



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

Resumen de la Tesis Doctoral

**Estudio de efectos no lineales en dispositivos fotónicos  
y su aplicación en sistemas radio sobre fibra óptica**

Dr. Francisco Ramos Pascual  
Director: Dr. Javier Martí Sendra

Departamento de Comunicaciones  
Universidad Politécnica de Valencia

Fecha de lectura: 6 de julio de 2000  
Calificación: SOBRESALIENTE cum laude

## **1 Marco de la tesis**

Esta Tesis se ha desarrollado íntegramente en el seno del Grupo de Sistemas Radio-Fibra de la Universidad Politécnica de Valencia, dentro de una línea de investigación dedicada al estudio de efectos no lineales en dispositivos fotónicos. El trabajo presentado a continuación resume una labor de investigación de más de tres años que comenzó gracias a una beca de Formación de Personal Investigador de la Conselleria de Cultura, Educació i Ciència de la Generalitat Valenciana.

Durante los dos primeros años, el autor trabajó conjuntamente en varios proyectos de investigación directamente relacionados con los sistemas radio sobre fibra óptica. Uno de ellos<sup>i</sup>, subvencionado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT), consistía en el desarrollo de una plataforma para la transmisión de señales de alta velocidad

---

<sup>i</sup> proyecto TIC96-0611

empleando técnicas de multiplexación en longitud de onda y de subportadoras eléctricas multiplexadas, lo que se conoce habitualmente como WDM-SCM<sup>ii</sup>. Por otra parte, en otro proyecto de investigación se construyó un demostrador de sistema de distribución punto a multipunto a 28 GHz<sup>iii</sup> para la transmisión de señales de vídeo y datos. Asimismo, se propusieron y demostraron técnicas de alimentación óptica de redes LMDS remotas.

En marzo de 1999, el autor se incorporó al Departamento de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, donde actualmente imparte la asignatura de Radiocomunicaciones. Desde esa fecha, ha continuado desempeñando su labor investigadora en la búsqueda de nuevas aplicaciones de las no linealidades de los dispositivos fotónicos en sistemas ópticos analógicos.

## 2 Motivación de la tesis

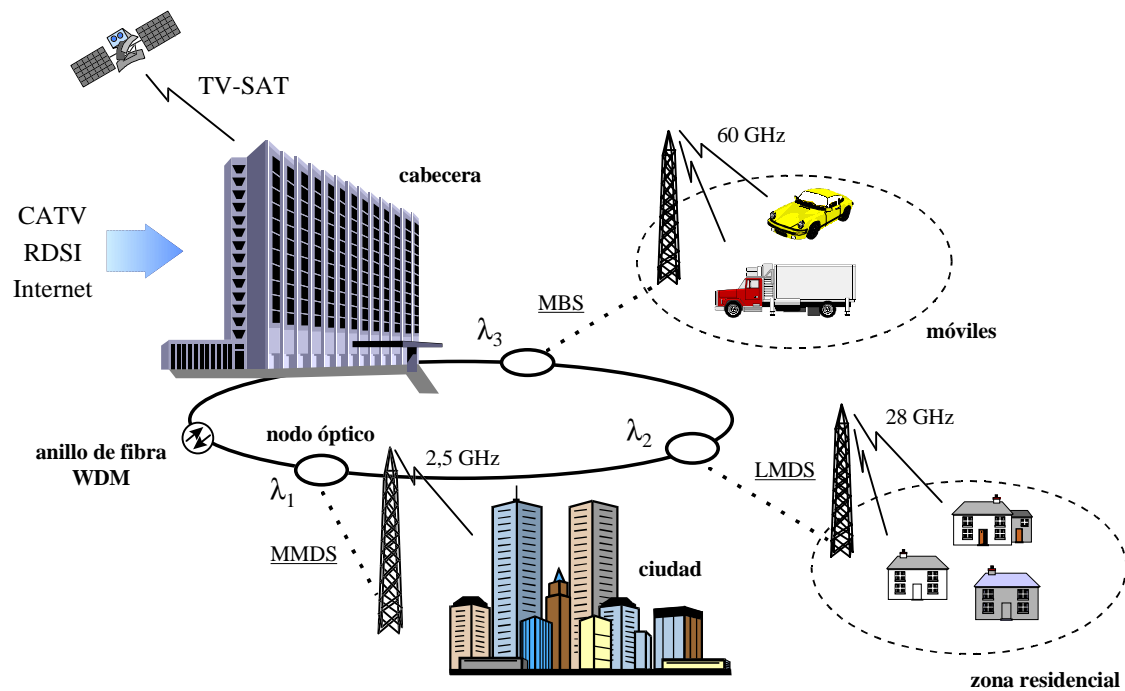
La introducción de los nuevos servicios multimedia en el entorno residencial o empresarial requiere de una gran cantidad de ancho de banda que debe ser soportado por la red de acceso. El principal candidato para permitir estos servicios es, sin lugar a dudas, la fibra óptica. Sin embargo, los operadores se encuentran con un alto factor de riesgo: deben realizar un gran desembolso económico para montar toda una infraestructura de red que llegue a cada uno de los abonados. Además, dado el actual nivel de competencia que existe en la red de acceso del usuario, lo que cualquier operador desea es comenzar a dar servicio lo más rápidamente posible. En este caso, la única solución posible es optar por los sistemas de acceso vía radio.

Ahora bien, la creciente demanda de servicios de banda estrecha en los actuales sistemas radio ha reducido las posibilidades de alojar en el espectro radioeléctrico la gran capacidad que demandan estos sistemas inalámbricos de banda ancha. Para contrarrestar esta limitación, se está considerando la utilización de enlaces radio a frecuencias milimétricas (26–100 GHz) para aplicaciones en sistemas micro/picocelulares de banda ancha, sistemas fijos de distribución punto a multipunto o redes de área local inalámbricas. La complejidad de estos enlaces radio puede simplificarse compartiendo los equipos transmisores y receptores de milimétricas entre los distintos

---

<sup>ii</sup> wavelength division multiplexing-subcarrier multiplexing

<sup>iii</sup> sistemas denominados LMDS



**Figura 1** Sistema radio sobre fibra óptica híbrido WDM-SCM para proporcionar servicios bidireccionales de banda ancha MMDS, LMDS y MBS.

canales radio empleando la técnica de subportadoras multiplexadas (SCM). Si además las señales radio se transportan sobre la fibra a frecuencias milimétricas, todavía se simplifican más las estaciones base, dado que el equipamiento de éstas se reduce a componentes optoelectrónicos y amplificadores eléctricos, sin necesidad de equipos conversores de frecuencia. Una posible desventaja sería, sin embargo, el coste asociado al fotodiodo de banda ancha.

De este modo, entregando las señales directamente desde la estación de control y a través de la fibra, se evita la necesidad de generar la portadora de alta frecuencia en la estación base, el cual suele ser además un emplazamiento de difícil acceso. Luego la principal ventaja de estos sistemas es su capacidad para concentrar la mayoría del equipamiento de alta frecuencia más costoso en un lugar centralizado, permitiendo que el equipamiento de la estación base sea simple, de pequeño tamaño y con un bajo consumo. Además, el operador no necesita desplegar una enorme infraestructura de fibra óptica, sino que esta se limita a unos cuantos enlaces troncales entre el centro de control y las diferentes estaciones base.

Surgen así los sistemas de comunicaciones radio sobre fibra óptica, caracterizados por combinar dispositivos de radiofrecuencia con enlaces de

fibra óptica. Básicamente, los sistemas radio sobre fibra se aprovechan de la fibra óptica para transportar señales directamente hasta un punto de radiación remoto (estación base). En la figura 1 se muestra el aspecto de uno de estos sistemas. Algunas de las aplicaciones de estos sistemas en las actuales redes de acceso son: redes VSAT (*Very Small Aperture Terminals*), sistemas inalámbricos de banda ancha punto a multipunto MMDS (*Multichannel Multipoint Distribution System*), LMDS (*Local Multipoint Distribution System*) o MVDS (*Multipoint Video Distribution System*), sistemas celulares GSM/DECT o MBS (*Mobile Broadband System*), redes de área local inalámbricas y aplicaciones comerciales o militares.

Ahora bien, la gran mayoría de dispositivos fotónicos empleados en estos sistemas de comunicaciones ópticas se comportan de forma no lineal ante niveles de potencia óptica elevados. Por ejemplo, potencias ópticas del orden de +10 dBm a la entrada de fibras ópticas o de amplificadores ópticos de semiconductor son suficientes para inducir efectos no lineales apreciables.

Básicamente, los procesos no lineales que ocurren en los dispositivos fotónicos se clasifican atendiendo a su naturaleza y características. En particular, los principales efectos no lineales que han sido estudiados hasta el momento son:

- Automodulación de fase (*self-phase modulation, SPM*),
- Modulación de fase cruzada (*cross-phase modulation, XPM*),
- Mezclado de cuatro ondas (*four-wave mixing, FWM*),
- Dispersión estimulada de Brillouin (*stimulated Brillouin scattering, SBS*),
- Dispersión estimulada de Raman (*stimulated Raman scattering, SRS*),
- Modulación de ganancia cruzada (*cross-gain modulation, XGM*).

Todos estos procesos no lineales han sido estudiados en detalle en el contexto de los sistemas ópticos digitales [Agr89, Chr90]. No obstante, menor atención se ha prestado a la mayoría de ellos en sistemas de comunicaciones ópticas analógicos, salvo en el caso del SPM [Phi91, Des94] o SBS [Mao92]. Adicionalmente, todos los estudios se han enfocado a analizar principalmente las degradaciones que producen estos efectos no lineales, sin entrar a valorar sus posibles aplicaciones. Hasta el momento, no se conocen aplicaciones de las no linealidades en sistemas radio sobre fibra salvo contadas excepciones [Shi96, Fre97, Yao98, Kho99]. Así pues, existe un importante campo de investigación que aporta resultados de interés dentro del área de los sistemas radio-fibra.

### 3 Líneas de trabajo y principales resultados obtenidos

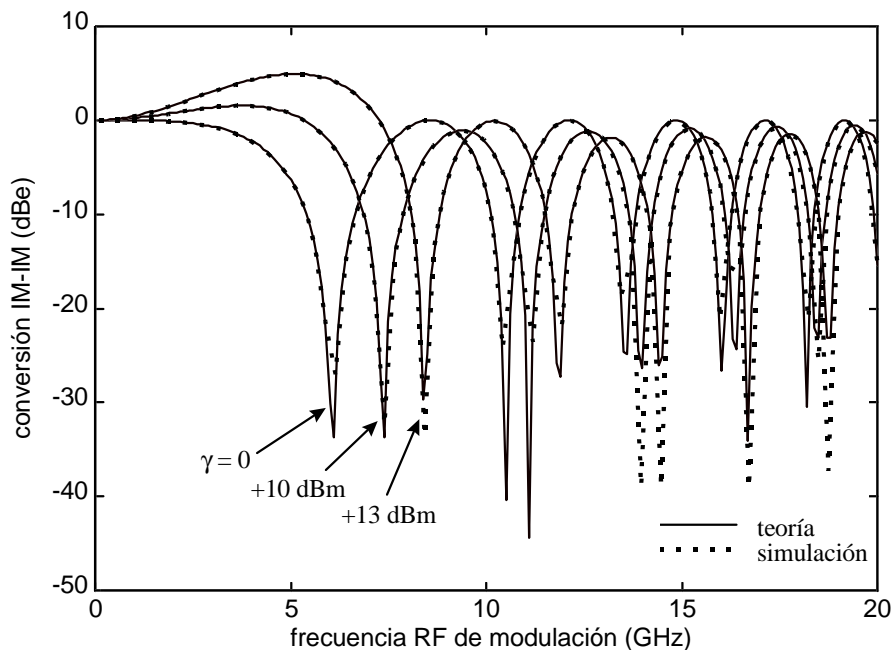
El principal objetivo de esta Tesis ha consistido en el estudio de algunos efectos no lineales que ocurren en dispositivos fotónicos y que tienen aplicación dentro del contexto de los sistemas radio sobre fibra óptica. En relación con las líneas de trabajo planteadas al inicio de la Tesis, debemos indicar que éstas han sido cubiertas de forma totalmente satisfactoria. A continuación se resumen las principales conclusiones obtenidas y las contribuciones realizadas por el autor en cada una de estas líneas.

- **Elaboración de un completo modelo, tanto teórico como de simulación, de la propagación de señales de RF a través de fibras ópticas dispersivas y no lineales.**

La propagación de señales a través de fibras ópticas monomodo (SMFs) dispersivas y no lineales se rige por la ecuación de Schrödinger no lineal [Agr89]. Esta ecuación no tiene una solución cerrada salvo para situaciones muy concretas, como es en el contexto de los solitones. Sin embargo, estas soluciones sólo tienen aplicación en el caso de transmisión digital y no sirven para modelar la propagación de señales de radiofrecuencia (RF) a través de la fibra.

Por este motivo, se particularizó el estudio para el caso de modulación en pequeña señal [Wan92, Car98], y se llegó así a expresiones cerradas que pudieran modelar la respuesta de fibras ópticas en sistemas con modulación analógica, incluyendo otros efectos como pueden ser el *chirp* de frecuencia introducido por los transmisores ópticos. En especial, el estudio se extendió desde frecuencias de microondas hasta frecuencias milimétricas ( $f_m > 18$  GHz). En el caso de simulación, se empleó el algoritmo conocido como *split-step Fourier method*. Este algoritmo se ha aplicado con éxito para modelar la propagación de pulsos a través de fibras ópticas y, al mismo tiempo, ya se demostró su validez en los sistemas SCM [Des94].

En esta línea de investigación se realizó una publicación [Ram00] donde se presenta, por primera vez, una expresión teórica para caracterizar la función de transferencia de SMFs dispersivas y no lineales. Esta expresión, basada en funciones de Bessel de orden imaginario puro, es válida tanto para modulación óptica en doble banda lateral como en banda lateral única, e incluye además los efectos del *chirp* del transmisor óptico y las pérdidas de la fibra. En la figura 2 se representan los resultados teóricos obtenidos, donde se observa el ajuste perfecto a los resultados de simulación.

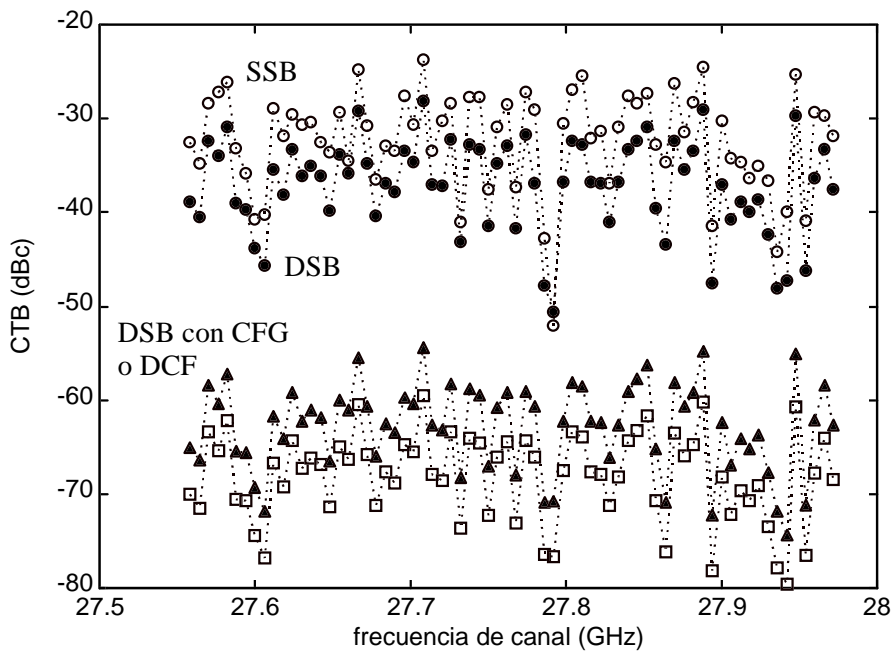


**Figura 2** Conversión IM-IM en función de la frecuencia de modulación para varias potencias ópticas a la entrada de 100 km de SSMF ( $\gamma = 0$ : propagación lineal).

□ **Estudio de la distorsión no lineal introducida por la fibra óptica en sistemas radio-fibra a frecuencias milimétricas.**

El efecto conjunto de la dispersión cromática y del SPM da lugar a la aparición de distorsión no lineal a la salida del fotodetector en sistemas multicanal radio sobre fibra óptica. Esta distorsión no lineal genera productos de intermodulación que degradan la calidad del sistema. Los parámetros que se utilizan para medir esta degradación son el CSO (*composite second-order*) y el CTB (*composite triple-beat*), definidos como la relación entre las potencias de los términos de distorsión de segundo y tercer orden, respectivamente, y la potencia de señal útil.

La influencia del SPM en la distorsión no lineal se ha modelado con anterioridad [Des94] en el caso de sistemas CATV. Además, existen algunos trabajos que presentan resultados experimentales [Wil96, Gop96]. No obstante, este análisis no se ha extendido a otro tipo de sistemas como pueden ser los sistemas LMDS o MVDS. Estos sistemas tienen gran aplicación para la difusión de vídeo y datos, dada la congestión que existe actualmente en el espectro radioeléctrico. En nuestro caso, se estudió la influencia que tiene la fibra óptica como medio de transporte en



**Figura 3** CTB en cada canal de la banda para las tres técnicas: DSB (puntos negros), SSB (puntos blancos), CFG teórico (cuadrados blancos) y CFG experimental (triángulos negros).

arquitecturas donde la señal multicanal a frecuencias milimétricas se distribuye hasta un nodo remoto, y después se convierte al dominio eléctrico para poder ser radiada por medio de una antena (alimentación de antenas remotas).

Entre las aportaciones realizadas, se han obtenido resultados de distorsión no lineal y de penalización de potencia en sistemas multicanal LMDS y MVDS. A diferencia de los sistemas CATV, a frecuencias milimétricas la dispersión cromática se convierte en la principal fuente de degradación muy por encima del fenómeno no lineal de SPM. De este modo, se obtienen alcances de fibra de 1–2 km como consecuencia del efecto de supresión de la portadora, siendo necesario emplear alguna técnica de ecualización. La distorsión, sin embargo, no supone ninguna limitación en estos sistemas debido a los esquemas de modulación que suelen utilizarse. Los niveles de CTB alcanzados, que se mantienen por debajo de los  $-40$  dBc, son suficientes. En cambio, los sistemas CATV se encuentran típicamente limitados por la distorsión no lineal debido al estricto requisito de  $-60$  dBc impuesto por la modulación AM–VSB.

En esta línea de investigación también se realizó una publicación [Ram99a] donde se compararon la técnica de modulación óptica en banda lateral única (*single-sideband*, SSB) y el uso de redes de difracción sobre fibra óptica (*chirped fiber gratings*, CFGs) en relación con la compensación de distorsión no lineal introducida por la dispersión de la fibra en sistemas ópticos multicanal LMDS (figura 3). En particular, se ha demostrado que la técnica SSB no resulta válida como consecuencia del *chirp* introducido en el proceso de modulación que incluso incrementa los niveles de CTB. En cambio, el empleo de CFGs reduce considerablemente (aprox. 25 dB) los niveles de CTB, si bien debe realizarse un diseño cuidadoso del dispositivo porque la equalización es muy sensible al rizado que presentan las respuestas de reflectividad y de retardo de grupo del CFG.

□ **Compensación de la distorsión no lineal introducida por la fibra óptica empleando la técnica de inversión espectral.**

Para compensar la distorsión no lineal introducida por la fibra óptica en sistemas multicanal radio sobre fibra se propuso la técnica de inversión espectral en el dominio óptico. Esta técnica se ha aplicado con éxito en sistemas ópticos digitales [Wat93], pero no ha recibido demasiada atención en el caso de los sistemas analógicos, salvo algunos trabajos realizados recientemente por Kitayama y Sotobayashi [Kit99, Sot99, Sot99a]. Debemos indicar que el trabajo de esta Tesis ha dado lugar, por primera vez, a publicaciones donde se propone la técnica OPC<sup>iv</sup> para compensar la distorsión no lineal introducida por la fibra en sistemas SCM [Mar97, Ram98a]. Estas publicaciones realizadas en la presente línea de investigación de la Tesis han sido valoradas por parte de otros autores mediante referencias a las mismas [Sot99, Sot99a].

El elemento clave utilizado en la técnica de inversión espectral es el conjugador óptico, también conocido como OPC (*optical-phase conjugator*), y que se sitúa generalmente en mitad del enlace de fibra. Su función principal es la de invertir la fase de la señal óptica, lo cual se realiza por medio de procesos paramétricos no lineales. Bajo ciertas condiciones, la distorsión introducida en el primer trayecto de fibra se compensa mediante la propagación por el segundo tramo de fibra colocado tras el bloque OPC.

A diferencia de otras técnicas de compensación de dispersión, como pueden ser las fibras compensadoras de dispersión o las redes de difracción sobre



fibra, esta técnica también compensa la dispersión en presencia de SPM. Además, no requiere de complejos circuitos de ajuste de la fase o de estabilización de la polarización del modulador como otras técnicas, ya que es independiente de la modulación utilizada. Otra de sus ventajas es su reducida sensibilidad frente a variaciones de la longitud del enlace de fibra, lo cual permite situar el bloque OPC en un lugar común y compartirlo con multitud de usuarios. De este modo, se consigue eliminar la duplicación de recursos, puesto que el OPC es un dispositivo relativamente costoso.

Los resultados que se obtuvieron son relativos a la compensación de CSO, CTB y penalización de potencia en sistemas ópticos analógicos: CATV, MMDS, LMDS y MVDS. Además, también se han obtenido resultados de sensibilidad de la técnica OPC frente a diversos parámetros del sistema: longitudes de fibra, potencias ópticas, valores de dispersión cromática, etc. Otra aportación ha consistido en la obtención, por primera vez, de una expresión teórica para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema OPC a partir de las funciones de conversión fase-intensidad de la fibra óptica.

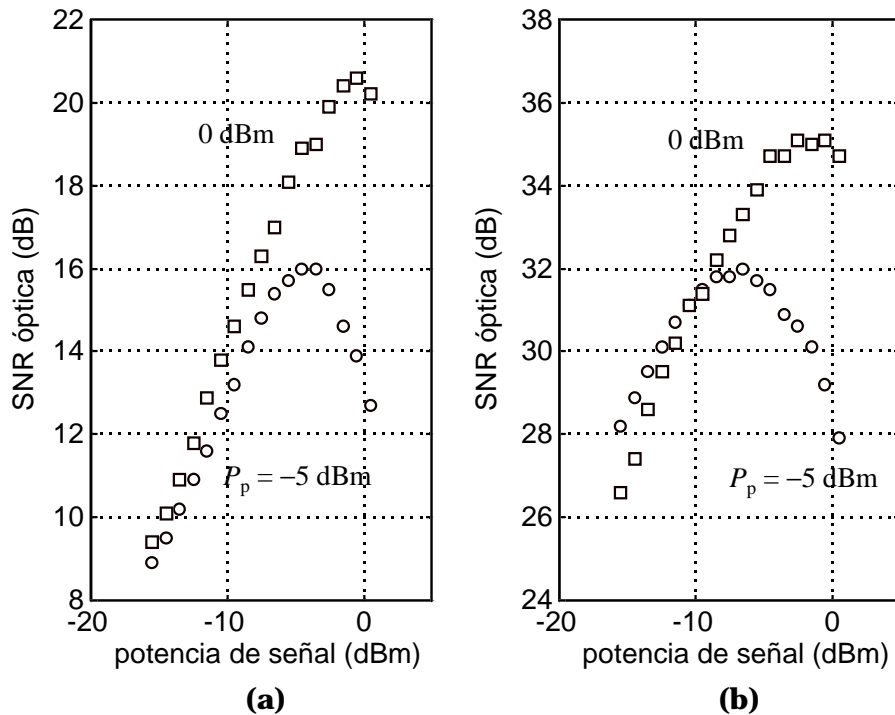
□ **Estudio del proceso no lineal de mezclado de cuatro ondas para la elaboración de conjugadores ópticos.**

Dado que el conjugador óptico es el elemento clave en la técnica de inversión espectral, interesa que esté bien caracterizado. Este elemento se construye normalmente a partir de FWM en una configuración de fibra de dispersión desplazada (*dispersion-shifted fiber*, DSF) [Wu94] o de amplificador óptico de semiconductor (*semiconductor optical amplifier*, SOA) [Duc96]. En especial, en esta Tesis se analizó en profundidad el fenómeno de FWM en ambas configuraciones dentro del contexto de los sistemas ópticos analógicos. En particular, se evaluó cuál de las dos posibles configuraciones, SOA/DSF, es más ventajosa en el caso de los sistemas radio sobre fibra desde diversos puntos de vista: pérdidas de inserción, ancho de banda de conversión, distorsión no lineal, ruido, etc.

El ruido ASE se convirtió en el principal factor limitante en las prestaciones de ambas configuraciones de conjugador. Algunas de las medidas experimentales realizadas sobre ambas configuraciones se muestran en la figura 4. En general, se consiguen mejores prestaciones con el OPC basado en SOA debido a su mayor eficiencia de conversión y a una mejor relación

---

<sup>iv</sup> *optical-phase conjugation*, en lengua inglesa



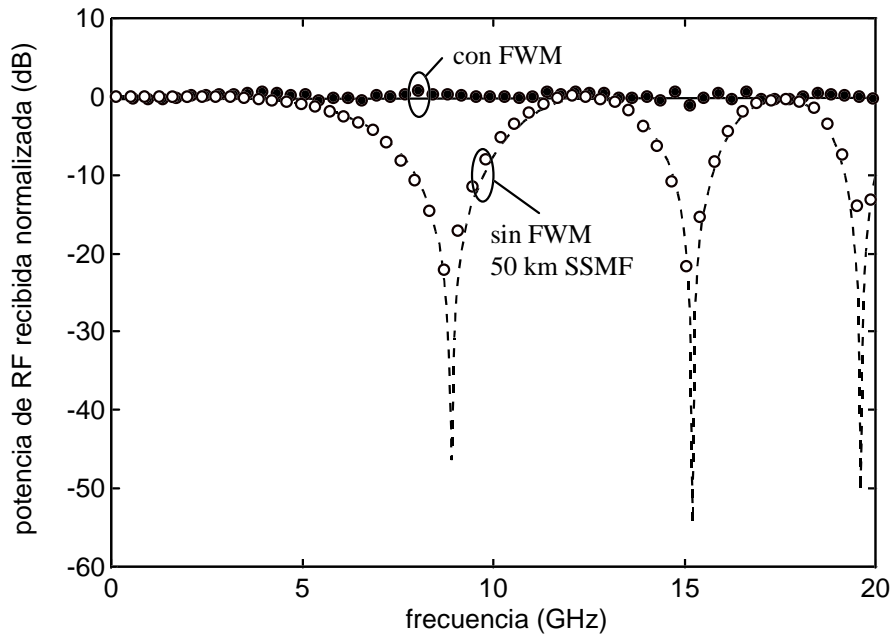
**Figura 4** SNR óptica de la señal conjugada obtenida con las configuraciones (a) DSF y (b) SOA de OPC en función de la potencia de señal y para dos potencias de bombeo.

señal a ruido óptica. Todos estos resultados comparativos fueron publicados en [Ram00a].

Por último, también se demostró experimentalmente la compensación del efecto de supresión de la portadora en un margen de frecuencias de 20 GHz y para un enlace de 50 km de SSMF empleando un conjugador basado en FWM en 12,7 km de DSF construido en el laboratorio. Estos resultados (figura 5) se encuentran publicados en [Ram99] y han coincidido temporalmente con otros estudios similares para el OPC basado en SOA realizados por Kitayama y Sotobayashi [Kit99].

□ **Aplicación del SPM para reducir los efectos de la dispersión cromática de la fibra.**

Los sistemas radio sobre fibra óptica es interesante que operen en tercera ventana (1550 nm) debido a la reducida atenuación de la fibra óptica a esta longitud de onda y a la existencia de amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio. No obstante, la dispersión cromática de la fibra limita el producto

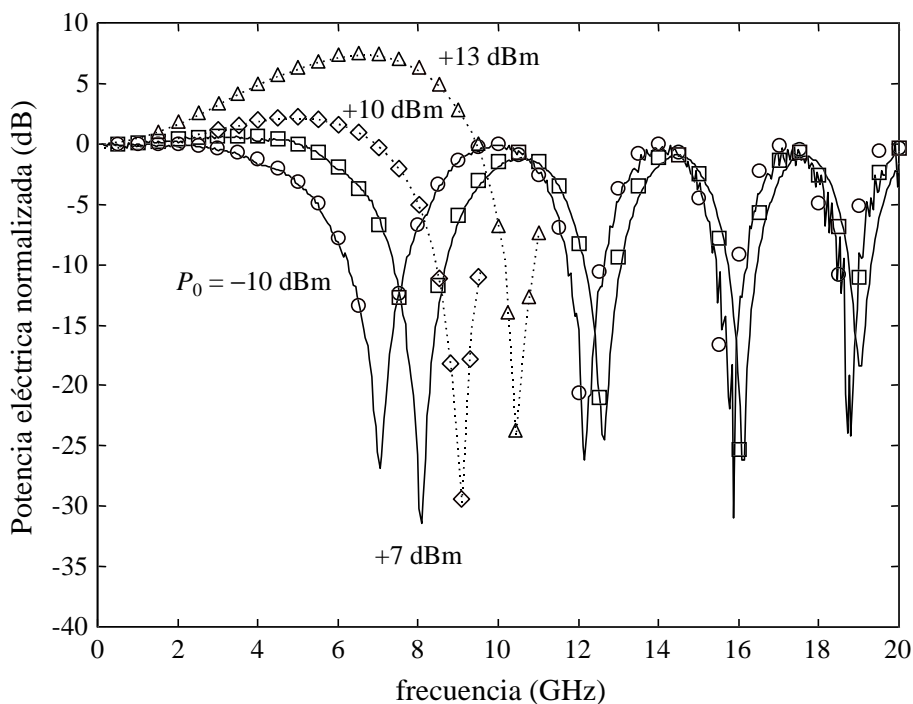


**Figura 5** Resultados experimentales (símbolos) y de simulación (curvas) de la potencia de RF recibida normalizada para un enlace de SSMF de 50 km con y sin el empleo de la técnica OPC basada en FWM en una DSF.

ancho de banda–distancia como consecuencia del fenómeno de supresión de la portadora [Sch95]. En nuestro caso, se propuso el SPM como una solución para reducir este efecto perjudicial. Mediante el SPM, se induce un *chirp* de frecuencia de signo negativo que permite alejar los nulos de transmisión de la respuesta de la fibra hacia frecuencias mayores. Este efecto puede controlarse fácilmente por medio de la potencia óptica inyectada a la entrada de la fibra y ha sido verificado con éxito experimentalmente (figura 6), lo cual se ha publicado en [Ram98].

Conviene resaltar que este estudio ha coincidido temporalmente con otros similares realizados por Cartaxo *et. al.* [Car98, Car99a] empleando modulación directa, en donde se referencia el trabajo del autor de esta Tesis en dicha línea de investigación. Adicionalmente, en un artículo de la Universidad Pública de Navarra presentado en la ECOC'99 [Loa99] también se referencia dicho trabajo de investigación.

Adicionalmente, la técnica SPM ha sido propuesta para reducir los efectos de la dispersión cromática en sistemas MI–DD operando a 1550 nm sobre SSMF. En especial, se han realizado medidas de la penalización de potencia utilizando esta técnica y se ha conseguido extender el alcance del sistema de



**Figura 6** Potencia eléctrica normalizada a la salida del fotodetector en función de la frecuencia de modulación y para varios valores de potencia óptica a la entrada de la fibra.

forma significativa con respecto al caso de transmisión convencional. Finalmente, como contribución se ha demostrado la transmisión tolerante a la dispersión de una señal de 8 Mbit/s a una frecuencia de 7 GHz sobre 75 km de SSMF empleando la técnica SPM con una potencia óptica transmitida de +11 dBm. Los resultados experimentales obtenidos fueron publicados en [Ram00b].

## Referencias

- [Agr89] G. P. Agrawal, 'Nonlinear fiber optics', New York: Academic, 1989.
- [Car98] A. V. T. Cartaxo, et al., J. Lightwave Technol., vol. 16, no. 7, pp. 1187-1194, 1998.
- [Car99a] A. V. T. Cartaxo, et al., J. Lightwave Technol., vol. 17, no. 10, pp. 1806-1813, 1999.
- [Chr90] A. R. Chraplyvy, J. Lightwave Technol., vol. 8, no. 10, pp. 1548-1557, 1990.
- [Des94] C. Desem, Electron. Lett., vol. 30, no. 24, pp. 2055-2056, 1994.
- [Duc96] T. Ducellier, and M. B. Bibey, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 4, pp. 530-532, 1996.

- [Fre97] P. N. Freeman, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, no. 1, pp. 46-48, 1997.
- [Gop96] G. K. Gopalakrishnan, et al., Electron. Lett., vol. 32, no. 14, pp. 1309-1310, 1996.
- [Kho99] R. Khosravani, et al., presented at OFC 99, pp. 341-343, 1999.
- [Kit99] K. Kitayama, and H. Sotobayashi, presented at OFC 99, pp. 64-66, 1999.
- [Loa99] A. Loayssa, et al., presented at ECOC 99, pp. 416-417, 1999.
- [Mao92] X. P. Mao, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 3, pp. 287-289, 1992.
- [Mar97] J. Marti, and F. Ramos, Electron. Lett., vol. 33, no. 9, pp. 792-794, 1997.
- [Phi99] M. R. Phillips, and D. M. Ott, J. Lightwave Technol., vol. 17, no. 10, pp. 1782-1792, 1999.
- [Ram98] F. Ramos, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 10, pp. 1473-1475, 1998.
- [Ram98a] F. Ramos, and J. Marti, J. Lightwave Technol., vol. 16, no. 8, pp. 1387-1392, 1998.
- [Ram99] F. Ramos, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 9, pp. 1171-1173, 1999.
- [Ram99a] F. Ramos, and J. Marti, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 11, pp. 1479-1481, 1999.
- [Ram00] F. Ramos, and J. Marti, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12, no. 5, 2000.
- [Ram00a] F. Ramos, et al., presented at ECOC 2000, paper 3.2.6, Munich, 2000.
- [Ram00b] F. Ramos, et al., Microw. and Opt. Technol. Lett., vol. 27, no. 1, pp. 1-4, 2000.
- [Sch95] H. Schmuck, Electron. Lett., vol. 31, no. 21, pp. 1848-1849, 1995.
- [Shi96] W. Shieh, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 8, no. 4, pp. 524-526, 1996.
- [Sot99] H. Sotobayashi, and K. Kitayama, Electron. Lett., vol. 35, no. 12, pp. 992-993, 1999.
- [Sot99a] H. Sotobayashi, and K. Kitayama, J. Lightwave Technol., vol. 17, no. 12, pp. 2488-2497, 1999.
- [Wan92] J. Wang, and K. Petermann, J. Lightwave Technol., vol. 10, no. 1, pp. 96-100, 1992.
- [Wat93] S. Watanabe, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, no. 10, pp. 1241-1243, 1993.
- [Wil96] F. W. Willems, et al., Electron. Lett., vol. 32, no. 14, pp. 1310-1311, 1996.
- [Wu94] W. Wu, et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 6, no. 12, pp. 1448-1450, 1994.
- [Yao98] X. S. Yao, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 1, pp. 138-140, 1998.

#### 4 Publicaciones internacionales de la tesis

1. J. Marti, and F. Ramos, "Compensation for dispersion-induced nonlinear distortion in subcarrier systems using optical-phase conjugation", IEE Electronics Letters, vol. 33, no. 9, pp. 792-794, April 1997.
2. F. Ramos, and J. Marti, "Compensation for fiber-induced composite second-order distortion in externally modulated lightwave AM-SCM systems using optical-phase conjugation", IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 16, no. 8, pp. 1387-1392, August 1998.
3. F. Ramos, J. Marti, V. Polo, and J. M. Fuster, "On the use of fiber-induced self-phase modulation to reduce chromatic dispersion effects in microwave/millimeter-wave optical systems", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 10, no. 10, pp. 1473-1475, October 1998.
4. F. Ramos, J. Marti, and V. Polo, "Compensation of chromatic dispersion effects in microwave/millimeter-wave optical systems using four-wave mixing induced in dispersion-shifted fibers", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, no. 9, pp. 1171-1173, September 1999.
5. F. Ramos, and J. Marti, "Comparison of optical single-sideband modulation and chirped fiber gratings as dispersion mitigating techniques in optical millimeter-wave multichannel systems", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, no. 11, pp. 1479-1481, November 1999.
6. F. Ramos, and J. Marti, "Frequency transfer function of dispersive and nonlinear single-mode optical fibers in microwave optical systems", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12, no. 5, pp. 549-551, May 2000.
7. F. Ramos, J. Marti, V. Polo, J. M. Fuster, and F. J. Martinez, "Performance comparison of DSF- and SOA-based conjugators in ASE-limited digital microwave optical links", in 26<sup>th</sup> European Conference on Optical Communications (ECOC'2000), paper 3.2.6, Munich, September 2000.
8. F. Ramos, J. Marti, V. Polo, and J. M. Fuster, "Dispersion-tolerant data transmission based on the use of fiber-induced self-phase modulation in microwave optical links", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 27, no. 1, pp. 1-4, October 2000.

## 5 Citaciones por parte de otros investigadores

Las publicaciones de esta Tesis han sido referenciadas en 7 artículos internacionales de los autores que se detallan a continuación:

### ***H. Sotobayashi***

Communications Research Laboratory  
Ministry of Posts and Telecommunications, Tokyo, Japan

### ***K. Kitayama, Senior Member IEEE***

Department of Electronics and Information Systems  
Graduate School of Engineering, Osaka, Japan

1. Electron. Lett., vol. 35, no. 12, pp. 992-993, June 1999.
2. J. Lightwave Technol., vol. 17, no. 10, pp. 1774-1781, October 1999.
3. J. Lightwave Technol., vol. 17, no. 12, pp. 2488-2497, December 1999.

### ***A. Loayssa, E. Galbete, D. Benito, M. J. Garde***

Universidad Pública de Navarra, España

4. ECOC'99, pp. 416-417, September 1999.
5. Optics Lett., vol. 25, no. 17, pp. 1234-1236, September 2000.

### ***A. V. T. Cartaxo***

Grupo de Comunicaciones Ópticas  
Instituto de Telecomunicación, Lisboa, Portugal

### ***B. Wedding, W. Idler***

ALCATEL SEL AG, Stuttgart, Alemania

6. J. Lightwave Technol., vol. 17, no. 10, pp. 1806-1813, October 1999.

### ***S. A. Havstad, A. B. Sahin, O. H. Adamczyk, Y. Xie, A. E. Willner, Senior Member IEEE***

Department of Electrical Engineering-Systems  
University of Southern California, Los Angeles, USA

7. IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12, no. 8, pp. 1052-1054, August 2000.

\*se adjunta copia de los artículos