 100 \quad (4.3)$$

donde  $\Delta BW_{FBGTx} = BW_{3dB-FBGTx}^{sin\_penalizacion\_inicial\_de\_carga} - BW_{3dB-FBGTx}^{con\_penalizacion\_inicial\_de\_carga}$  con  $BW_{3dB-FBGTx}^{sin\_penalizacion\_inicial\_de\_carga}$  y  $f_{RF}$  el ancho de banda de la  $FBGTx$  y la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia de etiqueta necesarios para un FOM sin penalización inicial de carga por recorte espectral de la  $FBGTx$ . En la figura 4.10 se muestra el coeficiente de mejora de FOM en función de la penalización de carga inicial sin recorte espectral ( $BR_P=10\text{Gb/s}$ ,  $BW_{3dB-FBGTx}^{sin\_penalizacion\_inicial\_de\_carga}=20\text{GHz}$  y un  $FOM=0.683404$  para  $OMI_P=0.1$  y  $LQF_P=0.1\text{dB}$  que equivale a una  $f_{RF}=14.6326\text{GHz}$ ).



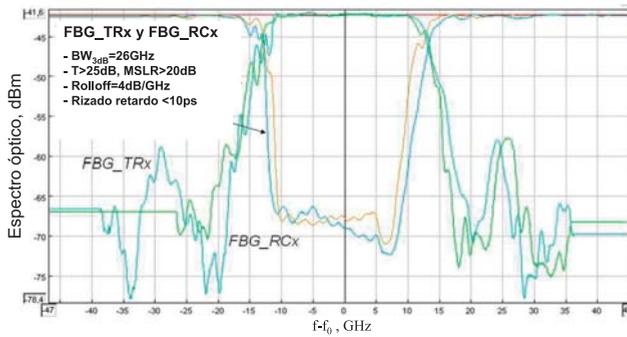
**Figura 4.10:** Incremento de FOM en función de la penalización inicial de  $QF_P$  (rojo) o  $OE_P$  (azul) de la carga detectada (fig. 4.8) con la configuración 2EOMP-RR.

Por último, se extraen las siguientes conclusiones de este estudio:

- La calidad de la carga empeora al realizar el recorte espectral de la misma a través del filtrado de la  $FBGTx$  y  $FBGRx$ . Sin embargo, este valor de penalización se mantiene constante hasta un valor de compactación mayor al caso de no realizar dicha penalización inicial. Debe tenerse en cuenta que la penalización por recorte espectral inicial de la carga es aditiva a la asociada por realizar la compactación. Por

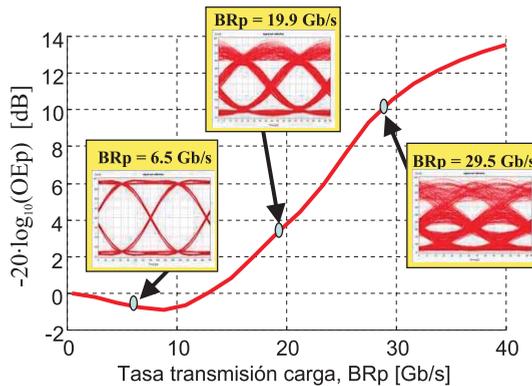


la FBG-RCx para separar las señales de carga y etiqueta que integran el paquete. En la figura 4.12 se muestran los espectros de transmisión y reflexión de ambas.



**Figura 4.12:** Espectros de reflexión y transmisión de la FBG-TRx y FBG-RCx.

A la hora de determinar cual es la máxima tasa de transmisión de carga soportado en el sistema para una penalización inicial de carga por recorte espectral de la carga, se han realizado simulaciones de cual sería la penalización de la apertura del diagrama de ojos de carga al variar su tasa de transmisión,  $BR_P$ , con las FBGs diseñadas inicialmente. En la figura 4.13 se muestra dicho estudio, comprobando que en el caso de emplear una tasa de transmisión de carga de 19.9Gb/s se tiene una penalización inicial de la apertura del diagrama de ojos de carga de 3.8dB. Esta penalización es aceptable en este caso, ya que permite tener una señal de carga detectada con un  $BER > 10^9$ , límite considerado como libre de errores en los sistemas de transmisión digital.



**Figura 4.13:** Simulación de la penalización de apertura del diagrama de ojos de la carga en función de  $BR_P$  para el esquema 2EOMP-RR propuesto.

En la figura 4.14 se muestran los espectros ópticos obtenidos en distintos puntos del experimento realizado (fig. 4.11). Cabe destacar para conseguir el elevado factor de com-

pactación espectral del paquete se truncado espectralmente la carga con la FBG-Trx cuyo ancho de banda de paso en reflexión vale  $1.3 \cdot BR_P$ .

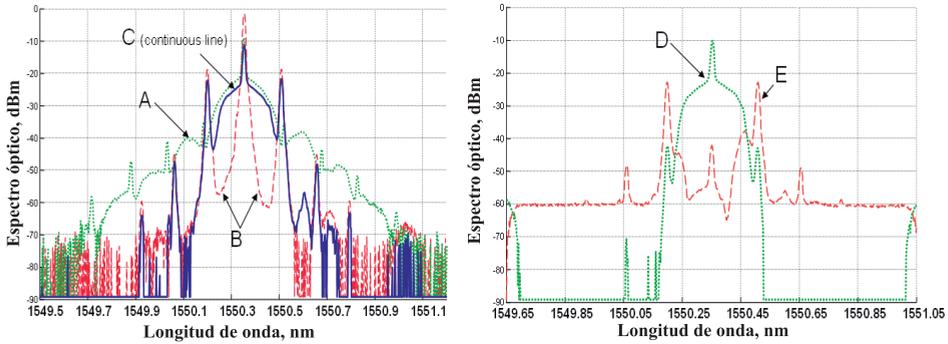


Figura 4.14: Espectros ópticos del paquete SCML en varios puntos del esquema 2EOMP-RR propuesto.

En la figura 4.15 se muestran las medias de calidad BER obtenidas en este experimento para las señales de carga y etiqueta una vez son separadas a través de la FBG-RCx y detectadas. Se comprueba como es posible conseguir un BER superior al límite necesario para considerar la transmisión libre de errores ( $BER=10^9$ ). También se muestran diagrama de ojos de carga y etiqueta, comprobando como la carga presenta una cierta distorsión asociada al truncamiento espectral realizado por la FBG-TRx.

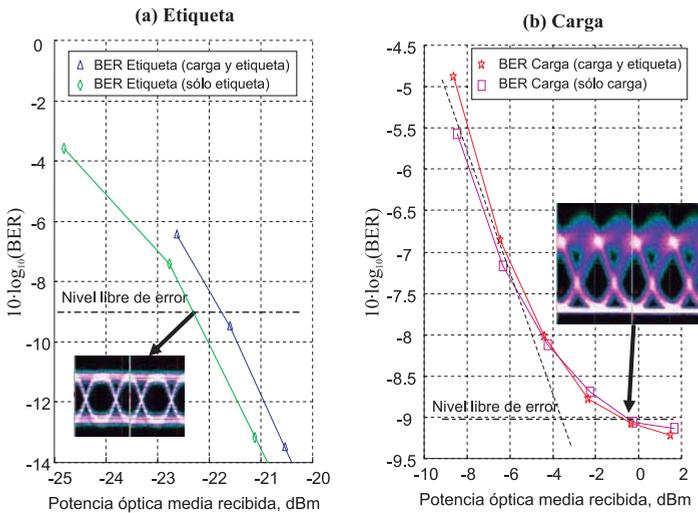


Figura 4.15: Medida experimental del BER de (a) etiqueta y (b) carga del paquete SCML en función de la potencia óptica media recibida en el receptor.

### 4.2.2. Incremento del FOM en la estructura 2EOMP-TR.

La propuesta de mejora del grado de compactación espectral del paquete SCML empleando la estructura 2EOMP-TR consiste en desintonizar la  $FBG_{Tx}$  un valor  $\delta_{\Delta f}$  respecto al valor óptimo  $\Delta f_{Tx}$  calculado en la sección 3.2.2 del capítulo 3. Esto origina un recorte espectral asimétrico de la carga consiguiendo la deseada reducción del ancho de banda requerida para transmitir dicha señal a cambio de una penalización inicial por la eliminación de componentes frecuenciales de la señal de carga. Además, se podrá desintonizar la  $FBG_{Rx}$  con el mismo valor  $\delta_{\Delta f}$  y como consecuencia aumentar el factor de compactación FOM. Dado los requerimientos establecidos para el ancho de banda de paso de la respuesta de reflexión y desintonía de las FBGs en la estructura 2EOMP-TR en la sección 3.2.2 del capítulo 3, las ecuaciones de diseño de éstas quedan reformuladas cuando se realice la desintonía extra,  $\delta_{\Delta f}$ , para mejorar el factor de compactación espectral de la siguiente forma:

- La  $FBG_{Tx}$  tendrá el ancho de banda ( $BW_{3dB-FBG_{Tx}}^{\delta\Delta f}$ ),  $Rollof_{FBG_{Tx}}$  y desintonía  $\Delta f_{Tx}$  expresados de la siguiente forma:

$$BW_{3dB-FBG_{Tx}}^{\delta\Delta f} = BW_{3dB-FBG_{Tx}} - \delta_{\Delta f} \quad (4.4)$$

$$Rollof_{FBG_{Tx}}^{\delta\Delta f} \geq (MSLR_{Tx} - 3)/(BR_P - BR_L + \delta_{\Delta f}) \quad (4.5)$$

$$\Delta f_{Tx}^{\delta\Delta f} = BR_P + BW_{3dB-FBG_{Tx}}/2 + \delta_{\Delta f}/2 \quad (4.6)$$

donde  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}$  corresponde con el ancho de banda de paso (ec. 3.49) de la  $FBG_{Tx}$  inicial sin desintonía extra  $\delta_{\Delta f}$ .

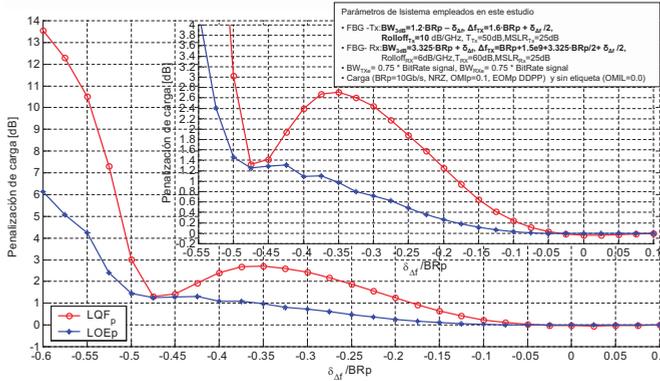
- La  $FBG_{Rx}$  tendrá el ancho de banda ( $BW_{3dB-FBG_{Rx}}^{\delta\Delta f}$ ) y desintonía  $\Delta f_{Rx}$  expresados de la siguiente forma:

$$BW_{3dB-FBG_{Rx}}^{\delta\Delta f} = BW_{3dB-FBG_{Rx}} + \delta_{\Delta f} \quad (4.7)$$

$$\Delta f_{Rx}^{\delta\Delta f} = \Delta f_{Rx} + \delta_{\Delta f}/2 \quad (4.8)$$

donde  $BW_{3dB-FBG_{Rx}}$  corresponde con el ancho de banda de paso (ec. 3.52) y  $\Delta f_{Rx}$  la desintonía (ec. 3.48) de la  $FBG_{Rx}$  inicial sin desintonía extra  $\delta_{\Delta f}$ .

A continuación se procede a describir el procedimiento seguido para finalmente obtener una expresión que permita cuantificar el grado de mejora de la compactación espectral del paquete SCML con la estructura 2EOMP-TR. En la figura 4.16 se muestra la evolución penalización del factor de calidad, QFp, y de la apertura del diagrama de ojos, OE<sub>p</sub>, de la señal de la señal de carga en función de la desintonía extra de la  $FBG_{Tx}$   $\delta_{\Delta f}$  normalizada respecto a la tasa de transmisión de la señal de carga,  $BR_P$ , cuando únicamente se transmite carga en el paquete SCML. Esta penalización es debida prácticamente al recorte espectral que se realiza sobre la carga al ser transmitida por la  $FBG_{Tx}$  desintonizada  $\Delta f_{Tx}^{\delta\Delta f}$ . En la tabla de la figura 4.16 se indican cuales son los valores de  $\delta_{\Delta f}/BR_P$  requeridos para conseguir penalizaciones del QFp y OE<sub>p</sub> de 0.1, 0.5 y 1 dB.



Paquete SCML		$\delta_{\Delta f} / BR_P$									
2EOMP	OMip	OML	QFp (max)	LQFp=0.1dB	LQFp=0.5dB	LQFp=1.0dB	OEp (max)	LOEp=0.1dB	LOEp=0.5dB	LOEp=1.0dB	
TR	0,1	0,0	27.586	-0,070387	-0,134383	-0,180018	4,3847E-05	-0,144104	-0,253195	-0,355085	

Figura 4.16: Penalizaciones de la señal de carga detectada ( $LQF_P$  y  $LOE_P$ ) en función del incremento de desintonía  $\delta_{\Delta f}$  en la configuración 2EOMP-TR.

Una vez determinado la relación que debe existir entre la tasa de transmisión de la carga y el incremento de la desintonía  $\delta_{\Delta f}$  a realizar en las FBGs (que llevará implícitamente una variación de sus anchuras de la banda de paso en reflexión), se puede analizar la mejora del grado de compactación espectral del paquete SCML dejando fijo el  $BR_P=10\text{Gb/s}$  y variando  $\delta_{\Delta f}$ , así como los parámetros de las FBGs,  $FBG_{Tx}$  ( $BW_{3dB}^{\delta\Delta f} - FBG_{Tx}$  (ec. 4.4),  $Rolloff_{FBG_{Tx}}$  (ec. 4.5),  $\Delta f_{Tx}^{\delta\Delta f}$  (ec. 4.6)), y  $FBG_{Rx}$  ( $BW_{3dB}^{\delta\Delta f} - FBG_{Rx}$  (ec. 4.7) y  $\Delta f_{Rx}^{\delta\Delta f}$  (ec. 4.8)), para un valor inicial de penalización de LQFp o LOEp.

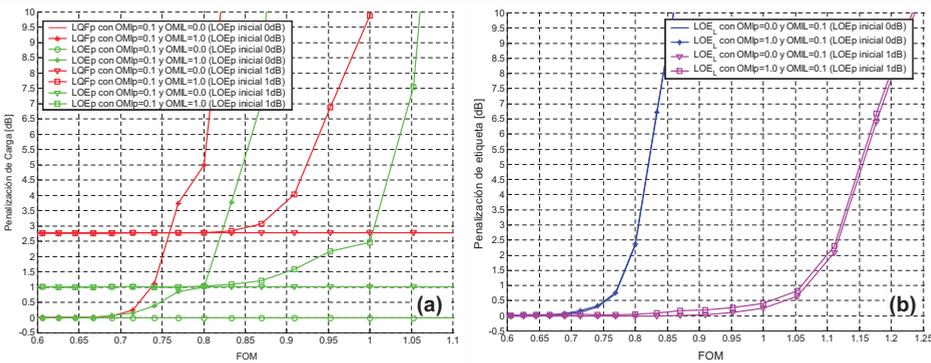


Figura 4.17: Penalizaciones de las señales de carga (a) y etiqueta (b) detectadas en función de FOM en función de una penalización inicial de carga por incremento de desintonía  $\delta_{\Delta f} = 0$  ( $LQF_p=0\text{dB}$ ) y  $-0.355 \cdot BR_P$  GHz ( $LQF_p=1\text{dB}$ ) con la configuración 2EOMP-TR.

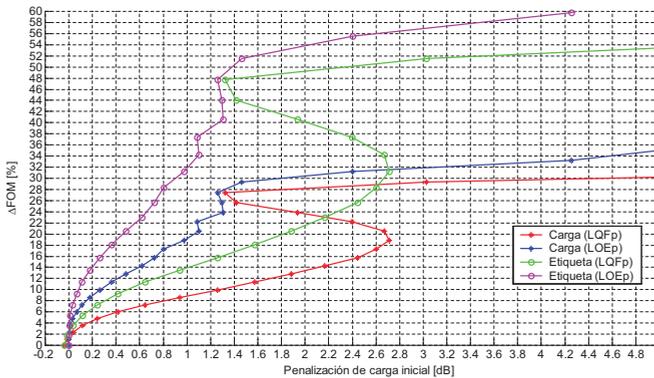
En la figura 4.17 se ha analizado la propuesta de mejora de la compactación espectral del paquete SCML para el caso de una penalización inicial de LOEp=1dB, donde el  $BR_P=10\text{Gb/s}$ ,  $BR_L=BR_P/4$  con un incremento en la desintonía en las FBGs igual a  $\delta_{\Delta f}$

$= -0.3550855 \cdot BR_p$  GHz, respecto al caso de LOEp inicial igual a 0 dB ( $\delta_{\Delta f} = 0$  GHz). El resto de parámetros de las FBGs son los mismos que en el caso con LQFp=0dB.

A partir de los resultados obtenidos, se comprueba que el coeficiente de mejora de FOM,  $\Delta FOM$ , para la configuración 2EOMP-TR queda expresado de la siguiente forma:

$$\Delta FOM [\%] = \left[ \frac{1}{1 + (C_{FOM} \cdot \delta_{\Delta f} / f_{RF})} - 1 \right] \cdot 100 \quad (4.9)$$

donde  $\delta_{\Delta f}$  corresponde con el incremento de la desintonía de las FBGs utilizadas para recortar el espectro de la señal de carga del paquete óptico que origina una penalización inicial respecto al caso inicial. El coeficiente  $C_{FOM}$  corresponde con un factor relacionado a si se analiza la señal de carga (2/3) o de etiqueta (1). La frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia de etiqueta,  $f_{RF}$ , es la asociada a un FOM sin penalización inicial de carga por recorte espectral de la  $FBG_{Tx}$ . En la figura 4.10 se muestra el coeficiente de mejora de FOM en función de la penalización de carga inicial.



**Figura 4.18:**  $\Delta FOM$  de la carga y etiqueta del paquete en función de la penalización inicial de QF o OE de la carga detectada (fig. 4.16) con la configuración 2EOMP-TR.

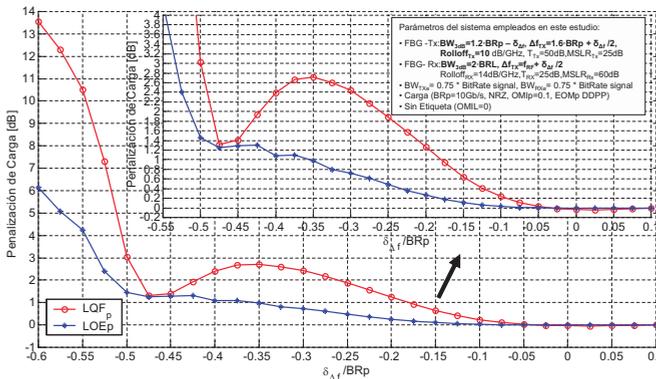
Por último, se extraen las siguientes conclusiones de este estudio:

- La calidad de la carga empeora al realizar el recorte espectral de carga a través del incremento de la desintonía  $\delta_{\Delta f}$  de las  $FBG_{Tx}$  y  $FBG_{Rx}$ . Sin embargo, este valor de penalización se mantiene constante hasta un valor de compactación mayor al caso de no realizar dicha penalización inicial. Debe tenerse en cuenta que la penalización por recorte espectral inicial de la carga es aditiva a la asociada por realizar la compactación. Por tanto, si inicialmente se recorta la carga con una  $FBG_{Tx}$  con incremento de desintonía  $\delta_{\Delta f} = -0.3550855 \cdot BR_p$ , ésta sufre una penalización LOEp=1dB inicial, pero se produce una mejora del factor de compactación de  $\Delta FOM = 19.19\%$ . La  $FBG_{Rx}$  también está desintonizada con el mismo valor  $\delta_{\Delta f}$ . Por tanto, para un caso de carga sin penalizar por filtrado inicial con  $FBG_{Tx}$  con incremento de desintonía desintonizada  $\delta_{\Delta f} = 0$  GHz que tiene un FOM inicial de 0.698650 para un LOEp=0.1dB, luego conseguimos un FOM = 0.83272 (0.698650\*(1+0.1919)) para un LOEp=1.1 dB con carga ( $OMI_p = 0.1$ ) y etiqueta ( $OMI_L = 1$  con  $m_L = 0.5$  (recordar que la penalización total es la inicial por filtrado, 1dB en este caso, más la asociada a la compactación, 0.1 dB en este caso)).
- La calidad de la etiqueta no resulta penalizada inicialmente y mejora el grado de compactación del paquete en un factor  $\Delta FOM\%$ .

- Destacar que la mejora de compactación espectral de paquete es mayor para la etiqueta que para la carga, ya que esta última va a experimentar un mayor efecto de degradación asociada a la asimetría espectral causada por el filtrado por recorte de la  $FBG_{Tx}$  desintonizada. De ahí que el factor  $\Delta FOM$  tenga un factor  $C_{FOM}$  que vale  $2/3$  o  $1$  para la carga o etiqueta del paquete óptico respectivamente.

### 4.2.3. Incremento del FOM en la estructura 2EOMP-TT.

La estructura 2EOMP-TT presenta la misma configuración para la  $FBG_{Tx}$  que para 2EOMP-TR (transmite la carga y refleja la etiqueta a través de la  $FBG_{Tx}$ . Por tanto, la propuesta de mejora del grado de compactación espectral del paquete SCML seguida en la configuración 2EOMP-TT es similar a la 2EOMP-TR. Concretamente, consiste en realizar un incremento de desintonía  $\delta_{\Delta f}$  respecto al valor óptimo  $\Delta f_{Tx}$  calculado en la sección 3.2.3 del capítulo 3. Las consecuencias de realizar esta desintonización adicional de la  $FBG_{Tx}$ , así como en la  $FBG_{Rx}$ , van a ocasionar una penalización inicial de la carga por recorte espectral asimétrico de la señal de carga del mismo modo que sucede con la configuración 2EOMP-TR. Este incremento de la desintonía va a producir que se tengan que reformular las ecuaciones de diseño del ancho de banda de paso de la respuesta de reflexión y de la desintonía de las FBGs empleadas en la configuración 2EOMP-TT. Concretamente, para la  $FBG_{Tx}$  se tiene las mismas ecuaciones obtenidas en 2EOMP-TR:  $BW_{3dB-FBG_{Tx}}^{\delta\Delta f}$  (ec. 4.4),  $Rolloff_{FBG_{Tx}}^{\delta\Delta f}$  (ec. 4.5) y  $\Delta f_{Tx}^{\delta\Delta f}$  (ec. 4.6)). En el caso de la  $FBG_{Rx}$  únicamente se debe obtener la expresión de la desintonía total de la misma  $\Delta f_{Rx}^{\delta\Delta f}$  (ec. 4.8). A continuación se procede a realizar el estudio de la mejora de la compactación de igual forma que para las configuraciones de 2EOMP anteriores.



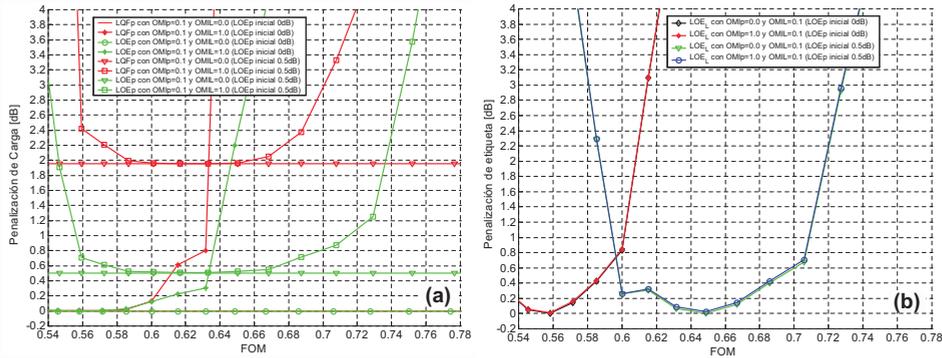
Paquete SCML			$\delta_{\Delta f} / BRp$							
2EOMP	OMIp	OMIL	QFp (max)	LQFp=0.1dB	LQFp=0.5dB	LQFp=1.0dB	OEp (max)	LOEp=0.1dB	LOEp=0.5dB	LOEp=1.0dB
TT	0,1	0,0	27,586	-0,070387	-0,134383	-0,180018	4,3847E-05	-0,144104	-0,253195	-0,355175

Figura 4.19: Penalizaciones de la señal de carga detectada ( $LQF_P$  y  $LOE_P$ ) en función del incremento de desintonía  $\delta_{\Delta f}$  en la configuración 2EOMP-TT.

En la figura 4.19 se muestra la evolución penalización del factor de calidad, QFp, y de la apertura del diagrama de ojos, OEp, de la señal de carga en función de la desintonía extra de la  $FBG_{Tx}$ ,  $\delta_{\Delta f}$ , normalizada respecto a la tasa de transmisión de la señal de carga,  $BRp$ , cuando únicamente se transmite carga en el paquete SCML. Esta penalización es

debida al recorte espectral de la carga cuando es transmitida por la  $FBG_{Tx}$  desintonizada  $\Delta f_{Tx}^{\delta\Delta f}$ . En la tabla de la figura 4.19 se indican cuales son los valores de  $\delta\Delta f/BR_P$  requeridos para conseguir unas penalizaciones del QFp y OEp de 0,1, 0,5 y 1 dB. Se comprueba que los valores son prácticamente idénticos a la configuración 2EOMP-TR, diferenciándose mínimamente debido a que la forma filtrar la carga en la  $FBG_{Rx}$  no es igual en ambos casos.

Una vez determinado la relación que debe existir entre la tasa de transmisión de la carga y el incremento de la desintonía  $\delta\Delta f$  a realizar en las FBGs (que llevará implícitamente una variación de sus anchuras de la banda de paso en reflexión), se puede analizar la mejora del grado de compactación espectral del paquete SCML dejando fijo el  $BR_P=10\text{Gb/s}$  y variando  $\delta\Delta f$ , así como los parámetros de las FBGs comentados previamente. En la figura 4.20 se ha analizado la mejora de la compactación espectral del paquete SCML para el caso de una penalización inicial de  $LOE_P=0.5\text{dB}$  (incremento de desintonía  $\delta\Delta f=-0.253195319\cdot BR_P$  GHz) respecto al caso de  $LOE_P$  inicial igual a 0dB ( $\delta\Delta f=0$  GHz). Se ha empleado una señal SCML con carga NRZ y  $BR_P=10\text{Gb/s}$ , así como una etiqueta NRZ con  $BR_L=BR_P/4$ .



**Figura 4.20:** Penalizaciones de las señales de carga (a) y etiqueta (b) detectadas en función de FOM en función de una penalización inicial de carga por incremento de desintonía  $\delta\Delta f = 0$  ( $LOE_P=0\text{dB}$ ) y  $-0.2531\cdot BR_P$  GHz ( $LOE_P=0.5\text{dB}$ ) con la configuración 2EOMP-TT.

Analizando los resultados obtenidos en la figura 4.20 se comprueba que el coeficiente de mejora de la figura de mérito espectral del paquete SCML,  $\Delta FOM$ , coincide con la expresión 4.9 deducida para la configuración 2EOMP-TR. Esto corrobora el hecho de que el recorte espectral de la carga se realiza de igual forma con la  $FBG_{Tx}$  en ambas configuraciones 2EOMP.

### 4.3. Conclusiones

En este capítulo se ha estudiado la compactación espectral del paquete SCML para las tres configuraciones de la estructura 2EOMP. Para ello se ha definido el parámetro figura de mérito espectral del paquete SCML, FOM, que permitirá saber el grado de compactación espectral de los paquetes SCML para unas calidades de carga y etiqueta del paquete. Concretamente, la configuración 2EOMP-RR es la que presenta mejor factor de compactación, gracias al empleo de la  $FBG_{Tx}$  configurada para transmitir la carga

a la hora de generar el paquete óptico, consiguiendo eliminar las interferencias entre las señales del paquete óptica de forma efectiva al generarlo. Además, empleando la  $FBG_{Rx}$  en transmisión para la carga, se consigue eliminar de forma eficiente la interferencia de la carga sobre la misma a la hora de separarlas del paquete.

Posteriormente se ha estudiado estrategias de mejora de la compactación espectral del paquete SCML haciendo incapié en las FBGs empleadas en la estructura 2EOMP. Concretamente, se consigue un incremento de la compactación espectral del paquete óptico actuando sobre la anchura de la banda de paso de la respuesta de reflexión y/o variando la desintonía de la frecuencia central de dicha banda de las FBGs empleadas. Como consecuencia se produce una penalización inicial de la carga del paquete asociada al recorte espectral de la señal de carga. Sin embargo, esta penalización se mantiene constante conforme reducimos el valor la frecuencia de la subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta en un rango de frecuencias de forma que se consigue aumentar el factor de compactación espectral FOM. Además es importante destacar que la etiqueta no sufrirá ninguna penalización inicial. Para cuantificar el grado de mejora de la compactación espectral se ha definido el parámetro  $\Delta FOM$ , que proporciona el porcentaje del incremento del factor de compactación espectral que se consigue en el paquete SCML a costa de penalizar inicialmente la carga por truncamiento espectral a través de la  $FBG_{Tx}$ . Concretamente se han deducido una expresión analítica de  $\Delta FOM$  para cada una de las tres configuraciones de la estructura 2EOMP propuestas, comparando el grado de mejora de la compactación espectral de las tres configuraciones (2EOMP-RR, 2EOMP-TR y 2EOMP-TT). De dicho estudio se concluye que para una penalización inicial de carga por recorte espectral a través de la  $FBG_{Tx}$ , la etiqueta siempre consigue una mejora espectral de  $\Delta FOM$  independientemente de la configuración empleada de la estructura 2EOMP. Sin embargo, la carga presenta una mejora del factor de compactación espectral igual a  $\Delta FOM$  en el caso de la configuración 2EOMP-RR y  $2/3 \cdot \Delta FOM$  para las configuraciones 2EOMP-TR y 2EOMP-TT. Esto es debido a que mientras que el truncamiento espectral de la carga es simétrico en 2EOMP-RR, éste es asimétrico en los otros dos casos. Esta asimetría espectral de la carga origina que la interferencia de la etiqueta sobre la carga sea mayor cuando se intenta mejorar el factor de compactación, o lo que es lo mismo, la frecuencia de subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta se aproxima al rango de frecuencias donde se sitúa la carga del paquete óptico SCML.



## Capítulo 5

# Diseño e implementación de un demostrador de red de conmutación de paquetes ópticos AOLS WDM-SCML.

Este capítulo se centra en el diseño e implementación de un demostrador de red de conmutación de paquetes ópticos (Optical Packet Switching, OPS) todo óptica de intercambio de etiquetas (All-Optical Label Swapping, AOLS) que emplea la tecnología de multiplexación por subportadora de radiofrecuencia (SubCarrier Multiplexed Label, SCML) para transmitir la etiqueta en el paquete óptico, así como la técnica de multiplexación por longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing, WDM) para poder transmitir simultáneamente varios paquetes SCML por la red AOLS WDM-SCML. Concretamente, el apartado 5.1 describe la topología de nodos que integran la red AOLS WDM-SCML, atendiendo a las distintas funcionalidades a llevar a cabo en la misma, tales como: generación del paquete SCML, reescritura de la etiqueta para enrutar el paquete SCML a través de la red y detección del paquete. A continuación, el apartado 5.2 describe los esquemas de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico estudiados en los capítulos anteriores con redes de difracción de Bragg de altas prestaciones basadas en configuraciones tipo tandem y array para implementar la generación, reescritura y detección de paquetes ópticos en redes AOLS WDM-SCML. Por último, el apartado 5.3 muestra el montaje del demostrador de red AOLS WDM-SCML implementado en el proyecto IST-LABELS con las estructuras de generación, reescritura y detección de paquetes SCML propuestas y diseñadas previamente, así como medidas de calidad de los paquetes SCML en los distintos puntos del sistema, así como la verificación del funcionamiento del enrutado óptico de varios paquetes de forma simultánea.

### 5.1. Red de conmutación de paquetes ópticos AOLS WDM-SCML.

La red de conmutación de paquetes ópticos basada en el intercambio de etiquetas por multiplexación de subportadora de radiofrecuencia, AOLS WDM-SCML, permite el enrutado de paquetes de datos eléctricos (IP, ATM, etc) directamente en el dominio óptico, multiplexando dichos datos electrónicos (carga) con información de enrutamiento óptico

(etiqueta) simultáneamente en el paquete óptico. En este caso se emplea la multiplexación por subportadora para la etiqueta (SCML), donde la etiqueta digital en banda base es modulada sobre una subportadora de radiofrecuencia,  $f_{RF}$ , y combinada con la carga en banda base (paquete IP, ATM, etc) sobre una portadora óptica  $\lambda_i$  (o equivalentemente a la frecuencia  $f_i$ ), tal como se muestra en la figura 5.1(b).

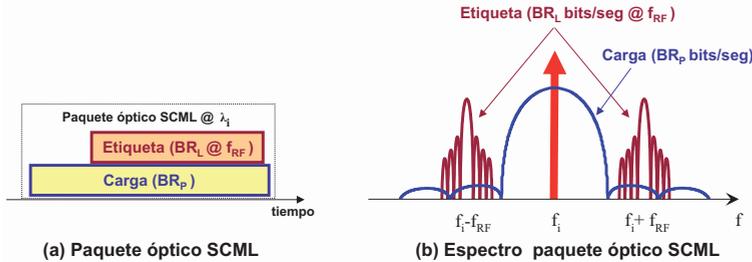


Figura 5.1: (a) Paquete óptico SCML y (b) espectro del paquete óptico SCML.

En la figura 5.2 se muestra la estructura y principio de una red AOLS WDM-SCML. Concretamente, cada paquete proveniente de la red de datos electrónica (IP, ATM, etc) es insertado en la red AOLS WDM-SCML a través del nodo transmisor AOLS-SCML, encargado de generar un paquete óptico SCML (figura 5.1) compuesto por el paquete electrónico IP, ATM, etc (carga) multiplexado con la información de enrutamiento óptico (etiqueta) sobre una portadora óptica  $\lambda_i$ . Éste se propagará por la red, siendo en cada nodo de conmutación de paquetes ópticos (nodo enrutador AOLS-SCML) donde se extraerá la etiqueta del paquete óptico, se decidirá en función de ella por qué salida del nodo debe enrutarse, se cambiará la etiqueta por una nueva en el paquete óptico y finalmente se convertirá el paquete con la nueva etiqueta sobre otra portadora óptica  $\lambda_K$  para tal fin. Será en el nodo de salida de la red óptica (nodo receptor AOLS-SCML), donde se extraerá la carga (paquete electrónico IP, ATM, etc) del paquete óptico, insertándose éste en la correspondiente red de datos electrónica IP, ATM, etc.

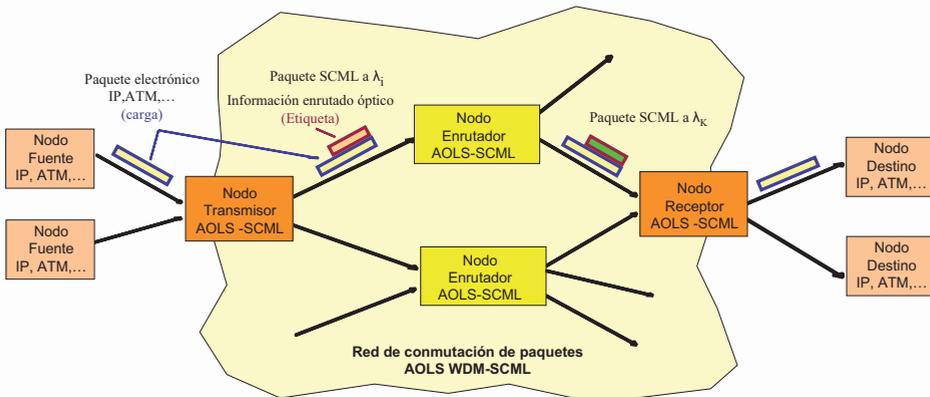
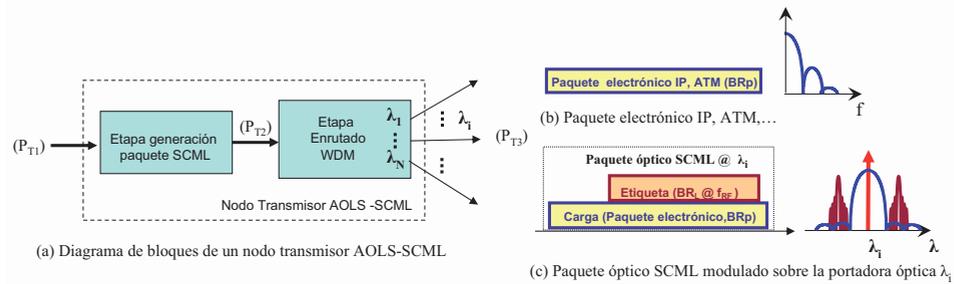


Figura 5.2: Red de conmutación de paquetes ópticos AOLS WDM-SCML.

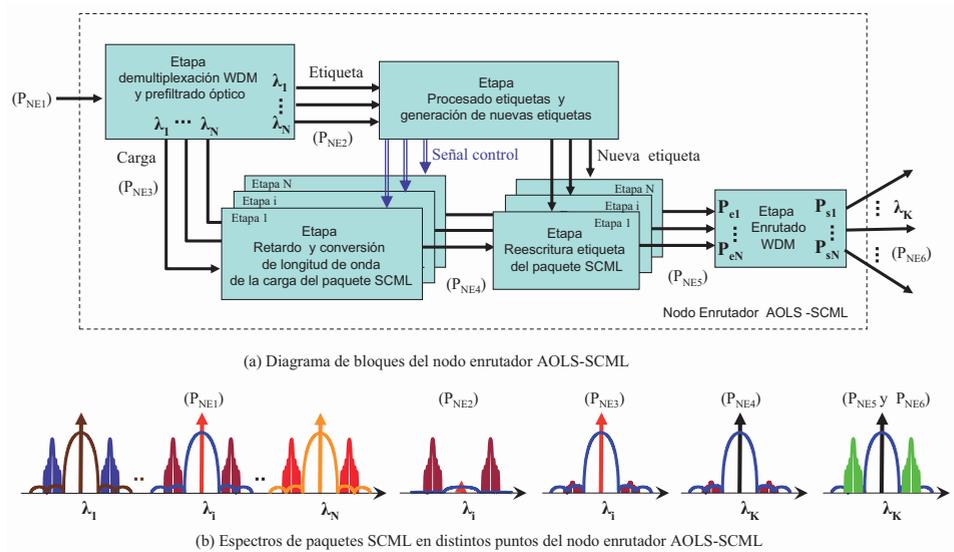
Cada uno de los tres tipos de nodos que integran la red AOLS WDM-SCML presentan una estructura y funcionalidad diferente. Concretamente, el primero de ellos es el nodo transmisor AOLS-SCML situado en la frontera entre la red de datos electrónica y la red

óptica AOLS WDM-SCML. En la figura 5.3(a) se muestra el diagrama de bloques de este nodo, donde existe una primera etapa de generación del paquete SCML encargada de convertir el paquete (figura 5.3(b)) proveniente de la red de datos electrónica al dominio óptico a través de la generación del paquete óptico SCML (figura 5.3(c)). A continuación, la etapa de enrutado WDM encaminará dicho paquete SCML hacia uno de sus puertos de salida en función de la longitud de onda empleada para el paquete óptico generado.



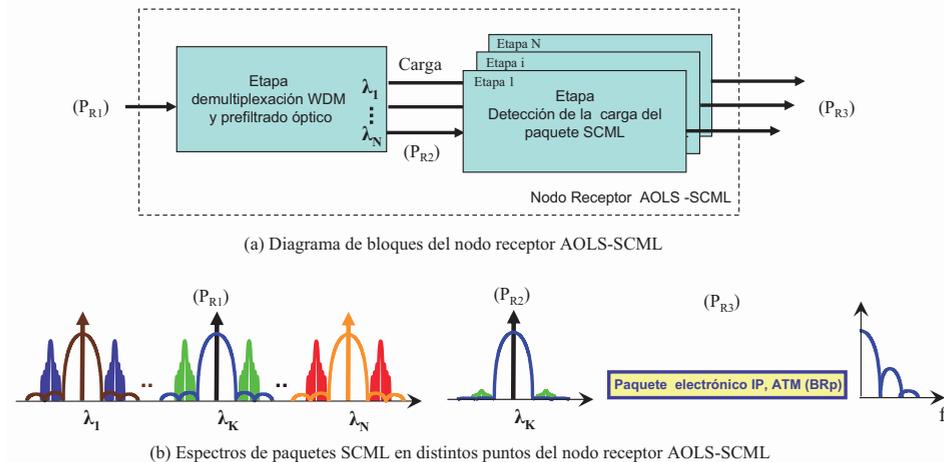
**Figura 5.3:** (a) Diagrama de bloques del nodo transmisor AOLS-SCML, (b) paquete electrónico en el punto ( $P_{T1}$ ), (c) paquete SCML en los puntos ( $P_{T2}$ ) y ( $P_{T3}$ ).

Una vez generado el paquete SCML, éste se va a ser encaminado a través de la red óptica por los nodos de enrutadores AOLS-SCML. En la figura 5.4(a) se muestra la estructura de éste tipo de nodo con un puerto de entrada y N puertos de salida. Cabe puntualizar que si el nodo enrutador AOLS-SCML presenta M puertos de entrada, todos los bloques de la figura 5.4(a) excepto la etapa de enrutado WDM deberán duplicarse M veces.



**Figura 5.4:** (a) Diagrama de bloques del nodo enrutador AOLS-SCML, (b) espectros de los paquetes SCML en distintas puntos del nodo enrutador

En el puerto de entrada del nodo enrutador AOLS-SCML van a llegar paquetes ópticos situados a distintas longitudes de onda definidas en la red, tal como se muestra en el espectro de asociado al punto  $P_{NE1}$  de la figura 5.4(b). La etapa de demultiplexación WDM y prefiltrado óptico separa las cargas y etiquetas de los paquetes SCML de forma simultánea. En los puntos  $P_{NE2}$  y  $P_{NE3}$  de la figura 5.4(b) se muestran los espectros ópticos de la etiqueta y carga del paquete del canal óptico situado en  $\lambda_i$  separadas ópticamente a las salidas asociadas a  $\lambda_i$  en dicha etapa. Posteriormente, la etapa de procesado de etiqueta y generación de nueva etiqueta, se encarga de fotodetectar cada etiqueta que le llega, procesar información de enrutado contenida en los datos de la misma y decidir el puerto de salida del nodo enrutador AOLS-SCML debe salir el paquete asociado a esa etiqueta en base a un protocolo de enrutamiento óptico establecido. En este caso, se determinará la nueva longitud de onda del paquete y se le envía una señal de control para sintonizar el laser a la nueva longitud de onda deseada en la etapa de reescritura de etiqueta del paquete SCML. La etapa de conversión inicialmente retarda la carga separada del paquete de entrada un tiempo igual al tiempo empleado para procesar la etiqueta y generar la nueva etiqueta, convierte la carga del paquete a la nueva longitud de onda y se combina con la nueva etiqueta generada en la etapa de reescritura de etiqueta del paquete SCML. En los puntos  $P_{NE4}$  y  $P_{NE5}$  de la figura 5.4(b) se muestran los espectros ópticos de la carga convertida a la nueva longitud de onda  $\lambda_K$  y paquete SCML con la nueva etiqueta respectivamente. Por último, la etapa de enrutado WDM se encarga de transmitir el paquete SCML convertido a un puerto de salida en función de la longitud de onda del mismo.



**Figura 5.5:** (a) Diagrama de bloques del nodo receptor AOLS-SCML, (b) espectros de los paquetes SCML en distintos puntos de este nodo.

Por último, el nodo receptor AOLS-SCML está situado en la frontera entre la red óptica AOLS-SCML y la red de datos electrónica al igual que el nodo transmisor AOLS-SCML. En este caso, este nodo se encarga de extraer las cargas (paquete electrónico IP, ATM, etc) de los paquetes ópticos del puerto de entrada para insertarlos en las redes de paquetes electrónicos (IP, ATM, etc). En la figura 5.5(a) se muestra el diagrama de bloques de este nodo, donde existe una primera etapa de demultiplexación WDM y prefiltrado óptico encargada de extraer las cargas de los paquetes SCML de entrada al nodo ( $P_{R1}$  en la

figura 5.5(b)) simultáneamente. Cada una de las cargas prefiltradas ópticamente a la salida de esta etapa ( $P_{R2}$  en la figura 5.5(b)) es aplicada a una etapa de detección de la carga del paquete SCML, destinada a convertir la carga del paquete óptico al dominio eléctrico mediante un fotodetector. Una vez detectado cada uno de los paquetes de datos electrónicos será transmitido por la red de datos electrónica asociada.

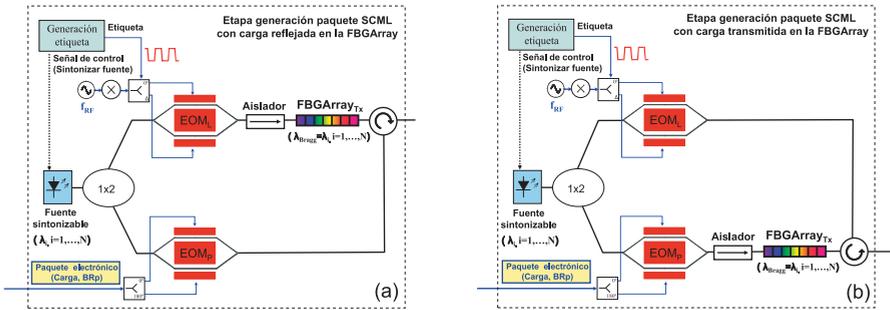
## 5.2. Estructuras de generación, reescritura y detección de paquetes SCML con FBG tipo Array y Tándem.

En la sección anterior se ha descrito la estructura de una red AOLS WDM-SCML, así como los tipos de nodos (transmisor, enrutador y receptor) que la integran. Se puede comprobar que hay etapas de los diferentes nodos que realizan funcionalidades similares. En concreto, la *etapa de generación de paquetes SCML* del nodo transmisor AOLS-SCML y la *etapa de reescritura de etiqueta del paquete SCML* del nodo enrutador AOLS-SCML se encargan de generar un nuevo paquete óptico SCML, ya sea partiendo del paquete de datos electrónico directamente (transmisor) o bien a partir un paquete óptico convertido a una nueva longitud de onda o canal óptico y reescribiendo la etiqueta del mismo (enrutador). Por otro lado, los nodos enrutador y detector AOLS-SCML realizan en la *etapa de demultiplexación WDM y prefiltrado óptico* la extracción de los datos transportados en los paquetes ópticos SCML recibidos, ya sea sólo las etiquetas de los paquetes en el nodo enrutador o las cargas de los paquetes en el nodo receptor para detectarlas e insertarlas en la red de datos electrónica (IP, ATM, etc). Estas funcionalidades de generación (transmisor) o reescritura (enrutador) del paquete óptico como la de detección (enrutador y receptor) del mismo pueden ser implementadas basándose en las estructuras de combinación óptica paralela y prefiltrado óptico con moduladores electroóptico y redes de difracción de Bragg estudiadas en los capítulos anteriores. A continuación se procede a describirlas.

### 5.2.1. Estructuras de generación y reescritura de paquetes en redes AOLS WDM-SCML con FBG Array.

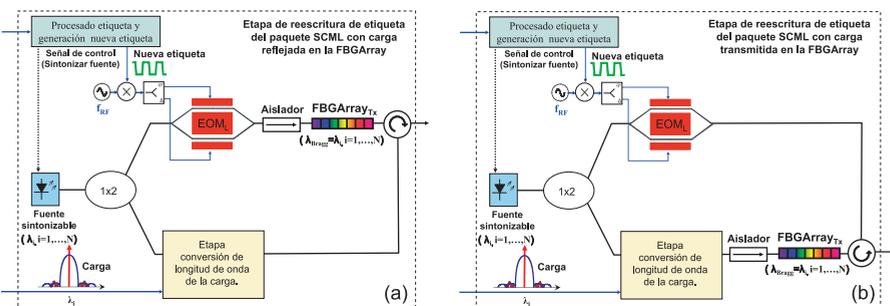
Una red AOLS WDM-SCML debe ser capaz de transmitir paquetes SCML transportados en varios canales ópticos (longitudes de onda) definidos en la misma. Bajo este escenario, el proceso de generación o reescritura del paquete óptico en dicha red debe tener la flexibilidad de generar dicho paquete SCML en cualquiera de los canales ópticos (longitudes de onda). Para ello, se va a hacer uso de la estructura de combinación óptica paralela donde la FBG encargada de combinar la carga y la etiqueta del paquete,  $FBG_{Tx}$ , debe diseñarse para proporcionar esta característica de generación en multiplex longitudes de onda. Para conseguirlo se ha propuesto el empleo de una FBG con multiplex bandas de paso en su respuesta de reflexión (Fiber Bragg Grating Array, FBG Array). La implementación de la FBG Array puede realizarse a través de una cascada de tantas FBGs de una única banda de paso en reflexión como longitudes de onda se empleen en la red y cada una de ellas sintonizada en una de las longitudes de onda, o con FBG Array basada en FBG superestructurada con varias bandas de paso en reflexión localizadas en las distintas longitudes de onda utilizadas en la red óptica. En este trabajo se ha optado por la segunda opción, ya que todo está integrado en una única FBG y se puede sintonizar

mediante temperatura o estiramiento de forma simultánea y sin que exista una variación de la desintonía entre las bandas de la FBG Array. En la figura 5.6 se muestra los esquemas de generación de paquetes SCML empleando el esquema de combinación óptica paralela (2EOMP) donde la carga del paquete SCML es reflejada (5.6a) o transmitida (5.6b) a través de la FBG Array. En este caso, la información de enrutado óptico de la etiqueta como la señal de control de la fuente óptica sintonizable dependerá de la longitud de onda del canal óptico deseado (entre las  $N$  disponibles en el sistema). Cabe destacar que cada una de las bandas de la FBG Array tienen unas características de reflexión y transmisión definidas por los parámetros  $T$ ,  $MSLR$ ,  $BW_{3dB}$ , rolloff y  $\Delta f$  con valores determinados a través de las fórmulas de diseño obtenidas en los apartados 3.2.1 o 3.2.2 del capítulo 3 dependiendo de que la carga sea reflejada o transmitida por la  $FBG_{Tx}$  respectivamente.



**Figura 5.6:** Esquema de generación SCML empleando estructura de combinación óptica paralela donde la carga es reflejada (a) o transmitida (b) por la FBG Array.

Los esquemas propuestos para implementar la etapa de reescritura de etiqueta en el paquete SCML después de convertir en longitud de onda la carga del mismo, y basándose en la estructura de combinación óptica paralela con FBG Array se muestran en la figura 5.7. Concretamente, hay dos opciones dependiendo de que la carga sea reflejada (5.7a) o transmitida (5.7b) por la FBG Array. Como puede comprobarse la estructura es similar a la de generación del paquete SCML, salvo que en lugar de disponer de un EOM para modular la portadora óptica con la señal de datos del paquete electrónico (carga), se parte de la señal de carga convertida en longitud de onda por la etapa diseñada para tal fin.



**Figura 5.7:** Esquema de reescritura de etiqueta del paquete SCML empleando estructura de combinación óptica paralela donde la carga es reflejada (a) o transmitida (b) por la FBG Array.

Como se ha descrito anteriormente, la FBG Array es la configuración idónea para poder conferir esta capacidad de generación y reescritura del paquete SCML en multiplex longitudes de onda de forma simultánea y eficiente. A modo de ejemplo se muestra en la figura 5.8(a) el espectro del módulo las respuestas de transmisión y reflexión de una FBG Array de tipo superestructurada con tres bandas de paso centradas en 1549.226, 1550.017 y 1550.809 nm y anchos de las bandas de paso de 0.209, 0.222 y 0.211 nm diseñada para el demostrador. En la figura 5.8(b) se representa el retardo de grupo de reflexión de las tres bandas centradas respecto la longitud de onda central de cada banda. Se puede comprobar cómo el rizado de éste es inferior a 15 pseg en las longitudes de onda de interés de las bandas de paso de la FBG Array, por lo que no afectará sobre la calidad de la señal de carga de 10Gb/s NRZ empleada en los paquetes SCML del demostrador.

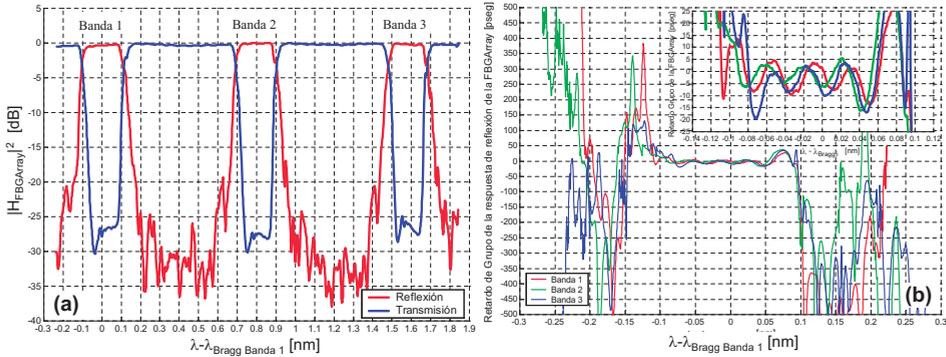


Figura 5.8: Respuesta del (a) módulo y (b) retardo de grupo de la respuesta de reflexión de una FBGArray superestructurada de tres bandas.

El dispositivo FBG Array, diseñado originalmente para la generación de paquetes SCML con separación de 100 GHz en el proyecto IST-LABELS, ha sido empleado también para demostrar una densidad de espaciado de canales SCML de 50 GHz (Dense wavelength Division Multiplexing, DWDM) con dos FBG Array entrelazados. En este caso se aprovechan las excelentes características de roll-off y ancho de banda del dispositivo, además de introducir el concepto de generación de etiqueta SCML en banda lateral única (SSB) mediante el propio filtrado óptico.

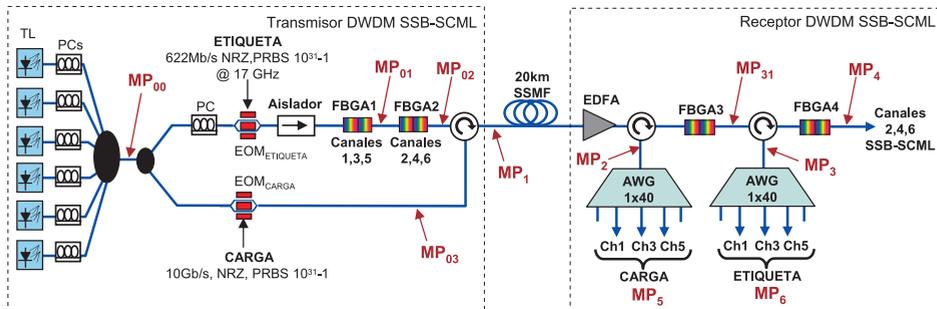
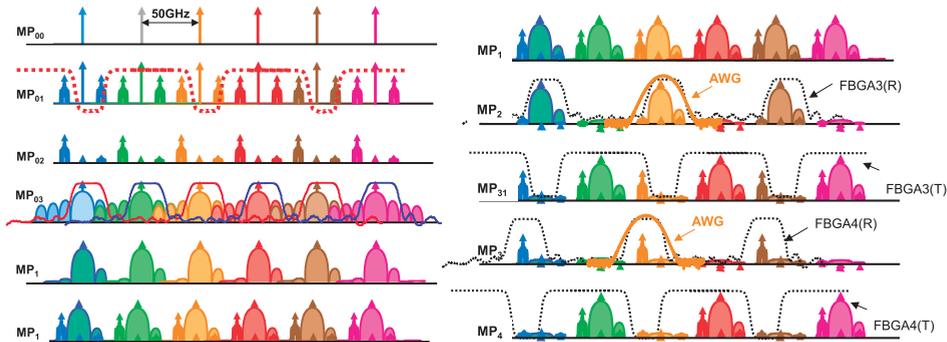


Figura 5.9: Esquema de generación paralelo de 6 canales compuestos por carga a 10Gb/s y etiqueta SSB-SCML a 622Mb/s@17 GHz. TL: Fuente Sintonizable DFB, PC: controlador de polarización, FBGA: FBG de tipo Array, EOM: modulador electro-óptico

En la figura 5.9 se muestra el esquema empleado para la demostración de generación y posterior pre-filtrado de 6 canales compuestos por carga a 10Gb/s y etiqueta SCML a 17 GHz y 622Mb/s. Concretamente, se han empleado 6 fuentes sintonizables DFB (TL) separadas 50GHz que se combinan para formar el multiplex aplicado tanto a la etapa de generación de etiqueta SCML (brazo superior) como a la etapa de generación de carga (brazo inferior). La figura 5.10 muestra esquemáticamente el proceso de combinación de carga y etiqueta SCML en el nodo transmisor, así como el proceso de prefiltrado en el nodo receptor. Se indican en las figuras 5.9 y 5.10 los puntos de medida indicados como MPx.

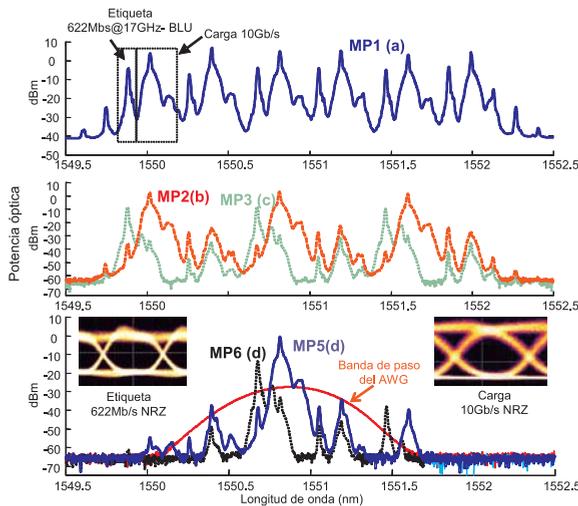


**Figura 5.10:** Esquema espectral de la señales de carga y etiqueta y las respuestas de los FBGAs

En el punto MP01 de la figura 5.10 podemos ver las señales de etiqueta SCML moduladas en doble banda lateral (DSB) y en relación con éstas la respuesta en transmisión de la FBGA1, encargada de generar los canales SSB-SCML 1, 3 y 5. La FBGA2 se encargará de generar los canales SSB-SCML 2, 4 y 6. Obsérvese que las respuestas en transmisión de las FBGA1 y 2 se han localizado ligeramente desplazadas de forma que quedan rechazadas tanto la portadora óptica como la banda lateral derecha, siendo transmitida la banda izquierda. De la misma manera las señales de carga (MP03) son filtradas en reflexión por ambos FBG Arrays rechazando la señal de banda base correspondiente al lóbulo izquierdo (MP1) y por lo tanto evitando la diafonía entre carga y etiqueta. La representación correspondiente a MP1 ilustra las dos señales (carga y etiqueta SCML) combinadas para los 6 canales SSB-SCML. En la figura 5.11(a) se muestran los resultados experimentales del proceso de generación descrito. Es importante destacar como la densidad espectral alcanzada es fruto del fuerte roll-off de los componentes FBG Array ( $\approx 4$  dB/GHz) así como del truncamiento asimétrico de carga y de etiqueta SCML para generar un espectro SSB. El proceso de prefiltrado óptico y detección en el receptor se llevó a cabo mediante dos FBG Arrays (FBGA 3 y 4) de características similares a los dos empleados en la generación. Como se observa en la figura 5.9 el primer FBG Array (FBGA3) refleja las señales de carga de los canales 1, 3 y 5 (ver figura 5.11-b) que son aplicadas a un filtro Arrayed Waveguide Grating (AWG) con espaciado entre canales de 100 GHz para su filtrado individual antes de la detección. Las señales de etiqueta SCML de dichos canales se transmiten a través de FBGA3 junto con los canales 2, 4 y 6 completos (carga y etiqueta). Finalmente es el último dispositivo en array (FBGA4) el que extrae en reflexión las 3 bandas de frecuencias correspondientes a las etiquetas SSB-SCML de los canales 1, 3 y 5 (figura 5.11-c), que serán filtradas individualmente antes de la detección por el segundo AWG. Nótese que la estructura de detección empleada aprovecha la selectividad

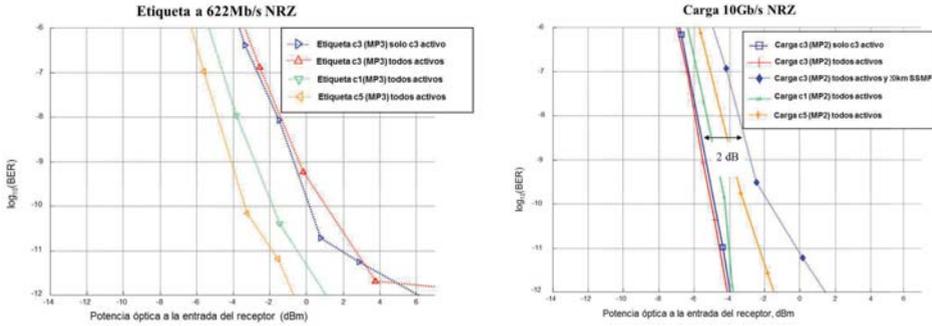
y roll-off de los FBGAs para desentrelazar los canales pares e impares espaciados 50GHz reduciendo la densidad DWDM a señales separadas 100 GHz. Los AWG empleados tienen una respuesta gaussiana, con ancho de banda de 50GHz y cumplen con el estándar ITU de 100 GHz. Se han sometido a diferentes temperaturas de funcionamiento para ajustar la longitud de onda central de trabajo respecto de la posición de carga o etiqueta.

Los espectros de las señales filtradas de carga y etiqueta SSB-SCML del canal 3 antes de ser detectadas son mostrados en la figura 5.10(d). Los diagramas de ojos mostrados presentan ligeras distorsiones y ensanchamientos de las granjas de dispersión del nivel alto y bajo que pueden deberse tanto al efecto del truncamiento asimétrico y la dispersión cromática para el caso de carga como a la interferencia mutua entre carga y etiqueta SCML.



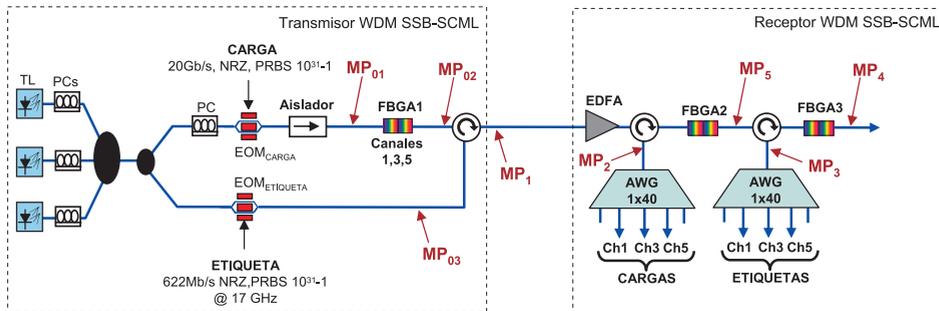
**Figura 5.11:** a) Espectro del conjunto de las 6 canales SSB-SCML generados. b) Cargas y c) Etiquetas SSB-SCML prefiltradas por las FBGAs y antes de los AWG y d) Carga y etiqueta SSB-SCML del canal 3 prefiltradas por el AWG y antes de la detección.

Con objeto de evaluar el impacto del proceso de generación y detección de los paquetes SCML se realizaron medida de probabilidad de error de bit (BER) tanto para carga como para etiqueta que se muestran en la figura 5.12. Los resultados de BER se representan en función de la potencia media óptica medida a la entrada del detector para cada tipo de señal (etiqueta y carga) de forma que se pueda evaluar la penalización de potencia para una determinada BER al comparar los distintos casos de medida. Se muestran los resultados para el canal 3 (c3) estando activado únicamente éste, de forma que tenemos la medida de la referencia tanto para carga como para etiqueta. A continuación se activan todos los canales del esquema generador y se obtienen las medidas de nuevo para el canal 3 no observándose influencia apreciable sobre carga o etiqueta. Las medidas se han repetido para los canales c1 y c5 con todos los canales activos obteniendo similares resultados donde las diferencia entre 1 y 3 dBs respecto del canal central c3 son debidas a pequeñas variaciones en la repuesta espectral de las tres bandas en los FBG Arrays empleadas. Finalmente se ha insertado un carrete de 20 km de fibra estándar y compensado sus pérdidas de inserción mediante ganancia óptica. No se observaron variaciones en las medidas de BER para la etiqueta mientras que la carga experimentó una penalización de 2dB esperable debido a su anchura espectral.



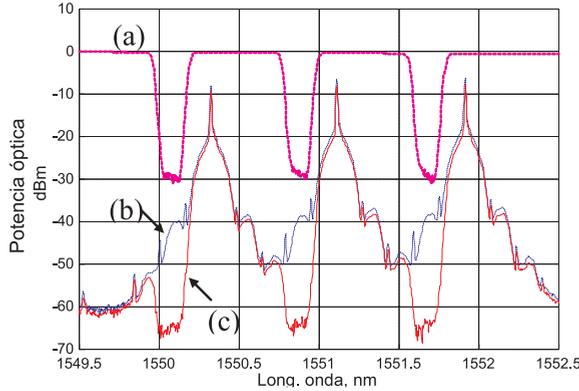
**Figura 5.12:** Medidas de probabilidad de error de bit (BER) para las distintas combinaciones de canales activos.

Los dispositivos FBG Array se ha propuesto también en una configuración de transmisión de carga para la generación del paquete SSB-SCML con tasas de carga que exceden los límites iniciales de 10Gb/s. Concretamente se ha demostrado experimentalmente la generación de tres canales separados 100 GHz que transportan paquetes SSB-SCML con 20 Gb/s de carga y etiquetas a 17 GHz con que transportan datos a 622Mb/s. La configuración se muestra en la figura 5.13.



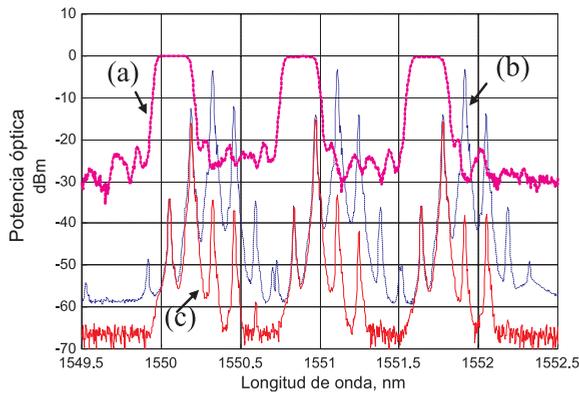
**Figura 5.13:** Esquema de generación paralelo de 3 canales compuestos por carga a 20Gb/s y etiqueta SSB-SCML a 622Mb/s@17GHz. TL: Fuente Sintonizable DFB, PC: controlador de polarización, FBGA: FBG de tipo Array, EOM: modulador electro-óptico.

Como en el caso anterior se emplean una estructura paralelo para la generación independiente de carga y etiqueta SSB-SCML, pero en este caso la combinación de las tres bandas se realiza mediante un único array (FBGA1). La figura 5.14 muestra los espectros de carga antes y después del filtrado por FBGA1. Como se observa, la señal de carga es transmitida a través del array, al contrario que en la estructura anterior, de forma que la anchura de cada banda de reflexión del array ( $\approx 0.2$  nm) ya no supone limitación para la tasa binaria de carga. Nótese que se ha truncado el lóbulo izquierdo de la señal de carga (trazas (b) y (c) en la figura 5.14), zona que contendrá la señal de etiqueta SCML generada en el brazo inferior.



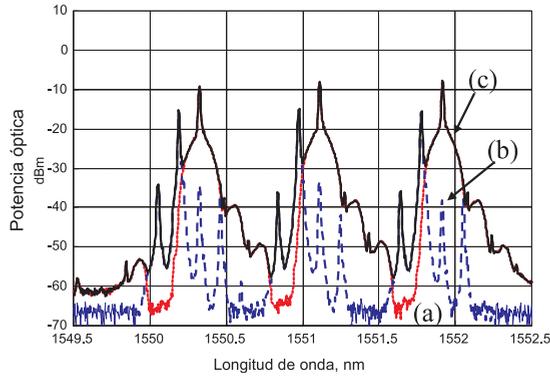
**Figura 5.14:** (a) Respuesta en transmisión de la FBGA1, (b) medida del espectro óptico de las señales de carga antes de la FBGA1 (MP01), (c) medida del espectro óptico de cargas después de ser transmitidas a través de FBGA1 (MP02).

Las señales de etiqueta SCML generadas y filtradas en reflexión por el dispositivo en array se muestran en la figura 5.15. Es importante subrayar como la adecuada posición de las portadoras ópticas respecto del flanco derecho de las tres bandas del FBGA1 permite rechazar suficientemente la portadora óptica de las señales de etiqueta ( $\sim 30$ dB) dada la relación de lóbulo principal a secundario de estos componentes como se comprueba en la figura 5.8.

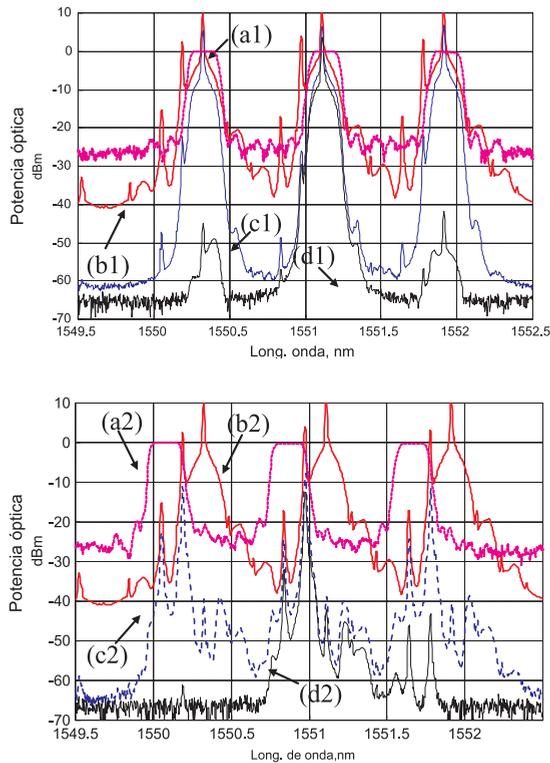


**Figura 5.15:** (a) Respuesta en reflexión de FBGA1, (b) medida del espectro óptico de las señales de etiqueta DSB-SCML a la salida del EOM (MP03), (c) medida del espectro óptico de las etiquetas SSB-SCML después de ser reflejadas por FBGA1 (MP1)

La figura 5.16 muestra el espectro de las señales de carga y etiqueta SSB-SCML combinadas a la salida del transmisor. Se observa como la señal de interferencia de etiqueta sobre carga en la portadora óptica es inferior a 25 dB en los tres canales, así como la señal residual de carga en la zona donde se localiza el espectro de etiqueta está 15 dB por debajo de ésta.



**Figura 5.16:** Espectro de los canales con carga y etiqueta SSB-SCML: (a) carga truncada asimétricamente, (b) etiqueta SCML filtrada y (c) combinación de ambas señales a la salida del transmisor.



**Figura 5.17:** Proceso de separación de carga y etiqueta SCML. Separación de carga: (a1) respuesta en reflexión de FBGA2, (b1) carga con etiqueta SSB-SCML, (c1) carga extraída simultáneamente en canales 1, 3 y 5, (d1) salida del AWG de cargas para el canal 3. Separación de etiqueta: (a2) Respuesta en reflexión de FBGA3, (b2) carga con etiqueta SSB-SCML, (c2) etiqueta SCML extraída simultáneamente en canales 1, 3 y 5, (d2) salida del AWG de etiquetas en canal 3.

El proceso de separación de carga y etiqueta se ha llevado a cabo mediante dos FBG Array en el nodo receptor para la extracción de carga y etiqueta secuencialmente. En la figura 5.17 se muestra el resultado espectral para ambas señales. En ambos casos el FBG Array se emplea en reflexión estando las bandas desplazadas 17 GHz en frecuencia óptica para situarse en cada caso sobre carga o etiqueta SSB-SCML. Se muestran ambas respuestas en reflexión y su posición relativa frente al espectro combinado de carga y etiqueta. Las trazas (c1) y (c2) representan la señal filtrada para carga y etiqueta respectivamente. La extracción de etiqueta y carga se realiza sobre los tres canales simultáneamente siendo finalmente los AWGs los que realizan la demultiplexación WDM de 100 GHz como se ve en las trazas (d1) y (d2).

Como en el caso anterior, se ha realizado la caracterización de calidad de la señal mediante la medida del BER y la obtención del diagrama de ojos para el caso de  $BER=10^{-9}$ , resultados que se muestran en la figura 5.18. La traza (a) corresponde con la calidad de carga justo a la salida del transmisor (MP1) cuando se activa la carga sólo por lo que representa la referencia o medida *Back to Back*, (b) es la medida a la salida del AWG se activada la carga únicamente y (c) es la medida a la salida del AWG activando el paquete completo (carga con etiqueta SSB-SCML). La diferencia entre (a) y (b) incluye las pérdidas de inserción sufridas en el proceso de extracción debidas al circulador, FBGA y AWG y la distorsión asociada al filtrado de la carga en reflexión por la FBGA2. Al activar la etiqueta, traza (c), no se observan cambios significativos por encima de  $BER=10^{-9}$ , por lo que podemos concluir que no existen interferencia de etiqueta sobre carga debido a las características de las FBG Arrays tanto en la generación como en la separación de señales.

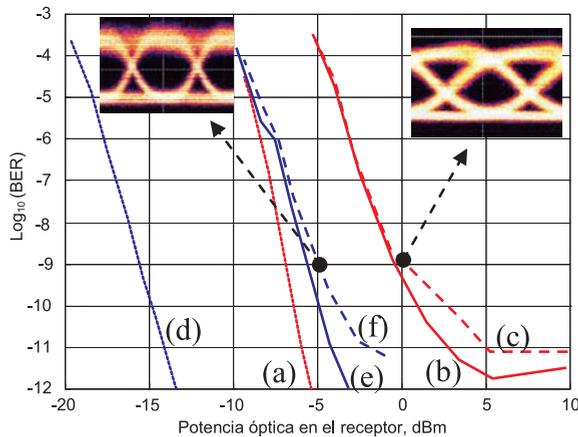


Figura 5.18: BER de las señales de carga y etiqueta.

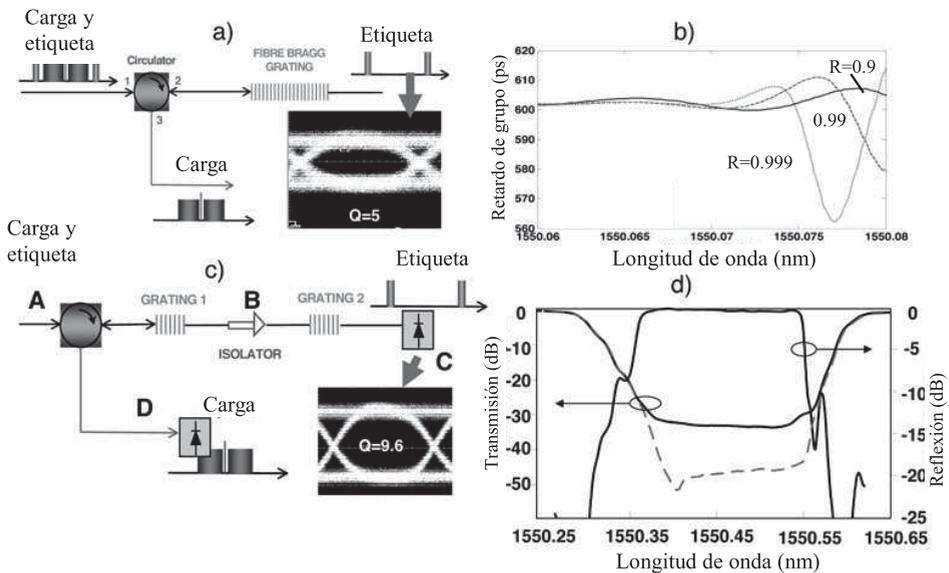
El mismo procedimiento de medida se siguió para la etiqueta, trazas (d), (e) y (f). La traza (d) muestra la BER para la etiqueta a la entrada del bloque receptor (MP1) estando activa ésta únicamente. La traza (e) muestra la calidad a la salida del segundo AWG por lo que se observa un incremento de las pérdidas de ( $\sim 10$  dB debido a la cascada de circuladores, conectores, FBGA3 y AWG). Finalmente la traza (f) muestra esta misma medida pero con la carga activa lo que supone un leve incremento de la penalización de  $\sim 0.5$  dB ( $BER=10^{-9}$ ) y  $\sim 1$  dB ( $BER=10^{-10}$ ) debido a la presencia de densidad espectral de señal de carga sobre la frecuencia de la subportadora de etiqueta.

### 5.2.2. Estructura de detección de paquetes en redes AOLS WDM-SCML con FBG Tándem.

El proceso de extracción de la información de carga y etiqueta del paquete óptico SCML en una red AOLS WDM-SCML se realiza en la etapa de demultiplexación WDM y prefiltrado óptico de los nodos enrutador o receptor AOLS-SCML. Primeramente se realiza la separación de los paquetes SCML transportados en los distintos canales ópticos dentro del proceso de demultiplexación WDM y posteriormente la separación de la carga y etiqueta de cada paquete individual directamente en el dominio óptico a través del proceso de prefiltrado óptico. Tal como se estudió en la sección 3.2. del capítulo 3, las características del módulo de las respuestas de reflexión y transmisión de la FBG encargada de separar la carga y etiqueta del paquete eran muy restrictivas: rechazo de la banda eliminada altos ( $T$  sobre 30 - 50 dB), ancho de la banda de paso de reflexión reducidos para conseguir buena eficiencia espectral del paquete, rolloff del flanco de la banda de paso alto (4 - 6 dB/GHz). Además hay que tener en cuenta que el rizado del retardo de grupo en la banda de paso de la respuesta de reflexión debe ser lo suficientemente bajo para no afectar a la señal de carga normalmente reflejada por la  $FBG_{Rx}$ . En esta situación el diseño de tales dispositivos requiere la utilización de técnicas de síntesis como Discret Layer Peeling [46], a los que se puede exigir respuestas objetivo que mantengan el rizado del retardo de grupo por debajo de un valor máximo ( $\sim 25$  ps para una tasa binaria de 10Gb/s en el caso de demostrador de proyecto IST-LABEL). Este objetivo se complica precisamente si la subportadora de radiofrecuencia (18 GHz en el demostrador) que transporta la etiqueta SCML se encuentra muy próxima a las señales de carga (señal de reloj de carga por ejemplo a 10 GHz) lo que como se ha indicado requiere fuertes valores de rolloff y rechazo de etiqueta. Aunque se han demostrado sistemas SCML con dispositivos FBGs de prestaciones medias con empaquetados de carga frente a etiqueta de 10Gb/s frente a 14 GHz de frecuencia de etiqueta [21], para un único salto de red es importante notar que los requerimientos de calidad para reflexión de carga en la etapa de prefiltrado se acentúan cuando se tratar de sistemas que deben soportar diversas transmisiones entre nodos de la red estando la señal de carga sometida a diversos procesos de conversión de longitud de onda que pueden degradar paso a paso la señal de entrada a cada nodo y añadir chirp residual a la misma. Con objeto de suavizar los requerimientos de diseño que se deben exigir a un dispositivo FBG para alcanzar las precisadas características simultáneamente, se ha propuesto la utilización de una estructura en Tandem como la mostrada en la figura 5.19.

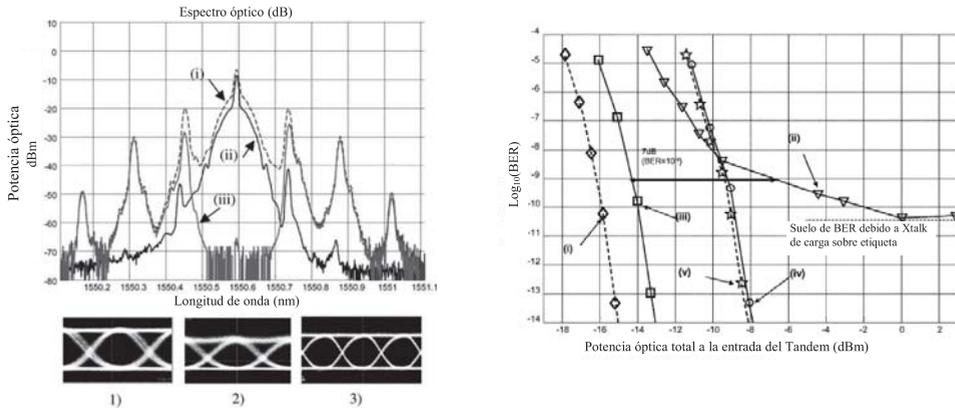
En la figura 5.19(a) se muestra la estructura típica de separación de carga y etiqueta empleando un solo dispositivo FBG para reflejar la señal de carga y transmitir la etiqueta. Al igual que la carga, la etiqueta se detectará directamente en banda base en lo que hemos denominado el prefiltrado óptico de la etiqueta SCML dado que se elimina la portadora óptica y la señal de carga modulada en banda base. Desde el punto de vista de calidad de carga, tal como se ha indicado previamente, la FBG debe mantener el parámetro de rizado del retardo de grupo acotado, y al mismo tiempo asegurar una reflectividad muy alta para eliminar la señal de etiqueta entre 20-40 dBs. La figura 5.19(b) muestra los resultados de la simulación mediante DLP donde se observe como estos dos requerimientos son contrapuestos dado que las oscilaciones del retardo de grupo cerca de los flancos de la FBG se acentúan para dispositivos con reflectividad creciente (figuras de retardo de grupo para  $R=0.9, 0.99$  y  $0.999$ ), lo que reduce el ancho de banda disponible que cumple los requisitos de rizado. Además, y de manera muy importante, las imprecisiones en la fabricación de los componentes FBG (errores de fase y amplitud del grating) solo conducen

a un incremento de las oscilaciones del retardo de grupo que se incrementan cuando el dispositivo es de mayor reflectividad. Por otro lado, si nos fijamos en el componente con reflectividad 0.9 observamos que no presenta oscilaciones del retardo superiores a 10 ps, sin embargo no sería de utilidad al no rechazar suficientemente la señal de carga y por lo tanto reducir la calidad de la señal de etiqueta prefiltrada y detectada como se muestra en la figura 5.19(a).



**Figura 5.19:** Estructura de prefiltrado basada en Tandem de FBGs: (a) estructura con una sola FBG, (b) Rizado de retardo de grupo para reflectividades 0.9, 0.99, 0.999. (c) Estructura Tandem, (d) respuestas de transmisión del tándem (discontinua) y de la red Intensa (trazo continuo) y respuesta de reflexión FBG débil.

La propuesta de redes en tándem mostrada en la figura 5.19(c) permite abordar ambas restricciones combinando dos FBGs con diferente funcionalidad. La primera FBG se emplea para la apropiada reflexión de carga y presenta una reflectividad no superior a 0.9 de forma que su diseño es óptimo para reducir el rizado de retardo y minimizar el impacto sobre la señal de carga reflejada. La segunda FBG puede ser ya una red muy intensa ( $>0.999$ ) dado que su función es bloquear completamente el residuo de carga que es transmitido por la primera red. Entre ambas redes se ha situado un aislador óptico para prevenir la formación de una estructura interferométrica Fabry-Perot.

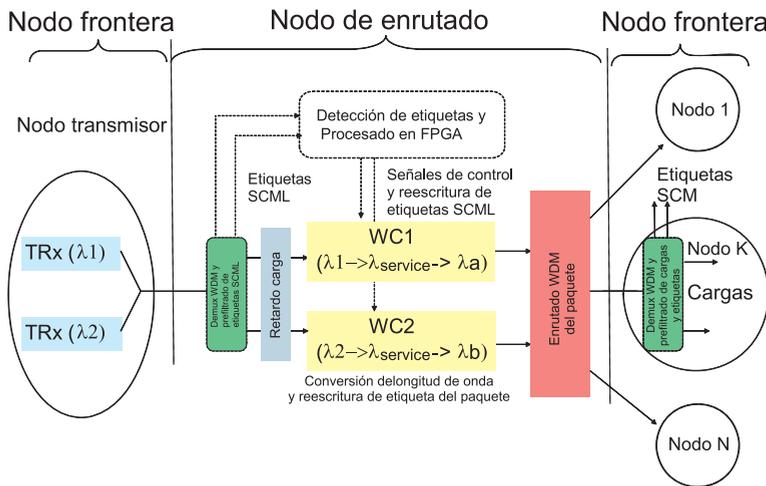


**Figura 5.20:** Verificación experimental de la estructura Tandem con señal de carga a 10Gb/s y etiqueta SCML a 18GHz (622 Mb/s). (i)

Para la verificación experimental se diseñó y fabricó una FBG de filtrado de carga (red débil) con reflectividad del 90 % y ancho de banda a 3dB de 20.5 GHz con rizado de retardo inferior a 25 ps en toda su anchura. La red intensa se diseñó para proporcionar un rechazo de 40dB sobre la carga y una atenuación a las subportadoras de RF situadas a 18 GHz inferior a 0.5 dB. La figura 5.19(d) muestra la respuesta en transmisión de ambas redes en la estructura tándem (trazo discontinuo), la respuesta de la red intensa únicamente (trazo continuo) y la respuesta en reflexión de la red débil. La señal completa del paquete SCML aplicado al dispositivo tándem se muestra en la figura 5.20 como traza (i), siendo la (ii) la señal reflejada de carga y (iii) la señal transmitida de etiqueta SCML a través de la FBG tándem. Se observa como el residuo de etiqueta sobre la carga es menor a 30dB gracias al rápido rolloff desde los flancos de la red débil hasta los 18 GHz de la etiqueta. También podemos destacar la fuerte supresión de la señal de carga en el espectro transmitido de etiqueta siendo la relación entre residuo de carga y señal de etiqueta superior a 45 dB. También se muestran los siguientes diagramas de ojos: 1) carga *Back to Back*, es decir, solo carga activa a la entrada del tándem, 2) carga a la salida del tándem estando la etiqueta activa y 3) diagrama de ojos de etiqueta detectada habiendo rechazado la carga. En los casos 2) y 3) no se observaron cambios significativos en los diagramas de ojos al activar o desactivar los señales cruzadas (interferentes) debido al comportamiento del Tandem. La diferencia observada entre las señales en 1) y 2) es debido al natural truncamiento de componentes espectrales sobre la carga así como el inevitable rizado residual de retardo de la FBG débil. En la figura 5.20 también se muestran los resultados de la medida sistemática de BER para carga y etiqueta. Las curvas (v) y (iv) muestran respectivamente los resultados para la carga *back to back* (antes del tándem) y una vez aplicado éste sin observarse variación apreciable. Las curvas (ii) y (iii) muestran los resultados de la etiqueta detectada en los puntos B y C de la figura 5.19(c) respectivamente, es decir, después de la FBG débil y después del conjunto del tándem. Se observa como en el caso de utilizar una FBG débil la interferencia de carga no permite reducir el calor de BER por debajo de un cierto valor de *suelo* incluso aumentando la potencia óptica. Al emplear el tándem (iii) se corrige este comportamiento eliminándose por completo la interferencia de carga y reduciéndose la penalización a 2dB por encima de la traza *back to back* de etiqueta (i).

### 5.3. Demostrador de red de conmutación de paquetes ópticos AOLS WDM-SCML.

Como se ha indicado en la introducción del capítulo, el conjunto de técnicas propuestas para la generación, reescritura y prefiltrado de paquetes SCML se van a verificar de forma conjunta en un demostrador de red AOLS WDM-SCML como el representado en la figura 5.21. Debido a las necesidades de equipamiento que requiere un demostrador de estas características tanto de equipos de generación, elementos de filtrado (FBGA Array y Tandems), equipos de conversión de longitud de onda y láseres sintonizables, la estructura propuesta incluye únicamente la interconexión de un nodo transmisor (nodo frontera: datos de entrada a la red) con un nodo de enrutado (nodo interno de la red mallada) y finalmente un nodo frontera que realiza las funciones de prefiltrado y detección para extraer los datos de la red óptica.



**Figura 5.21:** Estructura del demostrador implementado en el proyecto IST LABELS.

Las características del demostrador a implementar dentro del proyecto IST-LABELS han sido las siguientes: sistema WDM-SCML de dos canales SCML con espaciado entre canales de 100 GHz (estándar ITU), donde cada canal SCML está compuesto por una señal de carga de 10 Gb/s (NRZ) y etiqueta de 155Mb/s (NRZ) modulada en amplitud sobre una subportadora de radiofrecuencia de 18GHz. La figura 5.21 muestra el nodo transmisor compuesto por dos transmisores a dos longitudes de onda correspondientes a dos canales ITU en el centro de la banda C (Ch1 y Ch2). La figura 5.22 muestra con detalle los componentes y las estructuras empleadas para cada uno de los bloques que iremos describiendo secuencialmente. Para los transmisores del nodo transmisor se emplean estructuras de generación en paralelo basadas en redes FBG Array (FBGArray4 y FBGArray7 en adelante). La señal eléctrica de datos se obtiene de un generador de señal digital y medidor de BER y la señal se etiqueta SCML se obtiene mediante modulación electrónica de una subportadora a 18 GHz con los datos de cabecera generados para cada paquete mediante una sistema electrónico basado en FPGA (Field Programmable Gate Array). Finalmente, los dos canales ópticos que transportan paquetes SCML son multiplexados mediante un AWG hacia un puerto de salida y son dirigidos hacia el nodo enrutador (nodo core).

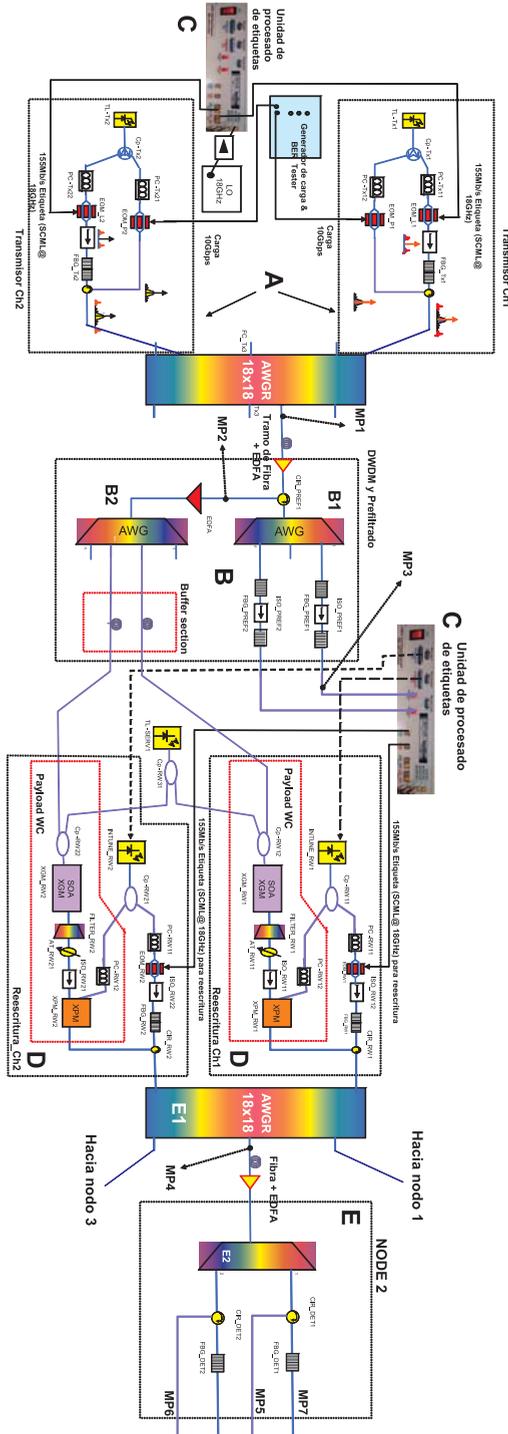
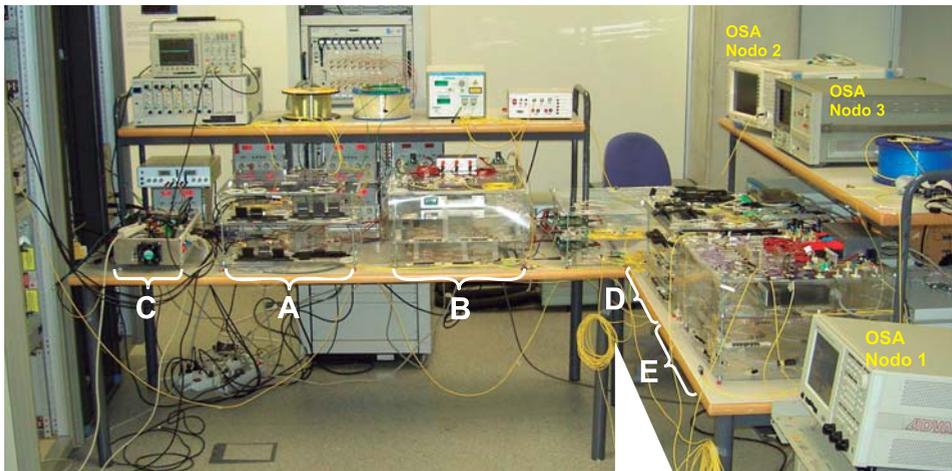


Figura 5.22: Estructura detallada con componentes del demostrador implementado en el proyecto IST LABELS.

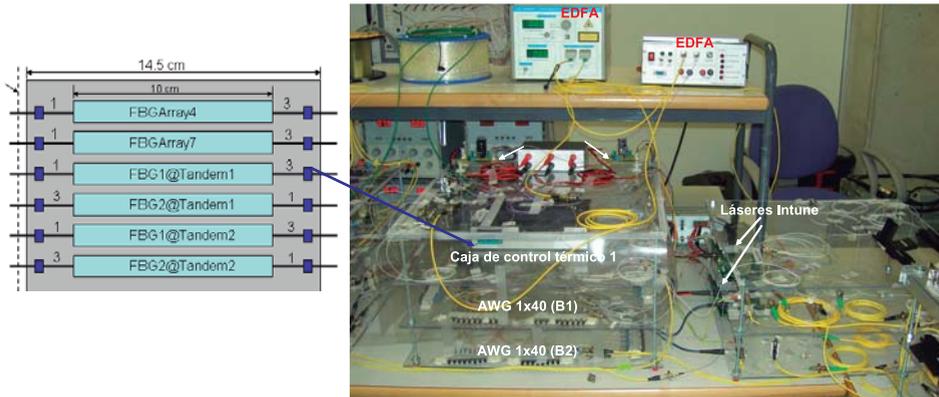
El nodo enrutador es el que mayor número de funcionalidades implementa siendo realmente el núcleo del demostrador. La primera etapa del mismo (A en el figura 5.22) realiza la función de demultiplexación WDM y prefiltrado mediante el AWG (B1) y las etapas de FBG tándem conectadas a éste (identificadas como FBG@Tandem en adelante). Las señales de etiqueta SCML se separan de la carga en dichas etapas como se vio en la sección 5.2.2 y son detectadas directamente sin necesidad de procesamiento de radiofrecuencia. Las señales detectadas de etiqueta ya en banda base son detectadas y procesadas en la FPGA (C) para extraer la información de cabecera del paquete eliminando los bits de preámbulo y sincronización. Por otro lado, las señales de carga reflejadas en los FBG tándem son dirigidas a través del circulador al segundo de los AWGs (B2) que las separa de nuevo para ser aplicadas a sendas etapa de retardo de fibra óptica para compensar los tiempos de procesamiento de las etiquetas en la FPGA. Estos retardos son de tipo constante por lo que una vez programado el procesamiento de las etiquetas en la FPGA se pueden ajustar dichos retardos sin más que realizar una medida temporal del comienzo de carga y etiqueta al final del nodo de enrutado.



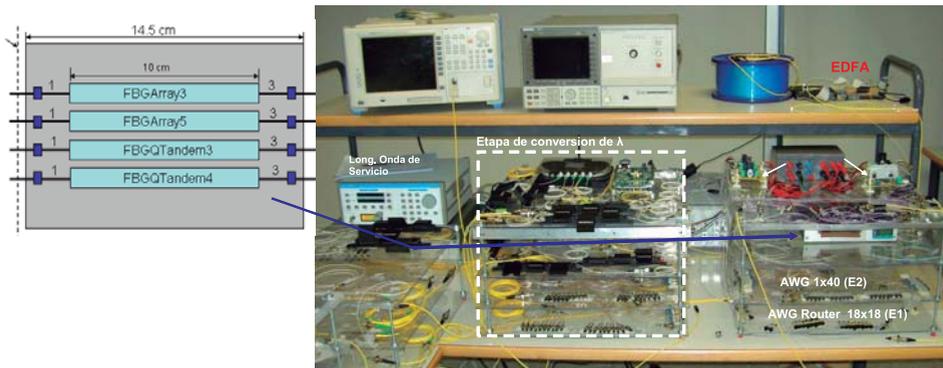
**Figura 5.23:** Fotografía del demostrador implementado en el proyecto IST LABELS.

El siguiente bloque que encuentran las señales de carga son las etapas de conversión de longitud de onda. En primer lugar se realiza una conversión de longitud de onda de la carga hasta una longitud de onda de servicio mediante la técnica de modulación cruzada de ganancia (Cross Gain Modulation, XGM) en un amplificador óptico de semiconductor (Semiconductor Optical Amplifier, SOA), SOA-XGM, y en una segunda etapa se emplea un módulo conversor basado en modulación cruzada de fase (Cross Phase Modulation, XPM) en SOAs en una estructura interferométrica integrada de tipo Mach-Zehnder (SOA-XPM). La doble etapa de conversión cumple varios objetivos. En primer lugar permite la conversión de la longitud a cualquier canal de salida dentro de la banda de trabajo pero también sobre la misma longitud de onda original si así lo exigiera la tabla de enrutamiento del nodo. Por otro lado la doble etapa permite el ajuste preciso de la conversión de longitud de onda para realizar tareas de regeneración de los datos mejorando la calidad del diagrama de ojos y compensando penalizaciones sufridas en la transmisión y/o el prefiltrado. Nótese que la segunda etapa de conversión (XPM en el esquema) se encuentra alimentada por sendas fuentes láser sintonizables que son controladas electrónicamente por la FPGA

para ajustarse a la longitud de onda dictada por la información de cabecera, la longitud de onda de entrada y la información disponible en la tabla de enrutamiento. La misma señal de portadora óptica se deriva también a la etapa de generación de la nueva etiqueta SCML a través de un acoplador y se modula sobre ella la señal de radiofrecuencia a 18 GHz con la nueva etiqueta. Ambas señales (carga convertida en XPM y nueva etiqueta SCML generada) son combinadas ópticamente mediante un FBG Array (identificados como FBGArray3 y FBGArray5) como se describió en la sección 5.2.1.



**Figura 5.24:** Fotografía de la etapa de generación del nodo transmisor y la etapa de demultiplexación WDM con prefiltrado de etiquetas SCML del nodo enrutador, así como el detalle de la caja de control térmico de los dispositivos FBGs (FBGArray4 y FBGArray7 del nodo transmisor, FBGx@Tandem1 y FBGx@Tandem2 de la etapa de prefiltrado del nodo enrutador).



**Figura 5.25:** Fotografía de la etapa de re-escritura de etiqueta del nodo enrutador y demultiplexación WDM con prefiltrado de etiquetas SCML en el nodo receptor con detalle de la caja de control térmico de los dispositivos FBGs (FBGArray3 y FBGArray5 de la etapa de re-escritura, FBGQTandem 3 y 4 del nodo receptor).

Finalmente los dos canales con los nuevos paquetes SCML generados (convertidos en longitud de onda y con nueva etiqueta) se aplican a un elemento de enrutamiento, que en el caso del demostrador ha sido un AWG de 18x18 puertos de entrada/salida con propiedades de interconexión cíclicas. Esta estructura permite direccionar cada paquete hacia cualquier puerto de salida sin más que asignar la longitud de onda adecuada,

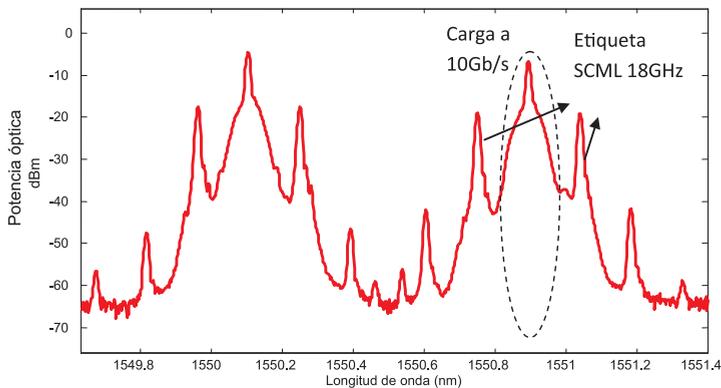
aunque en una situación de aplicación real necesitaría ser complementada con elementos adicionales de multiplexación que permitan asignar puertos de salida y longitudes de onda de forma independiente. La etapa final constituye el equivalente al nodo frontera receptor por el que los paquetes SCML son detectados y abandonan la red AOLS WDM-SCML (E). En este caso se ha utilizado una estructura de prefiltrado similar a la empleada en (B1) pero con un único AWG y una FBG para separar la carga y etiqueta (FBGQTandem 3 y 4). Las figuras 5.24 y 5.25 muestran en detalle de los componentes empleados en nodo así como los dos subconjuntos de dispositivos FBG empleados que se encuentran agrupados en dos cajas de control térmico para mantener la estabilidad de longitud de onda. El ajuste en longitud de onda de las bandas de paso tanto de FBG Arrays como FBG Tandem es de suma importancia dado que ligeros desalineamientos del orden del 5-10 % del ancho de banda a 3dBs disponible conduce a incrementos de penalización superior a 1dB en el diagrama de ojos de la carga detectada al final del nodo. Para dicho alineamiento se ha procedido a tensionar por separado cada uno de los componentes hasta conseguir un óptimo solapamiento espectral y finalmente pegarlos a un sustrato metálico que se mantiene a una temperatura estable. Este proceso se ha organizado en dos grupos de FBGs alojados en dos cajas de control térmico como las mostrados en las figuras 5.24 y 5.25.

### 5.3.1. Verificación de la calidad de carga y etiqueta.

A continuación se muestran los resultados experimentales tanto de carga como etiqueta para el demostrador completo, siendo la secuencia seguida por la señal la siguiente:

El **Nodo transmisor** se encarga de generar los canales SCML a través de los pasos siguientes:

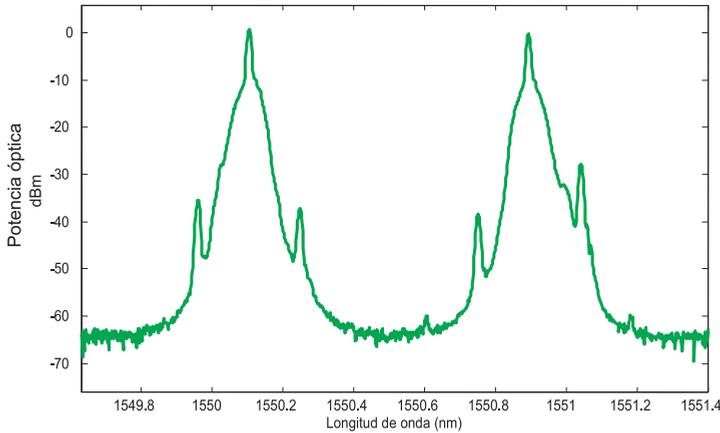
1. Generación de carga a 10Gb/s y generación de etiqueta SCM a 155Mb/s@18GHz.
2. Combinación de ambas señales mediante estructura de combinación óptica paralela empleando FBG Array para generar cada uno de los canales SCML.
3. Multiplexación WDM de los dos canales ITU (C37 y C39) cada uno de los cuales transporta un paquete SCML descrito previamente mediante un AWG. En la figura 5.26 se muestra los espectros de ambos canales SCML.



**Figura 5.26:** Señal conjunta del multiplex de C39 y C37 (izquierda y derecha) con los paquetes SCML.

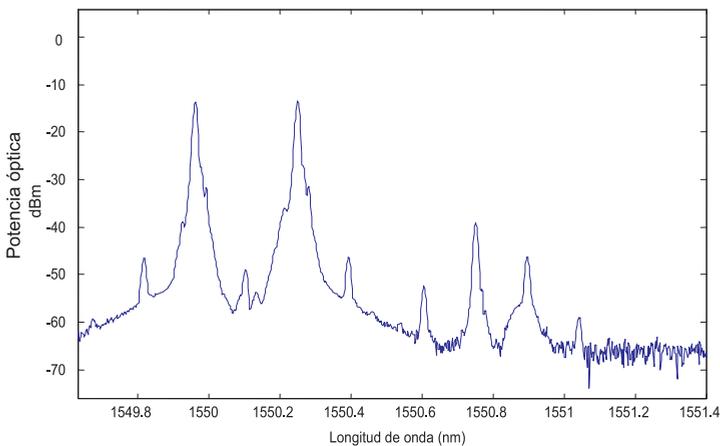
Tras la transmisión a través de 24km de fibra monomodo estándar se aplican ambos canales SCML al *nodo enrutador*, el cual realiza las siguientes funciones:

1. Demultiplexación WDM de los canales SCML a través de AWGs.
2. Separación de carga y etiqueta SCML de cada canal con las FBG tándem.

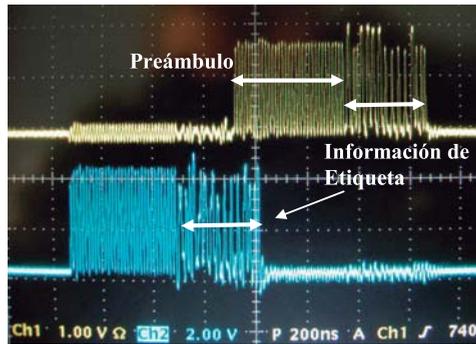


**Figura 5.27:** Espectro de la señal de carga reflejada de los dispositivos FBG tándem y medida en MP2.

La figura 5.27 muestra la señal de carga reflejada por los dispositivos FBG tándem justo a la salida del primer circulador (punto indicado como MP2 en el esquema de la figura 5.22). Nótese como las señales de etiqueta SCML se han reducido por debajo de 30-40 dB respecto de la portadora óptica de la señal de banda base de los canales. Por otro lado la señal transmitida a través de las FBG tándem se muestra en la figura 5.28. Se observa como la portadora óptica se encuentra atenuada 40 dB respecto del valor de las señales de la subportadora de radiofrecuencia de etiqueta SCML prefiltrada. Por otro lado la señal del canal 37 se encuentra muy atenuada debido al demultiplexor AWG.

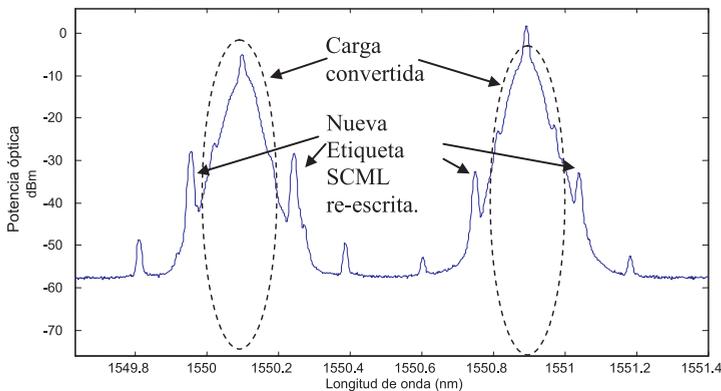


**Figura 5.28:** Espectro de la señal de etiqueta SCML transmitida a través del FBG tándem correspondiente al canal C39.



**Figura 5.29:** Señal eléctrica de banda base de etiqueta: (traza superior) generada para el paquete SCML en el nodo transmisor, (traza inferior) detectada tras ser prefiltrada en el nodo enrutador.

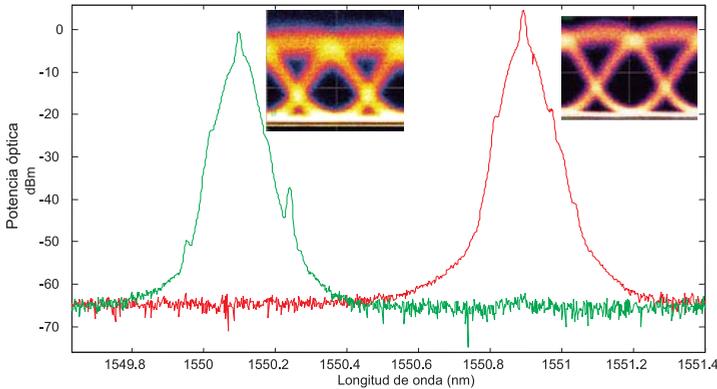
La figura 5.29 muestra la señal de etiqueta generada en el nodo transmisor y va a ser modulada en amplitud sobre la subportadora de radiofrecuencia de 18GHz en el paquete SCML (traza superior), así como la señal de etiqueta prefiltrada ópticamente (separada de la carga) y detectada en el nodo enrutador (traza inferior). Ésta señal se aplica a unos de los puertos de entrada de la FPGA que extraerá el sincronismo y muestreará la señal para recuperar la información de cabecera (información de enrutamiento del paquete) contenida en su parte final, tal como se muestra en dicha figura.



**Figura 5.30:** Señales de carga convertidas en longitud de onda y etiqueta SCML re-escrita en el nodo enrutador.

Llegados a este punto la información de cabecera del paquete SCML entrante se emplea para determinar la nueva longitud de onda del paquete saliente así como el puerto de salida. Por lo tanto la siguiente operación del sistema de control (C en el esquema 5.22) es la activación de los láseres sintonizables controlados electrónicamente y el envío de los comandos para el cambio de longitud de onda deseada. Se han empleado láseres de la marca INTUNE con velocidades de activación y control de longitud de onda por debajo de los 200 ns. En paralelo con dicha activación se transmite la nueva información de cabecera ya modulada en amplitud sobre la señal de radiofrecuencia de 18 GHz a la etapa de re-escritura de etiquetas. Como se indicó anteriormente la carga reflejada debe seguir un itinerario diferente a la etiqueta pero ambas señales deben coincidir en el tiempo en el puerto de salida del enrutador para lo que se emplean retardos de fibra óptica. La figura

5.30 muestra el espectro de salida del nodo enrutador una vez se han combinado carga y etiqueta. Recuérdese que la carga ha sido convertida para ambos paquetes SCML a las nuevas longitudes de onda.



**Figura 5.31:** Señales de carga para los canales C37 y C39 detectada tras el prefiltrado en el nodo final.

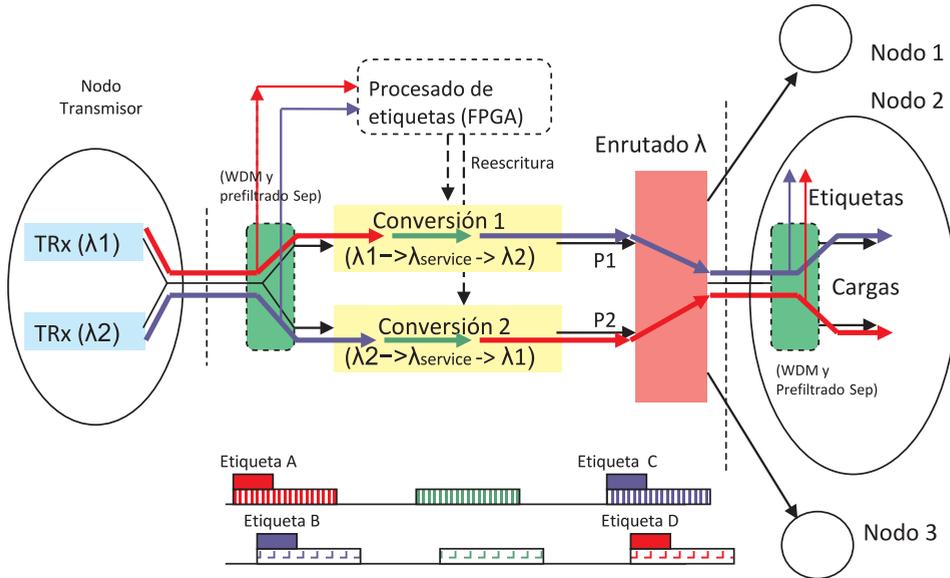
Finalmente los dos nuevos paquetes SCML son transmitidos al *nodo receptor* donde se demultiplexan y se separan de nuevo carga y etiqueta mediante dos FBGs. La figura 5.31 muestra el espectro de las señales de carga finales antes de la detección así como los diagramas de ojos obtenidos. Los resultados de factor de calidad para ambos fueron de  $QF=4.8$  y  $QF=6.6$  respectivamente. En el primer caso el factor de calidad se ve reducido fundamentalmente por el peor comportamiento de la etapa de conversión de longitud de onda del fabricante Alcatel que introducía mucho más ruido que en el segundo caso (etapa de la compañía HHI) no observándose efectos apreciables de interferencia de etiqueta sobre carga. Es importante destacar la dificultad de obtener mejores resultados del factor de calidad  $QF$  ( $QF < 6.5-7$ ) debido a la gran cantidad de veces que la señal de carga es filtrada por los dispositivos FBG (tanto Arrays como Tandems), lo que supone truncamientos acumulativos en caso de que las longitudes de onda no ajusten casi a la perfección añadido a las distorsiones en el retardo de grupo también acumulativas.

### 5.3.2. Prueba de concepto de la conmutación de paquetes.

El comportamiento completo del nodo desde un punto de vista de la conmutación de paquetes se ha llevado a cabo empleando una estructura de enrutamiento basada en un dispositivo AWG 18x18 en la etapa final del nodo enrutador. Aunque esta estructura presenta limitaciones en el enrutamiento como se ha mencionado, permite una serie de pruebas de concepto del proceso seguido en el nodo enrutador por la señal de carga y etiqueta, de forma que en función de la longitud de onda de conversión de los paquetes SCML generados se pueda direccionar los mismos a diferentes puertos de salida del nodo enrutador.

Para realizar la demostración de enrutamiento de paquetes se detalla uno de los 4 escenarios planteados en la figura 5.32. Como se muestra, las etapas de conversión de longitud de onda y reescritura de etiquetas permiten cambiar el color (canal ITU) de cada paquete de salida de forma que el enrutamiento se produce de forma pasiva en el enrutador AWG 18x18. En el ejemplo de la figura, los paquetes generados en el nodo transmisor en  $\lambda_1$  (rojo) y  $\lambda_2$  (azul) son transmitidos y a la entrada del nodo enrutador son demultiplexados

y prefiltrados, separando las etiquetas de las cargas (bloque punteado). La información de las etiquetas (etiquetas A y B en el esquema de la figura 5.32) son detectadas y se generan nuevas etiquetas (etiquetas C y D en la figura 5.22) para los paquetes de salida. En este momento se decide también la longitud de onda de salida de cada paquete pudiendo ser incluso la misma pero siempre manteniendo el proceso de doble conversión (XGM+XPM) mediante una longitud de onda de servicio.



**Figura 5.32:** Esquema de flujo de carga y etiqueta

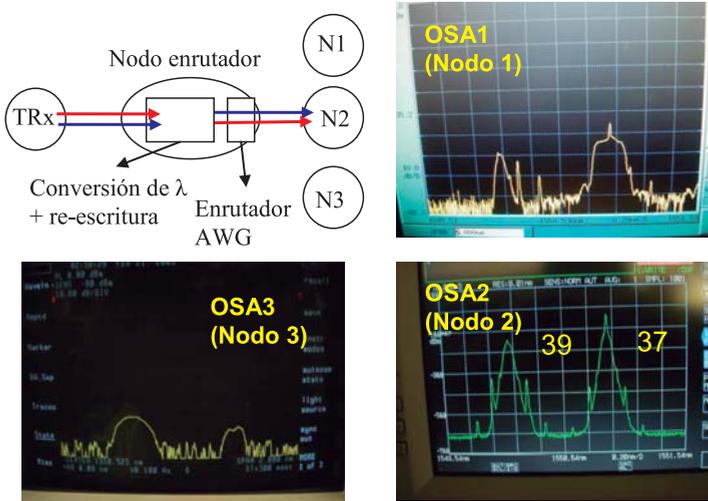
La forma de interconexión entre las etapas de conversión y reescritura de etiquetas y el elemento enrutador determinarán la dirección de salida de los paquetes para cada caso de longitud de onda saliente. Para la prueba de concepto se emplearon dos puertos de entrada adyacentes del AWG 18x18 (puertos P1 y P2 en el esquema la figura 5.32) y tres puertos de salida adyacentes que se conectarían a los enlaces de salida hacia tres nodos remotos de la red (N1 a N3 en lo sucesivo). Dada las propiedades de desplazamiento de canal ITU frente al puerto de entrada/salida del AWG la matriz de interconexión se puede expresar mediante la siguiente tabla:

	Nodo N1	Nodo N2	Nodo N3
P1	$\lambda_1$	$\lambda_2$	
P2		$\lambda_1$	$\lambda_2$

**Tabla 5.1:** Matriz de interconexión del enrutador AWG.

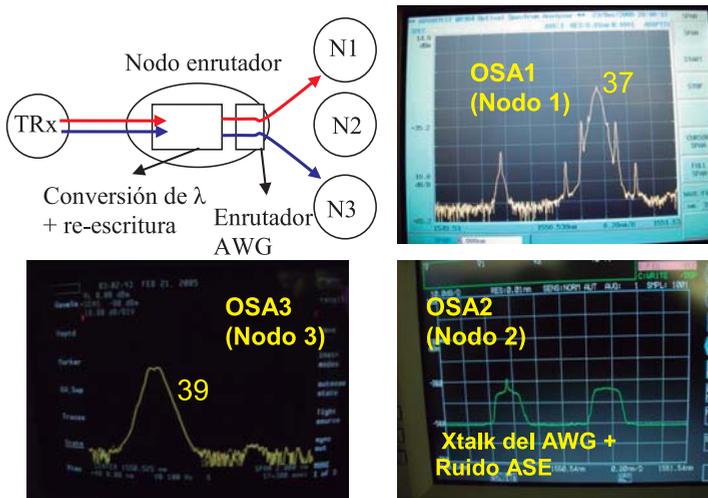
El ejemplo de la figura 5.32 muestra el caso correspondiente a la columna central de la tabla 5.1 de forma que los dos paquetes confluyen al puerto central en dirección al nodo remoto N2 (escenario 1). Otros tres casos se pueden producir dirigiendo los paquetes de salida a N1 y N3 (escenario 2), a N1 y N2 (escenario 3) y finalmente a N2 y N3 (escenario 4), o como se ilustra en las figuras 5.33 a 5.34.

Para la verificación de los cuatro escenarios se dispuso de tres analizadores de espectros ópticos (OSA) que reciben las señales destinadas a los nodos N1 a N3.



**Figura 5.33:** Escenario de conmutación 1. Paquete en  $\lambda_1$  es convertido a  $\lambda_2$  y viceversa.

En el escenario 1 se han convertido ambos paquetes de su longitud de onda inicial a la longitud de onda cruzada confluendo ambas señales en el nodo 2. El OSA2 muestra los dos espectros ópticos donde se observa tanto la señal de carga como la señal de etiqueta SCML. En OSA1 y OSA2 se observa la señal de diafonía intercanal debido a la relación de supresión del enrutador AWG.



**Figura 5.34:** Escenario de conmutación 2. Paquete en  $\lambda_1$  es convertido a  $\lambda_1$  y paquete en  $\lambda_2$  es convertido a  $\lambda_2$ .

La figura 5.34 muestra en caso en que los paquetes son convertidos a su misma longitud de onda por lo que según la tabla 5.1 los paquetes SCML se dirigen a los nodos N1 ( $\lambda_1$ ->ch37) y N3 ( $\lambda_2$ ->ch39). OSA 1 muestra el espectro SCML típico mientras que en OSA3

no se aprecian las subportadoras debido a la limitada resolución del equipo. Finalmente en OSA2 se observa el residuo de crosstalk intercanal del AWG y el ruido ASE generado por el EDFA empleado entre en nodo enrutador y el nodo 2.

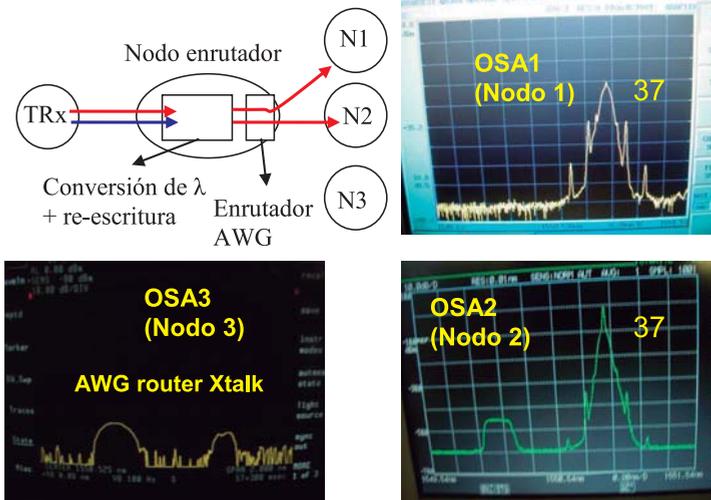


Figura 5.35: Escenario de conmutación 3. Paquete en  $\lambda_1$  es convertido a  $\lambda_2$  y paquete en  $\lambda_2$  es convertido a  $\lambda_1$ .

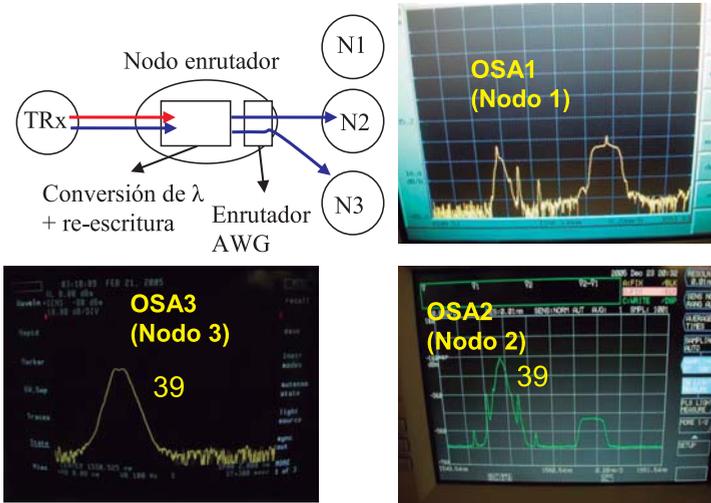


Figura 5.36: Escenario de conmutación 3. Paquete en  $\lambda_1$  es convertido a  $\lambda_2$  y paquete en  $\lambda_2$  es convertido a  $\lambda_1$ .

Finalmente las figuras 5.35 y 5.36 muestran los resultados para las dos últimas combinaciones donde la longitud de onda de uno de los paquetes es convertida de  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  o viceversa y la longitud de onda del otro paquete se mantiene (siempre con conversión). Como en los casos anteriores se observa las señales SCML en los canales 37 direccionadas a los nodos N1 y N2 (escenario3), así como en el canal 39 pero direccionadas a los nodos N2 y N3 (escenario4).



# Capítulo 6

## Conclusiones y líneas futuras.

En este capítulo se describen las conclusiones extraídas en trabajo de tesis, así como las líneas futuras de trabajo originadas a partir del mismo.

### 6.1. Conclusiones.

En esta tesis doctoral se han estudiado estructuras encargadas de la generación, reescritura y detección por prefiltrado óptico de paquetes ópticos SCML basados en moduladores electroópticos (Electro-Optical Modulator, EOM) y redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG) para redes todo ópticas de intercambio de etiquetas (AOLS) con multiplexación por subportadora de radiofrecuencia de la etiqueta (SCML).

Concretamente en el **capítulo 2** se ha presentado un modelo analítico que permite evaluar la calidad de las señales que integran un paquete óptico SCML cuando se emplean estructuras degeneración basadas en modulador electro-óptico y red de difracción de Bragg, así como técnicas de prefiltrado óptico basadas en red de difracción de Bragg en detección. Concretamente, se han estudiado tanto el esquema de generación que emplea un único EOM como la estructura de combinación óptica paralela basada en dos EOM y una red de difracción de Bragg. Para cada uno de los esquemas analizados se ha obtenido dicho modelo analítico en dos fases. En un primer momento se ha obtenido la expresión analítica de fotocorriente detectada de las señales de carga y etiqueta del paquete considerando que las respuestas de los dispositivos empleados son ideales (filtros eléctricos, fibra, red de difracción de Bragg). A partir de la fotocorriente se han definido los parámetros de calidad de las señales individualmente (factor de calidad - QF, apertura del ojo - OE, relación de extinción -ER), así como la definición de un parámetro que determina la calidad del paquete SCML en su conjunto  $FM_{SCML}$ . Cabe destacar que gracias a este primer modelo es posible observar rápidamente como se combinaban las señales de carga y etiqueta a la hora de generar el paquete SCML, identificando las interferencias existentes entre ellas tanto en la generación como en el proceso de detección. Posteriormente, el modelo analítico inicial se ha completado incorporando unos coeficientes que incluyen los efectos de las respuestas frecuenciales reales de los dispositivos empleados en el esquema (dispositivos eléctricos en el transmisor y receptor, fibra óptica, FBGs) sobre la forma de los bits de los datos de carga y etiqueta. Esto permite realizar un estudio realista, cuyos resultados obtenidos con dichos modelos teóricos se han validado con el programa de simulación comercial *VPISystem<sup>TM</sup>*.

Para la estructura de combinación empleando un único modulador se han estudiado cuatro configuraciones con diferentes implicaciones de tipo práctico tanto a nivel espectral

como de distorsión: Single Drive, Dual Drive Diferencial, Dual Drive Push Pull DSB y SSB. Se ha propuesto la estructura de combinación óptica paralela basada en una red de difracción de Bragg, FBGTx, que se encarga de eliminar el término de etiqueta banda base generado por el modulador electro-óptico, además de combinar ópticamente la carga y etiqueta del paquete SCML. Así mismo, se ha estudiado el empleo de la etapa de prefiltrado óptico basada en una red de difracción de Bragg, FBGRx para separar ópticamente las dos señales que integran el paquete SCML.

A continuación, en el **capítulo 3** se han determinado las ecuaciones de diseño de los parámetros de interés en las respuestas de transmisión y reflexión de las FBGs empleadas de forma que permitan eliminar las distorsiones existentes en el paquete SCML en las tres configuraciones propuestas del esquema de combinación óptica paralela.

Para llevar a cabo este estudio, en primer lugar se han determinado las penalizaciones de las aperturas de los diagramas de ojos de carga y etiqueta para la estructura paralelo de dos EOM, diferenciando la contribución sobre las mismas asociada al batido de la portadora óptica de las asociadas a las interferencias existentes entre las señales de carga y etiqueta del paquete.

Se han determinado los parámetros de las FBGs encargados de eliminar las distorsiones existentes en el paquete SCML para las tres configuraciones propuestas de la estructura según se reflejen o transmitan carga y/o etiqueta en el proceso de generación o detección y finalmente se han determinado las ecuaciones de diseño de los parámetros de interés en las respuestas de transmisión y reflexión de las FBGs empleadas ( $T$ , MSLR,  $\Delta f$ ,  $BW_{3dB}$  y Roll-off) de forma que permitan eliminar las distorsiones existentes en el paquete SCML en las tres configuraciones propuestas del esquema 2EOMP.

Dado los requerimientos de ancho de banda a la hora de transmitir el paquete óptico y el interés por conseguir reducirlo, en el **capítulo 4** se ha realizado un estudio del grado de compactación espectral del paquete SCML que se puede conseguir con las FBGs diseñadas anteriormente. Para ello ha sido necesario definir el parámetro *Figura de mérito espectral* del paquete SCML (FOM), que va a determinar el grado de compactación espectral del paquete SCML para las estructuras de generación propuestas. En esta tesis se ha propuesto y comprobado experimentalmente estrategias para mejorar ese grado de compactación espectral, consiguiendo valores de  $FOM \approx 1.1$  (paquete SCML tasa de transmisión de carga de 20Gb/s y etiqueta localizada a 18.3GHz con tasa de 622Mb/s), récord de compactación espectral de paquetes SCML en ese momento para la estructura de combinación óptica paralela.

Por último, en el **capítulo 5** se presentan los experimentos llevados a cabo para la demostración práctica de las estructuras de combinación en paralelo basadas en dispositivos FBG Array, así como la propuesta de componentes de tipo FBG Tandem para el prefiltrado de etiqueta y carga con óptimas prestaciones tanto en la funcionalidad de rechazo mutuo de carga y etiqueta como en la preservación de la calidad de la señal de carga. En este capítulo también se resume el empleo de estos componentes en el contexto del demostrador de red de conmutación de paquetes óptico AOLS WDM-SCML desarrollado en el proyecto europeo IST-LABELS. En este demostrador se verificó la generación, reescritura y detección de paquetes ópticos, donde se ha evaluado la calidad de los paquetes en distintos puntos del sistema, además del enrutado óptico de varios paquetes de forma simultánea.

## 6.2. Líneas abiertas.

Del trabajo realizado en esta tesis, a juicio del autor, se pueden derivar una serie de líneas de investigación que se pasan a describir:

- Impacto de la degradación por dispersión cromática en las distintas configuraciones tanto para combinación electrónica mediante un solo modulador, como para combinación paralela. Hay que recordar que se han incluido en el modelo analítico los efectos de un filtro óptico arbitrario insertado tras la generación y previo a la detección por lo que la inclusión de dispersión cromática y su estudio para las diferentes estructuras resulta una línea de investigación muy directa. Por ejemplo se ha observado de los resultados del modelo como algunas de las señales de interferencia aparecen modulada en fase en el espectro óptico y desaparecen tras la detección cuadrática. Esta situación cambia cuando existe dispersión cromática previa a la detección produciendo previsiblemente efectos de incremento de crosstalk mutuo.
- En lo que respecta a las características de las FBGs empleadas tanto en la estructura de combinación óptica paralela como en la etapa de prefiltrado, es interesante analizar la influencia del rizado del módulo y del retardo de grupo en la banda de paso de reflexión sobre la calidad de las señales que integran el paquete óptico. Este estudio ya se ha comenzado pero no se ha incluido en el presente documento por motivos de espacio. En éste se pretende establecer unas cotas máximas de diseño de dichos parámetros en función de la penalización de la calidad de del paquete óptico y de esta manera poder relacionar dichas cotas con los parámetros tecnológicamente alcanzables con los sistemas de fabricación actuales y las técnicas de síntesis de FBGs multi-banda.
- En lo que respecta a la estructura de los nodos transmisores y receptores, se abre la posibilidad de implementar estructuras de prefiltrado óptico basadas en FBG de tipo Array y Tandem que sean más eficientes en cuanto al número de dispositivos empleados, pérdidas totales y menos restricciones en las características de los mismos. Estas nuevas estructuras partirían de la base de las tres estrategias de combinación paralelo analizadas en los capítulos 3 y 4 en combinación con AWGs de múltiples puertos de entrada.
- Otra línea de extensión de los resultados de la tesis es la introducción en el modelo analítico de circuitos de predistorsión previos al EOM o la sustitución del EOM por el modelo de un Modulador de Electro-Absorción (EAM) que permita estudiar el comportamiento de las estructuras basadas en FBGs en combinación con este dispositivo semiconductor que presenta características propias de distorsión y chip.
- Diversos autores han propuesto técnicas de generación de paquetes empleando modulaciones especiales para la carga como banda lateral vestigial, o modulaciones digitales multinivel, pero no utilizando dispositivos FBG como los estudiados en la tesis. En este sentido una posible línea de trabajo derivada de la tesis consistiría en realizar los estudios del grado de compactación de las distintas estructuras de FBGs a los tipos de modulaciones propuestos en la literatura teniendo en cuenta que cada una de ellas presentará diferente sensibilidad al truncamiento espectral, a los rizados de retardo de grupo y a las interferencia entre carga y etiqueta.

- Finalmente una línea de investigación más general y abierta pero que se apoyaría en las conclusiones y límites estudiados para las estructuras FBG propuestas consistiría en explorar las posibilidades y restricciones de la implementación de dichas estructuras en componentes ópticos integrados, atendiendo al tipo de dispositivos de modulación como de filtrado óptico basados en estructuras de Bragg y/o estructuras tipo AWG o en combinación con otros dispositivos interferométricos.

# Apéndice A

## Señal digital con formato NRZ

### A.1. Características de una señal digital NRZ.

La señal digital con formato de codificación de línea NRZ (Not Return to Zero) empleada en este estudio, presenta las siguientes características:

- La señal digital  $x(t)$  está constituida por una secuencia de símbolos  $a_k$  multiplicados por la forma del pulso de señalización  $p(t)$ , tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k p(t - kT_B) \quad (\text{A.1})$$

-La velocidad de transmisión de la señal  $x(t)$  es  $BR_S$  bit/seg. y la duración de cada bit es  $T_B = 1/BR_S$  segundos.

- Dado el tipo de codificación NRZ, el pulso  $p(t)$  corresponde a un pulso rectangular con duración el tiempo de un bit,  $p(t) = \prod(t/T_B)$ .

- Los símbolos de la secuencia  $a_k$  se van a considerar independientes e incorrelados entre sí. Cada símbolo  $k$ -ésimo de la secuencia  $a_k$  se modela como una variable aleatoria discreta constituida por dos sucesos equiprobables, asociados cada uno a los dos niveles que puede tomar la señal NRZ ( $A_0, A_1$ ). Estadísticamente, esta se viene caracterizada a través de una media  $\mu_a$  y una desviación típica  $\sigma_a$ , deducidas en las siguientes fórmulas:

$$\mu_a = \sum_{i=1}^2 a_i \cdot f dp(a_k = a_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 a_i = \frac{A_0 + A_1}{2} \quad (\text{A.2})$$

$$\sigma_a = \sum_{i=1}^2 (a_i - \mu_{a_k})^2 \cdot f dp(a_k = a_i) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (a_i - \mu_{a_k})^2 = \frac{|A_1 - A_0|}{2} \quad (\text{A.3})$$

- La función de densidad espectral de potencia de la señal  $x(t)$  se puede expresar como:

$$G_x(f) = \frac{\sigma_a^2 |P(f)|^2}{T_B} + \frac{\mu_a^2}{T_B^2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| P\left(\frac{k}{T_B}\right) \right|^2 \delta\left(f - \frac{k}{T_B}\right) \quad (\text{A.4})$$

siendo  $P(f) = T_B \sin c(f \cdot T_B)$  la respuesta en frecuencia del pulso  $p(t)$ . Sustituyendo  $P(f)$  en A.4, ésta queda simplificada en A.5, cuyo espectro se muestra en la figura ??.

$$G_x(f) = \sigma_a^2 \cdot T_B \cdot \sin^2(f \cdot T_B) + \mu_a^2 \cdot \delta(f) \quad (\text{A.5})$$

## A.2. Cálculo de los parámetros de calidad en una señal digital NRZ

En este apartado se va a obtener la expresión varios parámetros que son empleados para evaluar la calidad de una señal digital en recepción. Concretamente son la Probabilidad de Error, BER ( Bit Rate Error), el factor de Calidad, QF ( Quality Factor), y la relación de extinción, ER ( extinction Rate).

Partimos de una señal digital  $x(t)$  se transmite por un medio hasta que llega al receptor digital. Como consecuencia de esta transmisión, en recepción tenemos la señal digital  $x(t)$  a la que se le añade varias fuentes de ruido  $n_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Por lo tanto la señal en el receptor se puede expresar de la siguiente forma:

$$y(t) = x(t) + \sum_{i=1}^N n_i(t) \quad (\text{A.6})$$

Como hipótesis del modelo se van a considerar:

- La señal  $x(t)$  es una señal digital NRZ donde sus características están definidas en A.1.
- Cada fuente de ruido  $n_i(t)$  se modela como una variable aleatoria con función de distribución de probabilidad gaussiana, caracterizada por una media,  $\mu_i$  y una desviación típica, varianza  $\sigma_i$ . Cada fuente de ruido es independiente e incorreladas con las demás.

La señal  $y(t)$  recibida toma unos valores medios asociados a los bits 0 y 1 a los que se les añade una componente aleatoria producida por la suma de todos los ruidos. Es el receptor cuando esta señal se muestrea en unos instantes concretos,  $t_k$ , que coinciden con la mitad del bit, y se compara con un nivel umbral,  $y_u$ , previamente establecido. Se decidirá si el bit de la señal recibida es 0 o 1, en función de que el nivel de la misma en el instante de muestreo,  $y(t_k)$  sea inferior o superior al umbral  $y_u$ .

Por lo tanto, si al muestrear la señal recibida cuando se ha transmitido un bit 0 y el nivel obtenido sea superior al umbral,  $y(t_k) > y_u$ , se interpretará erróneamente que el bit transmitido era un 1. De igual modo ocurre cuando se ha transmitido un 1 y el nivel de la señal recibida es menor que el umbral,  $y(t_k) < y_u$ . Así pues, se puede calcular la Probabilidad de Error, BER, como:

$$BER = P(1/0)P(0) + P(0/1)P(1) \quad (\text{A.7})$$

donde  $P(1/0)$  es la probabilidad condicional de habiendo transmitido un bit 0 se reciba un bit 1,  $P(0/1)$  es la probabilidad condicional de habiendo transmitido un bit 1 se reciba un bit 0,  $P(0)$  y  $P(1)$  son la probabilidad de transmitir un bit 0 o 1 respectivamente. Tal como se indicó en A.1, los bits 0 y 1 son equiprobables, por lo que  $P(0) = P(1) = 1/2$ .

Para determinar la  $P(1/0)$  y  $P(0/1)$ , debemos tener en cuenta que la señal  $y(t)$  es una función aleatoria con una función densidad de probabilidad gaussiana <sup>1</sup>, pero diferente según el bit transmitido sea 0 o 1. Concretamente, el valor medio de la señal recibida es  $y_0$

<sup>1</sup> la suma de N señales aleatorias  $n_i(t)$ , independientes entre sí y con funciones de densidad de probabilidad gaussianas de con media  $\mu_i$  y varianza  $\sigma_i^2$ , es una señal aleatoria con una función densidad de probabilidad gaussiana de media  $\mu = \sum_{i=1}^N \mu_i$  y varianza  $\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \sigma_i^2$ .

o  $y_1$  y la desviación típica  $\sigma_0$  o  $\sigma_1$  según se haya transmitido un bit 0 o 1 respectivamente. Por lo tanto, el valor de  $P(1/0)$  se puede expresar como:

$$P(1/0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{y_1 - y_u}{\sigma_1 \sqrt{2}} \right) \quad (\text{A.8})$$

y para  $P(0/1)$ :

$$P(0/1) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{y_u - y_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} \right) \quad (\text{A.9})$$

donde  $\operatorname{erfc}(x)$  es la función de error complementaria definida como:

$$\operatorname{erfc}(x) = \int_{z=x}^{\infty} e^{-z^2} dz \quad (\text{A.10})$$

Variando el valor umbral,  $y_u$  se puede conseguir minimizar el BER cuando  $P(0/1) = P(1/0)$ . Así pues, ahora debemos igualar los argumentos de las expresiones A.2 y A.2,

$$\frac{y_1 - y_u}{\sigma_1 \sqrt{2}} = \frac{y_u - y_0}{\sigma_0 \sqrt{2}} = QF \quad (\text{A.11})$$

y despejando  $y_u$  de la igualdad anterior, obtenemos que el valor óptimo del umbral vale:

$$y_u = \frac{y_1 \sigma_0 - y_0 \sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{A.12})$$

La expresión que define el BER en función de los niveles medios y desviaciones típicas de la señal se consigue sin más que substituir A.12, y en A.7. De esta forma el BER se expresa como:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{QF}{\sqrt{2}} \right) \quad (\text{A.13})$$

donde QF se define como el factor de calidad, también empleado este último cuando se pretende evaluar la calidad de la señal digital en el receptor. Concretamente, se puede obtener una expresión cerrada del mismo si más que substituir A.12 en A.11:

$$QF = \frac{y_1 - y_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{A.14})$$

Otro parámetro de calidad que se define es la Relación de extinción, ER ( Extinction Rate ), que relaciona los niveles medios de la señal a través de la siguiente expresión:

$$ER = \frac{y_0}{y_1} \quad (\text{A.15})$$

Una forma de calcular los parámetros de calidad BER, QF y ER de una señal digital NRZ en la práctica es mediante el diagrama de ojos obtenido de la misma. En concreto, se realiza un estudio estadístico inicial del mismo que permite extraer los parámetros básicos  $y_0$ ,  $y_1$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  de la señal. Posteriormente, se substituyen éstos en las expresiones A.14, A.13 y A.15 para determinar los valores del QF, BER y ER de la señal digital baja análisis. En la figura ?? se muestra el diagrama de ojos de una señal digital NRZ.



# Apéndice B

## Cálculo de coeficientes de corrección por efecto de las respuestas de los dispositivos empleados en el sistema SCML

### B.1. Configuración basada en un único EOM

En la figura 2.10 del capítulo 2 se muestra el esquema general del modelo que describe un sistema SCML básico. En él se muestran los diversos dispositivos (filtros eléctricos del bloque generador de datos de carga/etiqueta, fibra óptica y filtro óptico FBG) cuyas respuestas afectan sobre las señales transmitidas y deben ser consideradas en el modelado realizado en la subsección 2.1.1. Cada uno de ellos se puede modelar por un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI)<sup>1</sup>.

Para poder llevar a cabo este estudio, las señales de carga,  $P(t)$ , y etiqueta,  $L(t)$ , van a estar representadas por secuencias pseudoaleatorias de  $N_c$  y  $N_e$  bits respectivamente, y con relación  $N_c = N_e \cdot CoefBR_{pL}$ , donde  $CoefBR_{pL} = BR_p/BR_L$  indica la relación entre las tasas de bit de carga y etiqueta. En este caso, la señal de carga se expresa como:

$$P(t) = \sum_{n=0}^{N_c-1} (P_n - 0,5) p_c(t - nT_{Bitc}) \quad (B.2)$$

donde  $P_n$  representa el valor del bit  $n$ -ésimo de la secuencia de datos de carga a aplicar en el puerto eléctrico del EOM (toma valores 1 o 0 según sea un bit uno o cero), y  $p_c(t) = \prod(t/T_{Bitc})$  es la forma del pulso cuadrado de la señal de carga ideal con formato NRZ. Esta señal de datos ideal es transmitida por varios dispositivos eléctricos (filtros, combinadores y amplificadores de RF) que integran el generador de datos de carga, caracterizado por su respuesta impulsiva  $h_{T_{xep}}(t)$ . La señal de salida del mismo será aplicada al puerto

---

<sup>1</sup> La señal,  $y(t)$ , a la salida de un dispositivo modelado por un sistema LTI se puede expresar a partir de la señal de entrada,  $x(t)$ , y de su respuesta impulsiva del mismo,  $h_{LTI}(t)$ , tal como se describe en la siguiente ecuación:

$$y(t) = x(t) \otimes h_{LTI}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) H_{LTI}(f) e^{j2\pi ft} df \quad (B.1)$$

siendo  $\otimes$  el operador convolución,  $X(f)$  y  $H_{LTI}(f)$  las respuestas frecuenciales de la señal de entrada y del sistema LTI.

eléctrico del EOM, pudiéndose expresar como:

$$P^{Filtrada}(t) = P(t) \otimes h_{T_{xep}}(t) \quad (B.3)$$

De igual forma, la señal de etiqueta se expresa como:

$$L(t) = \sum_{n=0}^{N_L-1} (L_n - 0,5) p_L(t - nT_{BitL}) \quad (B.4)$$

donde  $L_n$  representa el valor del bit  $n$ -ésimo de la secuencia de datos de etiqueta a aplicar en el puerto eléctrico del EOM (toma valores 1 o 0 según sea un bit uno o cero), y  $p_L(t) = \prod (t/T_{BitL})$  es la forma del pulso cuadrado de la señal de etiqueta ideal con formato NRZ. Esta señal de datos ideal es transmitida por varios dispositivos eléctricos (filtros, combinadores RF, amplificadores) que integran el generador de datos de etiqueta, caracterizado por su respuesta impulsiva  $h_{T_{xeL}}(t)$ . La señal de salida del mismo será aplicada al puerto eléctrico del EOM, pudiéndose expresar como:

$$L^{Filtrada}(t) = L(t) \otimes h_{T_{xeL}}(t) \quad (B.5)$$

Estas dos secuencias son aplicadas a los puertos eléctricos del EOM. El campo electromagnético obtenido en la ec. 2.10 se encuentra compuesto por términos asociados a paquetes espectrales situados en frecuencias angulares  $w_0 + kw_{RF}$ , con  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  (ver figura 2.3), que vienen descritas de la siguiente forma:

$$x_{k,i}^{Opt}(t) = e^{jA_i^{Filtrada}(t)} \cdot J_{k,i}^{Filtrada}(t) \cdot e^{j(w_0 + kw_{RF})t} \quad (B.6)$$

donde los términos  $A_i^{Filtrada}(t)$  y  $J_{k,i}^{Filtrada}(t)$  corresponden con  $A_i(t)$  (ec. 2.9) y  $J_{k,i}(t)$  (ec. 2.10) en el que se ha incluido el efecto de filtrado eléctrico en las señales de carga y etiqueta dentro de los términos  $A_{Pay}$  (ec. 2.7) y  $A_{Label}$  (ec. 2.8) respectivamente. Así pues, estos últimos se pueden expresar como:

$$A_{Pay}^{Filtrada}(t) = OMI_p \cdot (P^{Filtrada}(t) - 0,5) \quad (B.7)$$

$$A_{Label}^{Filtrada}(t) = OMI_L \cdot [1 + 2m_L (L^{Filtrada}(t) - 0,5)] / [2(1 + m_L)] \quad (B.8)$$

pudiendo  $A_i^{filtrada}(t)$  y  $J_{k,i}^{filtrada}(t)$  reescribirse como:

$$A_i^{Filtrada}(t) = A_{Bias,i} + \pi \cdot C_{p,i} \cdot A_{Pay}^{filtrada}(t) \quad (B.9)$$

$$J_{k,i}^{Filtrada}(t) = J_k(\pi \cdot C_{L,i} \cdot A_{Label}^{Filtrada}(t)) \quad (B.10)$$

A continuación, cada uno de dichos términos son transmitidos por la fibra óptica y filtrados por la red de difracción de Bragg del receptor ( $FBG_{Rx}$ ) hasta llegar a la entrada del fotodetector, tal como se describe en el campo electromagnético  $E_{ph}^{in}(t)$  de la expresión 2.14. La inclusión de la respuesta de la fibra y  $FBG_{Rx}$  sobre cada uno de los términos B.6, origina que éstos últimos se puedan expresar como:

$$x_{k,i}^{Opt-Filtrado}(t) = x_{k,i}^{Opt}(t) \otimes h_{Opt}(t) \quad (B.11)$$

siendo  $h_{Opt}(t)$  la respuesta impulsiva de la cascada de la fibra óptica y red de difracción de Bragg del receptor. Seguidamente, cada término  $x_{k,i}^{Opt-Filtrado}(t)$  se aplica al fotodetector para generar la fotocorriente detectada  $i_p h(t)$ . Sólo algunos de ellos contribuyen a la

componente de banda base de la fotocorriente detectada  $i_{ph}(t)$  descrita en la expresión 2.17. Concretamente, éstos se pueden clasificar en dos grupos:

$$x_{k,ii}^{Rxe}(t) = x_{k,i}^{Opt-Filtrado}(t) \cdot \left(x_{k,i}^{Opt-Filtrado}(t)\right)^* \quad (B.12)$$

que corresponden con el batido de cada término consigo mismo situado en la frecuencia  $f_0 + kw_{RF}$  y que se originó en el EOM al aplicar las señales de carga y etiqueta por el brazo "i" del EOM ( $i = u$  para el brazo superior o  $i = d$  para el brazo inferior ).

$$x_{k,ud}^{Rxe}(t) = x_{k,u}^{Opt-Filtrado}(t) \cdot \left(x_{k,d}^{Opt-Filtrado}(t)\right)^* \quad (B.13)$$

que corresponden con el batido de los dos términos situados en la frecuencia  $f_0 + kf_{RF}$  y originados en el EOM al aplicar las señales de carga y etiqueta por ambos brazos simultáneamente ( superior ( $i = u$ ) e inferior ( $i = d$ ) ) del EOM.

La respuesta del filtro receptor sobre cada uno de los términos anteriores produce que éstos se pueden expresar a través de la respuesta impulsiva del receptor,  $h_{Rxe}(t)$ , como:

$$x_{k,ij}^{Rxe-Filtrado}(t) = x_{k,ij}^{Rxe}(t) \otimes h_{Rxe}(t) \quad (B.14)$$

donde los subíndices "i" y "j" pueden ser u o d dependiendo del brazo donde se hayan sido aplicadas las señales de datos al EOM.

### B.1.1. Determinación de los coeficientes de corrección de la fotocorriente detectada

La expresión de la fotocorriente desarrollada en el modelo se obtiene para instantes de muestreo  $t_n = n \cdot T_m$  con  $n = 0, 1, 2, \dots$  y  $T_m$  el período de muestreo de la fotocorriente. Al principio de este subapartado se ha descrito dónde se incluyen las respuestas de los distintos dispositivos no consideradas en el modelo analítico inicial dentro del sistema descrito en la figura 2.10. Es en este punto donde se incluyen unos coeficientes de corrección asociados a las respuestas de los dispositivos en el modelo inicial y para cada uno de los bits de la secuencia de la fotocorriente de datos de carga y etiqueta detectadas.

#### Cálculo del Coeficiente asociado al generador de datos eléctrico

La señal de datos de carga descrita en B.2 vale en el instante de muestreo  $t_n$ :

$$P(t = t_n) = P_n \quad (B.15)$$

La señal de salida del generador de datos descrito en B.3 en dicho instante <sup>2</sup> se puede describir como:

<sup>2</sup> las señales a la entrada,  $x(t)$ , y salida,  $y(t)$ , del sistema LTI en el instante  $t_n$  se expresa como:

$$x(t = t_n) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) e^{j2\pi f t_n} df \quad (B.16)$$

$$y(t = t_n) = (x(t) \otimes h_{LTI}(t))|_{t=t_n} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) H_{LTI}(f) e^{j2\pi f t_n} df \quad (B.17)$$

$$y(t = t_n) = x(t = t_n) \cdot \gamma \quad (B.18)$$

$$P^{Filtrada}(t = t_n) = P(t = t_n) \cdot \gamma_n^{T_{xep}} \quad (B.19)$$

siendo  $\gamma_n^{T_{xep}}$  el coeficiente de corrección que incluye el efecto del generador de datos sobre la señal de carga ideal en el instante  $t_n$  y definido a través de la siguiente ecuación:

$$\gamma_n^{T_{xep}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P(f) H_{T_{xep}}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{P_n} \quad (B.20)$$

Este coeficiente se incluye en la expresión de la fotocorriente detectada dentro del término  $A_{Pay}$ , de forma que  $A_{Pay}^{Filtrada}(t = t_n) = A_{Pay,n}^{Filtrada}$ , descrito como:

$$A_{Pay,n}^{Filtrada} = OMI_p \cdot (P_n \cdot \gamma_n^{T_{xep}} - 0,5) \quad (B.21)$$

Para el caso de la señal de etiqueta, ésta toma el siguiente valor en el instante  $t_n$ :

$$L(t = t_n) = L_n \quad (B.22)$$

La señal de salida del generador de datos de etiqueta descrito en B.5 en dicho instante se puede expresar como:

$$L^{Filtrada}(t = t_n) = L(t = t_n) \cdot \gamma_n^{T_{xeL}} \quad (B.23)$$

donde  $\gamma_n^{T_{xeL}}$  el coeficiente de corrección que incluye el efecto del generador de datos sobre la señal de etiqueta ideal en el instante  $t_n$  y definido de la siguiente forma:

$$\gamma_n^{T_{xeL}} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} L(f) H_{T_{xeL}}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{L_n} \quad (B.24)$$

Al igual que para la carga, este coeficiente se incluye en la expresión de la fotocorriente detectada dentro del coeficiente  $A_{Label}$ , de forma que  $A_{Label}^{Filtrada}(t = t_n) = A_{Label,n}^{Filtrada}$  se puede expresar como:

$$A_{Label,n}^{Filtrada} = OMI_L \cdot [1 + 2m_L (L_n \cdot \gamma_n^{T_{xeL}} - 0,5)] / [2(1 + m_L)] \quad (B.25)$$

### Cálculo del Coeficiente asociado a la fibra óptica y red de difracción de Bragg

El efecto de la respuesta de la fibra óptica y la FBG de recepción ( $FBG_{Rx}$ ) en el modelo desarrollado se traduce en unos coeficientes de corrección en cada uno de los términos correspondientes a los paquetes espectrales descritos en B.6 del campo electromagnético deducido en 2.10 para el instante  $t_n$ . Así pues, este se expresa como:

$$x_{k,i}^{Opt-filtrado}(t = t_n) = x_{k,i,n}^{Opt-filtrado} = x_{k,i,n}^{Opt} \cdot \gamma_{k,i,n}^{Opt} \quad (B.26)$$

donde  $\gamma_{k,i,n}^{Opt}$  representa el coeficiente de corrección del término situado en la frecuencia  $f_0 + k f_{RF}$  a la salida de la cascada de dispositivos ópticos (fibra y FBG) en el instante de muestreo  $t_n$  y que fue originado al aplicar señal de información por el brazo "i" del EOM. Éste se puede desarrollar como:

$$\gamma_{k,i,n}^{Opt} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{k,i}^{Opt}(f) H_{Opt}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{k,i}^{Opt}(f) e^{j2\pi f t_n} df} \quad (B.27)$$

siendo  $X_{k,i}^{Opt}(f)$  es el espectro del término obtenido en B.6, y  $H_{Opt}(f)$  es la respuesta frecuencial de la cascada de la fibra óptica y  $FBG_{Rx}$ .

### Cálculo del Coeficiente asociado al filtro eléctrico receptor

El efecto de la respuesta del filtro receptor en el modelo se va a materializar con la inclusión de unos coeficientes de corrección en cada uno de los términos obtenidos en B.12 y B.13, y que vienen identificados por  $|J_{k,i}|^2$  y  $J_{k,u} \cdot J_{k,d}$  en la expresión analítica de la fotocorriente deducida en la expresión 2.17.

En concreto, cada uno estos términos, van a ser corregidos por el filtro eléctrico detector en el instante  $t = t_n$ , de forma que pueden ser expresados de la siguiente forma:

$$x_{k,ij}^{Rxe\_Filtrado}(t = t_n) = x_{k,ij,n}^{Rxe\_Filtrado} = x_{k,ij,n}^{Rxe} \cdot \gamma_{k,ij,n}^{Rxe} \quad (\text{B.28})$$

donde el coeficiente  $\gamma_{k,ij,n}^{Rxe}$  se obtiene como:

$$\gamma_{k,ij,n}^{Rxe} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{\pm k,ij}^{Rxe}(f) H_{Rxe}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{k,ij}^{Rxe}(f) e^{j2\pi f t_n} df} \quad (\text{B.29})$$

siendo  $X_{k,ij}^{Rxe}(f)$  el espectro del término asociado al paquete óptico filtrado obtenido en las ecuaciones B.12 (ij=uu o dd) o B.13 (ij=ud), y  $H_{Rxe}$  la respuesta frecuencial del filtro eléctrico receptor.

## B.2. Configuración basada en dos EOM: Combinación óptica paralela

En la figura 2.41 se muestra el esquema general del modelo que describe un sistema SCML basado en la estructura de combinación óptica paralela con FBG y detección empleando prefiltrado óptico con FBG. En el se tiene en cuenta la respuestas frecuenciales de los dispositivos empleados a la hora de transmitir la señal por el sistema. El objetivo de este apartado es el de calcular los coeficientes que modelan los efectos de los dispositivos sobre la señal transmitida, tal como se ha realizado en el apartado anterior para el caso de un transmisor SCML basado en un único EOM.

Se parte de las señales de carga,  $P(t)$ , y etiqueta,  $L(t)$ , constituidas por secuencias pseudoaleatorias deducidas en las expresiones B.2 y B.4, respectivamente. Tal como se muestra en la figura 2.41, cada una de ellas van a ser transmitidas por un generador de datos (constituido por todos los dispositivos eléctricos necesarios para aplicar dicha señal a los puertos eléctricos del EOM), modelado a través de su respuesta impulsiva  $h_{T_{xep}}$  (carga) y  $h_{T_{xEL}}$  (etiqueta). Como resultado se obtiene las siguientes señales filtradas  $P^{filtrada}(t)$  (ec. B.3) y  $L^{filtrada}(t)$  (ec. B.5).

La secuencia de carga,  $P^{filtrada}(t)$ , se aplica a los puertos eléctricos del  $EOM_p$ . El campo eléctrico obtenido  $E_p(t)$  (ec. 2.38) se encuentra compuesto por términos situados sobre al portadora óptica del canal y descritos de la siguiente forma:

$$x_{p,i}^{Opt}(t) = e^{jA_{p,i}^{filtrada}(t)} \quad (\text{B.30})$$

donde el coeficiente  $A_{p,i}^{filtrada}$  corresponde con  $A_{p,i}(t)$  (ec. 2.39) en el que incluye el efecto de filtrado eléctrico de la señal de carga (ec. B.3) dentro de  $A_{Pay}(t)$ , tal como se describe en la expresión B.7 donde  $OMI_p = \left( V_{pp}^C / V_{\pi RF}^{EOM_p} \right)$ . De forma que éste se reescribe como:

$$A_{p,i}^{filtrada}(t) = \pi \frac{V_{BIAS_{p,i}}}{V_{\pi DC}^{EOM_p}} + \pi \cdot C_{p,i} \cdot A_{Pay}^{filtrada}(t) \quad (\text{B.31})$$

La secuencia de etiqueta,  $L^{filtrada}(t)$ , se aplica a los puertos eléctricos del  $EOM_L$ . El campo eléctrico obtenido  $E_L(t)$  (ec. 2.42) se encuentra compuesto por términos situados tanto en banda base como en múltiplos de la frecuencia angular de la subportadora de radiofrecuencia respecto a la portadora óptica del canal,  $w_0 + kw_{RF}$ . Éstos se expresan como:

$$x_{L,k,i}^{Opt}(t) = e^{jA_{L,i}} \cdot J_{k,Li}^{filtrada}(t) \cdot e^{j(w_0+kw_{RF})t} \quad (B.32)$$

donde en el coeficiente  $J_{k,Li}^{filtrada}$  corresponde con  $J_{k,Li}$  (ec. 2.42) en que se incluye el efecto de filtrado eléctrico de la señal de etiqueta (ec. B.5) dentro de  $A_{Label}(t)$ , tal como se describe en la expresión B.7 donde  $OMI_L = (2V_p^{RF}/V_{\pi RF}^{EOML}) [1 + m_L]$ . Así pues, éste se reescribe como:

$$J_{k,Li}^{filtrada}(t) = J_k(\pi \cdot C_{L,i} \cdot A_{Label}^{filtrada}(t)) \quad (B.33)$$

A continuación, cada uno de los términos de los campos eléctricos provenientes de ambos moduladores es aplicado a los puertos de la red de difracción de Bragg del transmisor SCML,  $FBG_{Tx}$ , encargada de filtrar y combinarlos ópticamente. Por tanto, el campo eléctrico  $E_o(t)$  (ec. 2.43) obtenido a la salida del transmisor SCML consta de los siguientes términos asociados a la carga:

$$x_{p,i}^{Opt-FiltradoTx}(t) = x_{p,i}^{Opt}(t) \otimes h_{FBG_{Tx}}^p(t) \quad (B.34)$$

así como de etiqueta situados a la frecuencia  $f_0 + kf_{RF}$ :

$$x_{L,k,i}^{Opt-FiltradoTx}(t) = x_{L,k,i}^{Opt}(t) \otimes h_{FBG_{Tx}}^L(t) \quad (B.35)$$

donde  $h_{FBG_{Tx}}^p(t)$  y  $h_{FBG_{Tx}}^L(t)$  representan las respuestas impulsivas de la  $FBG_{Tx}$  (reflexión o transmisión) para la carga y etiqueta dependiendo de cómo se configure ésta a la hora de combinar ambas señales (ver el apartado 2.2.2 las posibles configuraciones). Seguidamente, cada uno de los términos es propagado por la fibra óptica y red de difracción de Bragg,  $FBG_{Rx}$ , de la etapa de prefiltrado óptico hasta llegar a la entrada del fotodetector, tal como se describe en la expresión 2.46 del campo eléctrico  $E_{in}^{ph}(t)$ . Así pues, los términos asociados a la carga de dicho campo se expresan como:

$$x_{p,i}^{Opt-Filtrado}(t) = x_{p,i}^{Opt-FiltradoTx}(t) \otimes h_{Opt}(t) \quad (B.36)$$

y los de etiqueta:

$$x_{L,k,i}^{Opt-Filtrado}(t) = x_{L,k,i}^{Opt-FiltradoTx}(t) \otimes h_{Opt}(t) \quad (B.37)$$

siendo  $h_{Opt}$  la respuesta impulsiva de la cascada de la fibra óptica y red de difracción de Bragg de recepción,  $FBG_{Rx}$ . Cada uno de los términos B.36 y B.37 son aplicados al fotodetector para generar la fotocorriente detectada,  $i_{ph}(t)$ , descrita en la expresión 2.47. Sólo algunos de ellos van a contribuir en la componente banda base de la fotocorriente detectada  $i_{ph}(t)$ . Éstos se pueden clasificar en tres grupos dependiendo del tipo de señal (carga o etiqueta) que los genera. Así, pues, el primero se debe únicamente a los términos asociados a la carga:

$$x_{p,ij}^{Rxe}(t) = x_{p,i}^{Opt-Filtrado}(t) \cdot \left( x_{p,j}^{Opt-Filtrado}(t) \right)^* \quad (B.38)$$

que corresponde con el batido de cada término del campo asociado a la carga consigo mismo y que se originó en el  $EOM_p$  al aplicar la señal de carga únicamente por el brazo

”i” (término B.38 cuando el subíndice  $ij = ii$ ) o por ambos brazos (término B.38 cuando el subíndice  $ij = ud$ ).

El siguiente grupo de términos está únicamente asociados a la etiqueta:

$$x_{L,k,ij}^{Rxe}(t) = x_{L,k,i}^{Opt\_Filtrado}(t) \cdot \left( x_{L,k,j}^{Opt\_Filtrado}(t) \right)^* \quad (\text{B.39})$$

que corresponden con el batido de cada término del campo asociado a la etiqueta situados en la frecuencia  $f_0 + kf_{RF}$  consigo mismo y que se originó en el  $EOM_L$  al aplicar la señal de etiqueta únicamente por el brazo ”i” (término B.39 cuando el subíndice  $ij = ii$ ) o por ambos brazos (término B.39 cuando el subíndice  $ij = ud$ ).

El último grupo de términos está asociado tanto a la carga como a la etiqueta:

$$x_{Lp,ij}^{Rxe}(t) = x_{L,0,i}^{Opt\_Filtrado}(t) \cdot \left( x_{p,j}^{Opt\_Filtrado}(t) \right)^* \quad (\text{B.40})$$

que corresponde con el batido de cada término del campo asociado a la carga, y originado al aplicar dicha señal de carga por el puerto eléctrico ”j” del  $EOM_p$ , con el término de etiqueta situado en banda base, y originado al aplicar la señal de etiqueta por el puerto eléctrico ”i” del  $EOM_L$ .

Por último, cada uno de los términos B.38, B.39 y B.40 van a ser aplicados al filtro eléctrico receptor cuya respuesta impulsiva es  $h_{Rxe}$ . Como resultado se consiguen los siguientes términos filtrados:

$$x_{p,ij}^{Rxe\_Filtrado}(t) = x_{p,ij}^{Rxe}(t) \otimes h_{Rxe}(t) \quad (\text{B.41})$$

$$x_{L,k,ij}^{Rxe\_Filtrado}(t) = x_{L,k,ij}^{Rxe}(t) \otimes h_{Rxe}(t) \quad (\text{B.42})$$

$$x_{Lp,ij}^{Rxe\_Filtrado}(t) = x_{Lp,ij}^{Rxe}(t) \otimes h_{Rxe}(t) \quad (\text{B.43})$$

### B.2.1. Determinación de los coeficientes de corrección de la fotocorriente detectada para la estructura de combinación óptica paralela

Una vez descrito cómo se incluyen las respuestas de los distintos dispositivos mostrados en la figura 2.41, se procede a determinar los coeficientes de corrección que materializan los efectos de dichas respuestas sobre cada uno de los bits de la secuencia de la fotocorriente de datos de carga y etiqueta detectadas. Cabe recordar que dicha fotocorriente se ha obtenido para los instantes de muestreo  $t_n = n \cdot T_m$  con  $n = 0, 1, 2, \dots$ , siendo  $T_m$  el período de muestreo de la fotocorriente. Así pues, dichos coeficientes son obtenidos para dichos instantes  $t_n$ .

#### Cálculo del Coeficiente asociado al generador de datos eléctrico

El cálculo de los coeficientes de corrección asociados al efecto del generador de datos sobre las señales de carga y etiqueta ideales en el instante  $t_n$ , se obtiene como relación entre la entrada y salida del generador caracterizado a través de su respuesta frecuencial,  $H_{T_{xep}}$  (carga) y  $H_{T_{xeL}}$  (etiqueta). Concretamente, éstos corresponden con  $\gamma_n^{T_{xep}}$  (ec. B.20) y  $\gamma_n^{T_{xeL}}$  (ec. B.24) para la carga y etiqueta respectivamente.

La expresión de la fotocorriente detectada incluye el efecto del generador de datos de carga incorporando  $\gamma_n^{Txep}$  en el término  $A_{Pay}(t)$ , tal como se describe en B.21. De igual modo, el efecto del generador de datos de etiqueta se incluye a través del coeficiente  $\gamma_n^{Txel}$  en el término  $A_{Label}(t)$  como se indica en B.25.

### Cálculo del Coeficiente asociado a la red de difracción de Bragg del transmisor, $FBG_{Tx}$

Tal como se ha mencionado en varias ocasiones, los campos eléctricos provenientes de los  $EOM_p$  y  $EOM_L$  están modulados por las señales de carga y etiqueta respectivamente, siendo la  $FBG_{Tx}$  la encargada de filtrar y combinarlos ópticamente. Para conseguirlo, se aplica cada una de dichas señales en uno de los puertos de la  $FBG_{Tx}$ , para poder reflejar una de ellas y transmitir la otra.

Así pues, los términos del campo eléctrico asociados a la carga, y descritos en B.34, van a ser afectados por la respuesta impulsiva de la  $FBG_{Tx}$  asociado al puerto empleado (reflexión o transmisión),  $h_{FBG_{Tx}}^p(t)$ , de forma que en el instante  $t_n$  pueden describirse como:

$$x_{p,i}^{Opt\_FiltradoTx}(t = t_n) = x_{p,i,n}^{Opt\_FiltradoTx} = x_{p,i,n}^{Opt} \cdot \gamma_{p,i,n}^{OptTx} \quad (B.44)$$

donde  $x_{p,i,n}^{Opt}$  corresponde con el término B.30 particularizado en  $t = t_n$  y  $\gamma_{p,i,n}^{OptTx}$  representa el coeficiente de corrección del mismo a la salida de la  $FBG_{Tx}$  en dicho instante. Este término se puede expresar como:

$$\gamma_{p,i,n}^{OptTx} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{p,i}^{Opt}(f) H_{FBG_{Tx}}^p(f) e^{j2\pi ft_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{p,i}^{Opt}(f) e^{j2\pi ft_n} df} \quad (B.45)$$

siendo  $X_{p,i}^{Opt}(f)$  el espectro del término obtenido en B.30 y  $H_{FBG_{Tx}}^p(f)$  la respuesta frecuencial de la  $FBG_{Tx}$  asociada al puerto de la misma (reflexión o transmisión) donde se aplica la señal de carga.

En el caso de los términos del campo eléctrico asociado a la etiqueta, descritos en B.32, van a ser afectados también por la respuesta impulsiva de la  $FBG_{Tx}$  asociado al puerto empleado,  $h_{FBG_{Tx}}^L(t)$ , de forma que en el instante  $t_n$  pueden describirse como

$$x_{L,k,i}^{Opt\_FiltradoTx}(t = t_n) = x_{L,k,i,n}^{Opt\_FiltradoTx} = x_{L,k,i,n}^{Opt} \cdot \gamma_{L,k,i,n}^{OptTx} \quad (B.46)$$

donde  $x_{L,k,i,n}^{Opt}$  corresponde con el término B.32 particularizado en  $t = t_n$  y  $\gamma_{L,k,i,n}^{OptTx}$  representa el coeficiente de corrección del mismo a la salida de la  $FBG_{Tx}$  en dicho instante. Éste se puede expresar como:

$$\gamma_{L,k,i,n}^{OptTx} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{L,k,i}^{Opt}(f) H_{FBG_{Tx}}^L(f) e^{j2\pi ft_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{L,k,i}^{Opt}(f) e^{j2\pi ft_n} df} \quad (B.47)$$

siendo  $X_{L,k,i}^{Opt}(f)$  el espectro del término obtenido en B.32 y  $H_{FBG_{Tx}}^L(f)$  la respuesta frecuencial de la  $FBG_{Tx}$  asociada al puerto de la misma (reflexión o transmisión) donde se aplica la señal de etiqueta.

### Cálculo del Coeficiente asociado a la fibra óptica y la red de difracción de Bragg del receptor, $FBG_{Rx}$

El efecto de la respuesta de la fibra óptica y la  $FBG_{Rx}$  va a producir unos coeficientes de corrección sobre cada uno de los términos de los términos del campo eléctrico que

contienen la información de carga (ec. B.34) y de etiqueta (ec. B.35) en el instante  $t = t_n$ . Concretamente, para los términos asociados a la carga se puede expresar como:

$$x_{p,i}^{Opt\_Filtrado}(t = t_n) = x_{p,i,n}^{Opt\_Filtrado} = x_{p,i,n}^{Opt\_FiltradoTx} \cdot \gamma_{p,i,n}^{Opt} \quad (B.48)$$

donde  $x_{p,i,n}^{Opt\_FiltradoTx}$  corresponde con el término B.34 particularizado en  $t = t_n$  y  $\gamma_{p,i,n}^{Opt}$  es el coeficiente de corrección del mismo en dicho instante por efecto de la fibra óptica y la  $FBG_{Rx}$ . Éste se expresa a través de la siguiente expresión:

$$\gamma_{p,i,n}^{Opt} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{p,i}^{Opt\_FiltradoTx}(f) H_{Opt}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{p,i}^{Opt\_FiltradoTx}(f) e^{j2\pi f t_n} df} \quad (B.49)$$

siendo  $X_{p,i}^{Opt\_FiltradoTx}(f)$  el espectro del término obtenido en la expresión B.34 y  $H_{Opt}(f)$  la respuesta frecuencial de la cascada de la fibra óptica y la  $FBG_{Rx}$ .

Para los términos asociados a la etiqueta:

$$x_{L,k,i}^{Opt\_FiltradoRx}(t = t_n) = x_{L,k,i,n}^{Opt\_FiltradoRx} = x_{L,k,i,n}^{Opt\_FiltradoTx} \cdot \gamma_{L,k,i,n}^{Opt} \quad (B.50)$$

donde  $x_{L,k,i,n}^{Opt\_FiltradoTx}$  representa al término B.35 particularizado en  $t = t_n$  y  $\gamma_{L,k,i,n}^{Opt}$  al coeficiente de corrección de éste en dicho instante por efecto de la fibra óptica y la  $FBG_{Rx}$ . Concretamente, se puede expresar a través de la siguiente expresión:

$$\gamma_{L,k,i,n}^{Opt} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{L,k,i}^{Opt\_FiltradoTx}(f) H_{Opt}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{L,k,i}^{Opt\_FiltradoTx}(f) e^{j2\pi f t_n} df} \quad (B.51)$$

siendo  $X_{L,k,i}^{Opt\_FiltradoTx}$  es el espectro del término definido en la expresión B.35 y  $H_{Opt}(f)$  el valor de la respuesta frecuencial de la cascada de la fibra óptica y la  $FBG_{Rx}$ .

### Cálculo del Coeficiente asociado al filtro eléctrico receptor

Los coeficientes de corrección asociados al efecto del filtro eléctrico receptor sobre cada uno de los términos (ec. B.38, B.39 y B.40) que contribuyen a la fotocorriente detectada en banda base descrita en la expresión 2.47 en el instante  $t_n$  se pueden obtener de la siguiente forma. Concretamente para los términos de carga:

$$x_{p,ij}^{Rxe\_Filtrado}(t = t_n) = x_{p,ij,n}^{Rxe\_Filtrado} = x_{p,ij,n}^{Rxe} \cdot \gamma_{p,ij,n}^{Rxe} \quad (B.52)$$

donde  $x_{p,ij,n}^{Rxe}$  corresponde con el término B.38 particularizado en  $t = t_n$  y  $\gamma_{p,ij,n}^{Rxe}$  el coeficiente de corrección del mismo en dicho instante por efecto del filtro receptor. Éste último se define de la siguiente forma:

$$\gamma_{p,ij,n}^{Rxe} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{p,ij}^{Rxe}(f) H_{Rxe}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{p,ij}^{Rxe}(f) e^{j2\pi f t_n} df} \quad (B.53)$$

siendo  $X_{p,ij}^{Rxe}(f)$  el espectro del término obtenido en la expresión B.38 y  $H_{Rxe}(f)$  la respuesta frecuencial del filtro eléctrico del receptor.

En los que respecta a las contribuciones de la fotocorriente banda base asociadas a la señal de etiqueta, obtenemos que se pueden expresar por efecto del filtro eléctrico receptor como:

$$x_{L,k,ij}^{Rxe\_Filtrado}(t = t_n) = x_{L,k,ij,n}^{Rxe\_Filtrado} = x_{L,k,ij,n}^{Rx} \cdot \gamma_{L,k,ij,n}^{Rx} \quad (B.54)$$

donde  $x_{L,k,ij,n}^{Rxe}$  corresponde con el término B.39 particularizado en  $t = t_n$  y  $\gamma_{L,k,ij,n}^{Rxe}$  el coeficiente de corrección del mismo en dicho instante por efecto del filtro receptor. Concretamente, éste último se define de la siguiente forma:

$$\gamma_{L,k,ij,n}^{Rxe} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{L,k,ij}^{Rxe}(f) H_{Rxe}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{L,k,ij}^{Rxe}(f) e^{j2\pi f t_n} df} \quad (\text{B.55})$$

siendo  $X_{L,k,ij}^{Rxe}(f)$  el espectro del término obtenido en la expresión B.39 y  $H_{Rxe}(f)$  la respuesta frecuencial del filtro eléctrico del receptor.

Por último, los términos asociados al batido de las contribuciones de carga y etiqueta sobre la propia portadora, vienen descritos a través de sus respectivos coeficientes por efecto del filtro eléctrico receptor, tal como se muestra en la siguiente expresión:

$$x_{Ld,ij}^{Rxe-Filtrado}(t = t_n) = x_{Lp,ij,n}^{Rxe-Filtrado} = x_{Lp,ij,n}^{Rxe} \cdot \gamma_{Lp,ij,n}^{Rxe} \quad (\text{B.56})$$

donde  $x_{Lp,ij,n}^{Rxe}$  corresponde con el término B.40 particularizado en  $t = t_n$  y  $\gamma_{Lp,ij,n}^{Rxe}$  el coeficiente de corrección del mismo en dicho instante por efecto del filtro eléctrico receptor. Éste se define como:

$$\gamma_{Lp,ij,n}^{Rxe} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{Lp,ij}^{Rxe}(f) H_{Rxe}(f) e^{j2\pi f t_n} df}{\int_{-\infty}^{+\infty} X_{Lp,ij}^{Rxe}(f) e^{j2\pi f t_n} df} \quad (\text{B.57})$$

siendo  $X_{Lp,ij}^{Rxe}(f)$  el espectro del término obtenido en la expresión B.40 y  $H_{Rxe}(f)$  la respuesta frecuencial del filtro eléctrico del receptor.

# Apéndice C

## Publicaciones científicas del autor.

### C.1. Publicaciones científicas relacionadas con la tesis en revistas internacionales

- D. Pastor, **A. Martínez**, J. Capmany, P. Muñoz, S. Sales, B. Ortega, "Polarisation independent intensity modulation setup based on serial polarisation diversity arrangement for header rewriting in label swapping networks," IEE Electronics Letters, vol.39, No. 20, pp. 1461- 1462, 2003.
- M. Popov, **A. Martínez**, J. Capmany, D. Pastor, P. Fonjallaz, B.Ortega,"Fiber-Bragg-Grating-Based Device for Payload and Label Separation in Highly Packed Subcarrier-Multiplexed Optical Label Swapping", IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 17, No. 11, pp. 2445-2447, 2005.
- G. Puerto, B. Ortega, **A. Martínez**, D. Pastor, M.D. Manzanedo, J. Capmany, "Scalability of 10 Gbit/s SCM optical label swapping networks featuring 2R multi-stage intra-node regeneration", IEE Electronics Letters. Vol. 42, No. 12, pp. 59 - 60, 2006.
- G.Puerto, B. Ortega, M. D. Manzanedo, **A. Martínez**, D. Pastor, J. Capmany, and G. Kovacs, "Dimensioning of 10 Gbit/s all-optical packet switched networks based on optical label swapping routers with multistage 2R regeneration", Optics Express 14, pp. 10298-10306, 2006.
- G. Puerto, B. Ortega, M. D. Manzanedo, **A. Martínez**, D. Pastor, J. Capmany, "Payload-Label Tolerance in Subcarrier Multiplexing Optical Label Switching Routers", IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 19, No 13, pp. 984-986, 2007.
- G. Puerto, B. Ortega, **A. Martínez**, M. D. Manzanedo, D. Pastor, J. Capmany, G. Kovacs, T. Banky and T. Berceli, "Investigation on the Signal Misalignment in Subcarrier Multiplexed Optical Label Swapping Routers: An Experimental Verification", J. Lightwave Technologies Vol. 25, No. 7, pp. 1854-1860, 2007.
- G. Kovacs, G. Puerto, T. Banky, A. Martinez, M. Csornyei, M.D. Manzanedo, D. Pastor, B. Ortega, T. Berceli, J. Capmany, "Subcarrier multiplexed optical label swapping networks," IET Optoelectronics, Vol.4, No.6, pp. 235-246, 2010.

## C.2. Publicaciones científicas relacionadas con la tesis en congresos internacionales

- **A. Martínez**, G. Puerto, D. Pastor, J. Capmany, B. Ortega, M. Popov, P.Y. Fonjallaz, L. Pierno, M. Varasi, T. Banky and T. Berceci, "Parallel label generation and rewriting configuration for 10 Gb/s/Channel DWDM label swapping using FBG arrays", 17th Annual Meeting of the IEEE, Lasers and Electro-Optics Society (LEOS 2004), Puerto Rico, 2004.
- **A. Martínez**, D. Pastor, J. Capmany, B. Ortega, P-Y. Fonjallaz, M. Popov, T. Berceci, T. Banky, "Experimental demonstration of subcarrier multiplexed optical Label Swapping featuring 20Gb/s Payload speed and 622Mb/s header conveyed @18.3GHz", European Conference on Optical Communications (ECOC 2005), paper Th3.4.3., Glasgow, Scotland, 2005.
- **A. Martínez**, D. Pastor, J. Capmany, M. Popov, T. Banky, "Optical Single Side Band SCM Header generation and 20Gb/s Payload combination/separation of multiple Label Swapping channels using Fibre Bragg Grating Arrays", international Topical Meeting on Microwave Photonics 2006 (MWP 2006), Grenoble, France, 2006.
- **A. Martínez**, D. Pastor, J. Capmany, M. Popov, T. Banky, "Simultaneous generation and Ultra-Dense multiplexing (50GHz), of Sub-Carrier Multiplexed Optical Label Swapping channels, using compact Fibre Bragg Grating Arrays." European Conference on Optical Communications (ECOC 2006), paper Tu4.6.3., Cannes, France, 2006
- G. Puerto, B. Ortega, M.D. Manzanedo, **A. Martínez**, D. Pastor, J. Capmany. "Experimental Investigations on the Node Cascadability in SCM Optical Label Swapping Networks", European Conference on Optical Communications (ECOC 2006), Cannes, France, 2006.
- **A. Martínez**, M. Manzanedo, G. Puerto, D. Pastor, B. Ortega, J. Capmany, T. Banky, G. Kovacs, T. Berceci, M.K. Popov, P-Y. Fonjallaz. "Recent advances on Optical Label Swapping techniques: An approach to the final results of IST-LABELS project", 8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON 2006), Nottingham, UK, 2006.
- G. Kovacs, **A. Martínez**, D. Pastor, "Optical Packet Switching Utilizing Microwave Subcarriers," 36th European Microwave Conference, pp.614-617, 2006.
- G. Puerto, B. Ortega, M.D. Manzanedo, **A. Martínez**, D. Pastor, J. Capmany, "High Performance SCM Optical Packet Switching Router for Optical Circuit, Burst and Variable Length Packet Processing", European Conference on Optical Communications (ECOC 2007), Berlín, Germany.
- G. Puerto, B. Ortega, **A. Martínez**, D. Pastor, J. Capmany, "Hybrid Packet/Circuit SCM Optical Label Switching Node With Priority Based Routing Capabilities", Optical Fiber Conference (OFC 2008), San Diego. USA.
- G. Kovács, T. Berceci, J. Capmany, B. Ortega, D. Pastor, **A. Martínez**, G. Puerto, T. Bánky, M. Csörnyei, M. Manzanedo, "New Label Processing for Routing Optical Packets", International Microwave Symposium IMS2008, Atlanta, Georgia, 2008.

### C.3. Publicaciones científicas relacionadas con la tesis en congresos nacionales

- G. Puerto, **A. Martínez**, B. Ortega, D. Pastor, J. Capmany, "Generación y reescritura de etiquetas SCM en canales DWDM a 10 Gb/s usando redes de difracción de Bragg", XIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio URSI. Barcelona 2004.
- **A. Martínez**, G. Puerto, M. D. Manzanedo, J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega and S. Sales. "IST LABELS Project. Recent Advances on Optical Label Swapping Techniques", 4ª Reunión Española de Optoelectrónica, Elche 2005.
- G. Puerto, B. Ortega, **A. Martínez**, M.D. Manzanedo, D. Pastor, J. Capmany, "Comprobación experimental de un nodo de conmutación de paquetes ópticos para la siguiente generación de redes de Internet", 5ª reunión española de Optoelectrónica, Bilbao, 2007.
- G. Puerto, B. Ortega, **A. Martínez**, M. D. Manzanedo, D. Pastor, J. Capmany, "Nodo de conmutación de paquetes para Internet óptica", XXII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio URSI. Tenerife 2007.
- G. Puerto, B. Ortega, **A. Martínez**, M. D. Manzanedo, D. Pastor, J. Capmany, "Diseño y comprobación experimental de un nodo de conmutación de paquetes ópticos para la siguiente generación de Internet", XVII Jornadas Telecom I+D, Valencia, 2007.



# Acrónimos.

- AWG, Arrayed Waveguide Grating.
- BER, Bit Error Rate.
- $BR_P$ , BitRate payload.
- $BR_L$ , BitRate Label.
- DBL, Double Side Band.
- DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing.
- EOM, Electro-Optical Modulator.
- ER, Extinction Rate.
- EO, Eye Opening.
- FOM, Figure of Merit.
- FBG, Fiber Bragg Grating.
- FBGA, Fiber Bragg Grating Array.
- $FM_{SCML}$ , Figura de mérito del paquete SCML.
- FPGA, Field Programmable Gate Array.
- ISI, Inter Symbol Interference.
- MATB, MAXimum Transmission Bias point.
- MITB, MInimum Transmission Bias point.
- MSLR, Main to Secondary Lobe Ratio.
- NRZ, Not Return to Zero.
- OCB, Optical Carrier Beating.
- PIC, Photonic Integrated Circuit.
- QF, Quality Factor.
- QP, Quadrature Point.
- RZ, Return to Zero.

- SCML, Sub-Carrier Multiplexed Label.
- SOA, Semiconductor Optical Amplifier.
- SSB, Single Side Band.
- DSB, Double Side Band.
- USB, Upper Side Band.
- LSB, Lower Side Band.
- 2EOMP, Esquema de generación por combinación óptica paralela basada en EOM y FBG.
- XGM, Cross Gain Modulation.
- XPM, Cross Phase Modulation.

# Bibliografía

- [1] D. Blumenthal, B.-E. Olsson, G. Rossi, T. Dimmick, L. Rau, M. Masanovic, O. Lavrova, R. Doshi, O. Jerphagnon, J. Bowers, V. Kaman, L. Coldren, and J. Barton, “All-optical label swapping networks and technologies,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 18, pp. 2058–2075, dec 2000.
- [2] S. J. B. Yoo, “Optical packet and burst switching technologies for the future photonic internet,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, pp. 4468–4492, Dec 2006.
- [3] J. Hu, Z. Pan, Z. Zhu, H. Yang, V. Akella, and S. Yoo, “First experimental demonstration of combined multicast and unicast video streaming over an optical-label switching network,” in *Optical Fiber Communication Conference, 2006 and the 2006 National Fiber Optic Engineers Conference. OFC 2006*, p. 3 pp., march 2006.
- [4] S. B. Yoo, “Optical-label switching, mpls, mplambdas, and gmpls,” *Optical Networks Magazine*, vol. 4, pp. 17–31, 2003.
- [5] P. Gambini, M. Renaud, C. Guillemot, F. Callegati, I. Andonovic, B. Bostica, D. Chiaroni, G. Corazza, S. Danielsen, P. Gravey, P. Hansen, M. Henry, C. Janz, A. Kloch, R. Krahenbuhl, C. Raffaelli, M. Schilling, A. Talneau, and L. Zucchelli, “Transparent optical packet switching: network architecture and demonstrators in the keops project,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 16, pp. 1245–1259, sep 1998.
- [6] E. Kehayas, K. Vyrsokinos, L. Stampoulidis, K. Christodoulopoulos, K. Vlachos, and H. Avramopoulos, “Artemis: 40-gb/s all-optical self-routing node and network architecture employing asynchronous bit and packet-level optical signal processing,” *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 24, pp. 2967–2977, aug. 2006.
- [7] S. Su, A. Bugos, V. Lanzisera, and R. Olshansky, “Demonstration of a multiple-access wdm network with subcarrier-multiplexed control channels,” *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 6, pp. 461–463, march 1994.
- [8] G.-K. Chang, J. Yu, Y.-K. Yeo, A. Chowdhury, and Z. Jia, “Enabling technologies for next-generation optical packet-switching networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, pp. 892–910, may 2006.
- [9] H. Lee, V. Hernandez, V. Tsui, and S. Yoo, “Simple, polarisation-independent, and dispersion-insensitive scm signal extraction technique for optical switching systems applications,” *Electronics Letters*, vol. 37, pp. 1240–1241, sep 2001.
- [10] A. Okada, “All-optical packet routing in awg-based wavelength routing networks using an out-of-band optical label,” in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002. OFC 2002*, pp. 213–215, mar 2002.

- [11] N. Wada, H. Harai, and W. Chujo, "Multi-hop, 40 gbit/s variable length photonic packet routing based on multi-wavelength label switching, waveband routing and label swapping," in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002. OFC 2002*, pp. 216 – 217, mar 2002.
- [12] K. Kitayama, N. Wada, and H. Sotobayashi, "Architectural considerations for photonic ip router based upon optical code correlation," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 18, pp. 1834 –1844, dec 2000.
- [13] X. Wang and N. Wada, "Experimental demonstration of ocdma traffic over optical packet switching network with hybrid plc and ssfbg en/decoders," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 24, pp. 3012 –3020, aug. 2006.
- [14] N. Chi, L. Xu, L. Christiansen, K. Yvind, J. Zhang, P. Holm-Nielsen, C. Peucheret, C. Zhang, and P. Jeppesen, "Optical label swapping and packet transmission based on ask/dpsk orthogonal modulation format in ip-over-wdm networks," in *Optical Fiber Communications Conference, 2003. OFC 2003*, pp. 792 – 794 vol.2, march 2003.
- [15] J. Zhang, N. Chi, P. V. Holm-Nielsen, C. Peucheret, and P. Jeppesen, "A novel optical labeling scheme using a fsk modulated dfb laser integrated with an ea modulator," in *Optical Fiber Communication Conference*, p. TuQ5, Optical Society of America, 2003.
- [16] T. Dimmick, G. Rossi, and D. Blumenthal, "Optical dispersion monitoring technique using double sideband subcarriers," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 12, pp. 900 –902, july 2000.
- [17] Y. Lin, W. Way, and G. Chang, "A novel optical label swapping technique using erasable optical single-sideband subcarrier label," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 12, pp. 1088 –1090, aug. 2000.
- [18] S. Yoo, H. J. Lee, Z. Pan, J. Cao, Z. Yanda, K. Okamoto, and S. Kamei, "Rapidly switching all-optical packet routing system with optical-label swapping incorporating tunable wavelength conversion and a uniform-loss cyclic frequency awgr," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 14, pp. 1211 –1213, aug. 2002.
- [19] J. Yu, L. Xu, P. Ji, Z. Jia, Q. Yang, T. Wang, and G.-K. Chang, "100-gb/s packet signal generation with spectral efficiency larger than 1 bit/hz/s," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 19, pp. 1310 –1312, sept.1, 2007.
- [20] Z. Zhu, Z. Pan, J. Cao, and S. Yoo, "Integrated electro-absorption modulation dfb laser based all-optical subcarrier label swapping," in *Optical Fiber Communication Conference, 2004. OFC 2004*, vol. 1, p. 668, feb. 2004.
- [21] Z. Zhu, Z. Pan, and S. Yoo, "A compact all-optical subcarrier label-swapping system using an integrated eml for 10-gb/s optical label-switching networks," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 17, pp. 426 –428, feb. 2005.
- [22] M. Vaughn and D. Blumenthal, "All-optical updating of subcarrier encoded packet headers with simultaneous wavelength conversion of baseband payload in semiconductor optical amplifiers," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 9, pp. 827 –829, june 1997.

- [23] J. Yu, G.-K. Chang, and Q. Yang, "Optical label swapping in a packet-switched optical network using optical carrier suppression, separation, and wavelength conversion," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 16, pp. 2156–2158, sept. 2004.
- [24] E. Udvary and T. Berceci, "Optical subcarrier label swapping by semiconductor optical amplifiers," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 21, pp. 3221–3225, dec. 2003.
- [25] B. Meagher, G. Chang, G. Ellinas, Y. Lin, W. Xin, T. Chen, X. Yang, A. Chowdhury, J. Young, S. Yoo, C. Lee, M. Iqbal, T. Robe, H. Dai, Y. Chen, and W. Way, "Design and implementation of ultra-low latency optical label switching for packet-switched wdm networks," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 18, pp. 1978–1987, dec 2000.
- [26] G. Rossi, O. Jerphagnon, B. Olsson, and D. Blumenthal, "Optical scm data extraction using a fiber loop mirror for wdm network systems," in *Optical Fiber Communication Conference, 2000*, vol. 4, pp. 74–76 vol.4, 2000.
- [27] H. J. Lee, S. Yoo, V. Tsui, and S. Fong, "A simple all-optical label detection and swapping technique incorporating a fiber bragg grating filter," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 13, pp. 635–637, june 2001.
- [28] T. He, N. Fontaine, R. Scott, D. Geisler, J. Heritage, K. Okamoto, and S. Yoo, "Modulation-format transparent optical arbitrary waveform generation based optical-label switching transmitter with all-optical label extraction using fbg," in *LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, 2009. LEOS '09. IEEE*, pp. 575–576, oct. 2009.
- [29] A. Carena, M. Vaughn, R. Gaudino, M. Shell, and D. Blumenthal, "Opera: an optical packet experimental routing architecture with label swapping capability," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 16, pp. 2135–2145, dec 1998.
- [30] I. Monroy, E. van Breusegem, T. Koonen, J. Olmos, J. van Berkel, J. Jennen, C. Peucheret, and E. Zouganeli, "Optical label switched networks: laboratory trial and network emulator in the ist-stolas project," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 44, pp. 43–51, aug. 2006.
- [31] J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega, J. Mora, A. Martinez, L. Pierno, and M. Varasi, "Theoretical model and experimental verification of 2x1 mach-zehnder eom with dispersive optical fiber link propagation," in *Microwave Photonics, 2005. MWP 2005. International Topical Meeting on*, pp. 145–148, oct. 2005.
- [32] S. Betti, E. Bravi, and M. Giaconi, "Comparison between optical scm systems for multimedia applications," in *Euromicro Conference, 1998. Proceedings. 24th*, vol. 2, pp. 536–543 vol.2, aug 1998.
- [33] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Dover Publications, 1972.
- [34] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products*. Academic Press, 1994.
- [35] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, 1999.

- [36] B. Sklar, *Digital communications: Fundamentals and Applications (2nd Edition)*. Prentice Hall, 2001.
- [37] J. Capmany, F. J. Fraile-Peláez, and J. Martí, *Fundamentos de comunicaciones ópticas*. Editorial Síntesis, 1998.
- [38] D. Blumenthal, J. Laskar, R. Gaudino, S. Han, M. Shell, and M. Vaughn, "Fiber-optic links supporting baseband data and subcarrier-multiplexed control channels and the impact of mmic photonic/microwave interfaces," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 1443 –1452, aug 1997.
- [39] D. Blumenthal, A. Carena, L. Rau, V. Curri, and S. Humphries, "All-optical label swapping with wavelength conversion for wdm-ip networks with subcarrier multiplexed addressing," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 11, pp. 1497 –1499, nov. 1999.
- [40] A. Oppenheim, A. Willsky, and N. Hamid, *Signals and Systems (Second Edition)*. Prentice Hall, 1998.
- [41] M.-F. Huang, J. Yu, and G.-K. Chang, "Optical packet-switched network employing optically labeled 114-gb/s rz-8psk packet signals through straight-line optical wavelength-selective switching nodes," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 20, pp. 1639 –1641, oct.1, 2008.
- [42] J. Yu, L. Xu, P. Ji, Z. Jia, Q. Yang, T. Wang, and G.-K. Chang, "100-gb/s packet signal generation with spectral efficiency larger than 1 bit/hz/s," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 19, pp. 1310 –1312, sept.1, 2007.
- [43] D. Geisler, N. Fontaine, R. Scott, H. Tingting, K. Okamoto, J. Heritage, and S. Yoo, "3 b/s/hz 1.2 tb/s packet generation using optical arbitrary waveform generation based optical transmitter," in *Conference on Optical Fiber Communication (OFC2009)*, 2009.
- [44] T. Silveira, A. Teixeira, A. Ferreira, and P. Monteiro, "All-optical vestigial sideband generation using a semiconductor optical amplifier," *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 18, pp. 2212 – 2214, 2006.
- [45] H. Chen, M. Chen, S. Xie, and B. Zhou, "Vestigial-sideband payload for high-speed all-optical label-switching network," *Lightwave Technology, Journal of*, vol. 23, pp. 3313 – 3320, oct. 2005.
- [46] R. Feced, M. Zervas, and M. Muriel, "An efficient inverse scattering algorithm for the design of nonuniform fiber bragg gratings," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 35, pp. 1105 –1115, aug 1999.



