



María José Erro Betrán obtuvo el título de Ingeniera de Telecomunicación en octubre de 1996 por la Universidad Pública de Navarra, consiguiendo el 2º puesto del Premio Extraordinario de Terminación de Estudios en la titulación de Ingeniero de Telecomunicación de dicha universidad.

Durante los años 1997 – 1999 disfrutó de una beca de Formación de Profesorado Universitario concedida por el Ministerio de Educación y Ciencia para la realización de la tesis doctoral. Entre octubre de 1999 y octubre de 2001 fue Ayudante de Escuela Universitaria del área de Tecnología Electrónica, pasando después a ser Ayudante de Facultad.

En julio de 2001 obtiene el grado de Doctora Ingeniera por la Universidad Pública de Navarra con una tesis que trata redes de difracción en fibra óptica y sus elementos análogos en tecnología *microstrip*. Es coautora de más de 15 publicaciones en revistas internacionales y de más de 20 contribuciones en congresos internacionales y nacionales, habiendo participado en varios proyectos de investigación financiados por la CICYT.

**Universidad Pública de Navarra**

*Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica*



***Desarrollo de nuevos dispositivos basados en redes de difracción en fibra óptica***

Memoria de la Tesis Doctoral realizada por

**María José Erro Betrán**

y dirigida por

**Dra. María José Garde Alduncin y**

**Dr. David Benito Pertusa**

para optar al grado de

**Doctora Ingeniera de Telecomunicación**

*Pamplona, 2001.*

## ***Datos de la Tesis Doctoral***

---

**Autora:**

María José Erro Betrán

**Título:**

Desarrollo de nuevos dispositivos basados en redes de difracción en fibra óptica

**Directores:**

Dra. María José Garde Alduncin

Dr. David Benito Pertusa

**Fecha de lectura:**

Julio 2001

**Calificación:**

Sobresaliente Cum Laude

**Lugar de realización:**

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Pública de Navarra

# *Resumen*

---

Hoy en día muchos de los servicios de telecomunicación llegan hasta o desde el usuario haciendo uso tanto de redes de transporte de alta capacidad formadas por largas líneas de transmisión sobre fibra óptica, como de redes de acceso que tienden a hacerse también de banda ancha. De hecho, puede afirmarse con seguridad que han sido necesarias redes de telecomunicación de gran capacidad para hacer factible el desarrollo de la actual Sociedad de la Información, redes que, en gran medida, sin emplear la fibra como medio de transmisión no habrían conseguido sus destacadas prestaciones.

Pero todavía ahora se detecta un importante aumento en la demanda de transmisión de información, lo que es debido fundamentalmente a dos factores: en primer lugar, la generación de nuevos servicios como son la transmisión de video e imágenes, la descarga de archivos musicales de alta calidad, el mayor uso Internet, cada vez con un carácter más multimedia, y una tendencia a mantener una estructura de información distribuida; en segundo lugar, el nuevo escenario de libre competencia que resulta de la desregularización del mercado de las telecomunicaciones, que obliga a los antiguos proveedores a la renovación de sus equipos e infraestructuras y a los nuevos operadores al despliegue de sistemas contando con todos los recientes avances conseguidos en las tecnologías de las comunicaciones, todo ello con el objeto de ofrecer al usuario final una alta capacidad de transmisión por el mejor precio.

Son varios los componentes que en los últimos años han sido propuestos para mejorar la capacidad de transmisión y la calidad de las redes anteriormente mencionadas. Entre ellos destacan las redes de difracción sobre fibra óptica que son los elementos sobre los que versa la tesis doctoral. Las redes de difracción que se analizan consisten en una pequeña longitud de fibra óptica, generalmente monomodo, en la que el índice de refracción del núcleo no es constante como en la fibra convencional, sino que varía periódicamente en la dirección de propagación. Esta variación es capaz de producir la transferencia de potencia casi completa desde el modo fundamental que se propaga por la fibra al mismo modo propagándose en sentido opuesto, transferencia que sólo ocurre para determinadas longitudes de onda, de manera que estas redes funcionan como filtros paso banda que reflejan unas longitudes de onda específicas y dejan pasar el resto. Entre sus ventajas pueden citarse las bajas pérdidas de inserción, debido a que están fabricadas en fibra óptica similar a la empleada como medio de transmisión, baja sensibilidad a la polarización y a los efectos no-lineales, tamaño y peso reducidos, alta versatilidad por la cantidad de perturbaciones diferentes que pueden introducirse, coste final bajo. Estos dispositivos han sido clave en el incremento de la capacidad de las redes de fibra óptica, en las que sirven para cubrir distintas necesidades. De entre ellas, la tesis aquí resumida se centra en su primera parte en la propuesta y estudio de diversas

mejoras en el empleo, en enlaces de fibra de larga distancia y para compensar la nociva dispersión cromática, de un tipo especial de redes de difracción, las redes con *chirp* que son las que presentan un periodo de la perturbación del índice de refracción variable con la posición.

Para dar respuesta a las nuevas exigencias surgidas en cuanto a capacidad de transmisión, no basta con aumentar las prestaciones de los enlaces de fibra óptica que conforman el núcleo de la red, sino que hay que actuar también sobre la red de acceso. Son varias las opciones tecnológicas para el desarrollo de redes de acceso de banda ancha, como son las redes por cable (CATV) que utilizan tecnología híbrida de fibra óptica y coaxial (HFC) y las de acceso inalámbrico en las que cobran cada vez mayor peso las redes híbridas fibra-radio (redes HFR), con transporte a las estaciones remotas de la red de radio de la banda de frecuencias de microondas o milimétricas que va a ser radiada (transporte RF) utilizando fibra óptica. En la segunda parte de la tesis, se plantea el reto de encontrar un componente eléctrico que trabaje en las frecuencias de microondas o milimétricas y tenga capacidades parecidas a las de las redes de difracción en óptica, para así poder mejorar las características de los procesos de tratamiento de la señal eléctrica (filtrado, multiplexación/demultiplexación) que se llevan a cabo en la parte eléctrica de estas redes HFR o HFC. Para ello se sugiere y analiza el empleo de unos dispositivos novedosos, análogos a las redes de difracción en fibra pero realizados en tecnología *microstrip*, que son un tipo concreto de estructuras PBG (Photonic Band Gap). Las estructuras PBG o cristales fotónicos, nombre tomado obviamente del campo de la óptica aunque los dispositivos se empleen también en el rango de las microondas y milimétricas, son estructuras periódicas artificiales en una, dos o tres dimensiones del espacio, cuya periodicidad controla la propagación de ondas electromagnéticas en frecuencia o dirección.

Como se ha indicado más arriba, en la primera parte de la tesis se analiza el uso de redes de difracción en fibra óptica para la compensación de la dispersión cromática en enlaces de fibra de alta velocidad o gran longitud. La mayoría de las fibras ópticas actualmente instaladas (y también todavía las más fabricadas, alrededor del 90 % de la fibra óptica que en 1999 se producía) son fibras diseñadas con el cero de dispersión cromática situado en 1310 nm. Sin embargo, los sistemas actuales funcionan en la tercera ventana, alrededor de los 1550 nm, porque es la zona de funcionamiento de los amplificadores dopados con Erblio, que eliminan la necesidad de recurrir a la regeneración electrónica para contrarrestar los efectos de la atenuación de la fibra, que por otra parte son mínimos en esta zona del espectro. Por ello, la dispersión cromática limita la capacidad de los sistemas por el ensanchamiento de los bits y la consiguiente interferencia entre símbolos que deteriora la calidad en el extremo receptor. Este efecto es especialmente importante en sistemas de alta velocidad como los actuales ya que, por ejemplo, si la velocidad de transmisión es de 20 Gb/s, la propagación por tan sólo 15

km de fibra degrada por completo la transmisión. Además, incluso las fibras ópticas más modernas que se instalan actualmente no son de dispersión cromática cero en 1550 nm, ya que, debido a los efectos no-lineales de las fibras ópticas, se ha comprobado que es mejor no anular completamente su coeficiente de dispersión. En consecuencia, para aumentar la velocidad en estos sistemas es necesario compensar los efectos indeseables de la dispersión, siendo esta la aplicación más extendida de las redes de difracción con *chirp*.

Para que cumplan este cometido, la función de transferencia de una red Bragg con *chirp* debe tener el mayor ancho de banda posible, pérdidas de inserción bajas y constantes en toda la banda de paso y dispersión constante. Sin embargo, en la tesis se comprueba que el producto ancho de banda x dispersión que se consigue con estos dispositivos está limitado por su longitud. Además el objetivo de conseguir la máxima reflectividad para minimizar las pérdidas de inserción es contrapuesto al objetivo de conseguir un retardo de grupo lineal, siendo por añadidura determinante la ventana que se elija para suavizar la desadaptación de índices de refracción producida por la perturbación en los extremos de la estructura. Puesto que se sabe que el efecto más perjudicial sobre la calidad de la señal recibida es el producido por las distorsiones no deseadas en la curva del retardo, en la tesis se hace un estudio detallado de cómo influyen los distintos parámetros de diseño sobre la característica de retardo. En este estudio se separan, por primera vez y según se aconsejaba en recientes trabajos sobre este tema, la influencia que ejercen las características físicas de la red de difracción sobre la distorsión del retardo de frecuencia superior a la velocidad de transmisión de la señal que se quiere ecualizar o rizado rápido y la que tienen sobre la distorsión de frecuencia menor que esta velocidad de transmisión, que se ha obtenido como el coeficiente de dispersión de tercer orden generado en la red de difracción.

Del análisis llevado a cabo, se ha concluido que ambos tipos de rizado son especialmente significativos en redes alta reflectividad y con dispersiones de segundo orden de valor elevado en anchos de banda pequeños. Redes de mayor longitud reducen la presencia de dispersión de tercer orden y del rizado rápido, pero para ciertos tipos de ventanas de suavizado de la perturbación (Gauss, Supergauss, Uniforme) la reducción en el rizado rápido es muy inferior a la conseguida en idénticas condiciones para redes con otras ventanas (Coseno, Tangente Hiperbólica, ...), por lo que se preferirán estas últimas para la aplicación de las redes de difracción Bragg con *chirp* como compensadores de dispersión. Además, se ha encontrado que, en general, el parámetro  $K$  de la ventana aplicada a la red de difracción, no sólo permite calcular su longitud equivalente, que se ha demostrado que es la que se ha de usar en las ecuaciones de diseño, sino por añadidura permite saber qué ventana produce mayor rizado o mayor dispersión de tercer orden. La elección de la ventana es siempre una solución de compromiso entre distorsionar la red con rizado rápido o con rizado lento (dispersión de tercer orden), pues también se ha concluido que un aumento en dicho parámetro reduce

el valor del coeficiente de dispersión cúbica a costa de empeorar el rizado. Una de las ventanas que mejor solución de compromiso consigue es la Tangente Hiperbólica Positiva  $\alpha = 4$ .

Las conclusiones obtenidas de este análisis no sólo son útiles para el diseño de compensadores de dispersión cromática sino que además facilitan el diseño de un emulador de fibra óptica monomodo que reproduce, dentro del ancho de banda de la red Bragg empleada, la dispersión cromática introducida por largas distancias de fibra óptica monomodo haciendo uso de una red de difracción con *chirp*, dispositivo en el que es preciso un buen control de las características de la red para conseguir emular de forma adecuada la atenuación del enlace de fibra, su dispersión de segundo orden y su dispersión de tercer orden, simultáneamente, sin añadir distorsión en forma de rizado a la curva de retardo. Se ha demostrado el funcionamiento de este dispositivo para dos tipos de fibra: fibra estándar (alta dispersión de segundo orden, alta atenuación) y fibra de dispersión desplazada (baja dispersión de segundo orden, baja atenuación, mayor importancia de la dispersión de tercer orden), comentando las limitaciones impuestas por la longitud finita de la red de difracción, así como las soluciones de compromiso adoptadas en cada caso.

El hecho de haber obtenido la distorsión de rizado lento como un coeficiente de dispersión de tercer orden presenta la ventaja de que pueden así aprovecharse todos los datos que sobre las consecuencias en la transmisión de este tipo de distorsión del retardo estén disponibles, gracias a estudios realizados por ejemplo para la dispersión cúbica provocada por la fibra, y que puedan emplearse también todos los esquemas ya conocidos para evitar o corregir estas consecuencias. Como se ha encontrado que los valores de dispersión de tercer orden que presentan las redes de difracción Bragg empleadas como compensadoras de la dispersión cromática en largos enlaces de fibra son más elevados que los debidos al propio enlace de fibra y además, una vez compensada la dispersión cromática, es la dispersión de tercer orden la que limita los sistemas, siendo especialmente nociva en sistemas con multiplexación TDM/WDM o en sistemas de alta velocidad por el gran ancho de banda, se ha propuesto también un dispositivo basado en redes de difracción con un *chirp* que varía con la raíz cuadrada de la posición, diseñado para corregir la mencionada dispersión cúbica.

Si bien a partir de los datos obtenidos en la primera parte es posible diseñar un compensador de dispersión basado en una red de difracción con *chirp* de calidad suficiente, su empleo en las redes actuales puede no ser suficiente porque comparte con la mayoría de los dispositivos propuestos para esta aplicación el inconveniente de compensar una cantidad de dispersión cromática fija. En un contexto en el que, cada vez más, las condiciones de transmisión varían de manera habitual, y no únicamente por cambios en las condiciones ambientales o en los elementos de generación, transporte o recepción de la señal, sino también porque se tiende a redes con conmutación óptica en las que las distancias entre emisor y receptor cambian dinámicamente, se hace

imprescindible la disponibilidad de esquemas de compensación de dispersión que puedan ser reconfigurados ágil y rápidamente. Como respuesta a esta necesidad, en este trabajo de tesis doctoral se propone una forma de sintonizar eléctricamente la dispersión de segundo orden generada en una red con *chirp*.

El sistema está inspirado en sistemas espaciales de imagen, pudiendo ser considerado como su equivalente temporal. Consta por tanto de una red con *chirp* que introduce dispersión (el equivalente a la difracción espacial por propagación en el espacio), seguida de un elemento que ha de ser el equivalente en el tiempo de una lente delgada, y de nuevo de otro u otros elementos dispersivos, redes de difracción y enlace de fibra en este caso. En este sistema se consigue la sintonía de la dispersión variando el foco temporal del sistema al cambiar las propiedades de la lente temporal (en este caso, un modulador de fase electro-óptico). Una de las ventajas del esquema propuesto es que consigue variar la dispersión de la red Bragg externamente, sin actuar sobre los parámetros que determinan la respuesta en longitud de onda de dicha red, lo que lo hace válido para la sintonía de cualquier dispositivo que presente un retardo de grupo con la longitud de onda, de los que la red de difracción Bragg con *chirp* no es sino una de las posibles alternativas. Otra de las virtudes de este sistema es que logra la sintonía de la dispersión mediante la simple variación de la frecuencia o amplitud de una señal eléctrica.

La validez de este nuevo esquema se ha demostrado con un análisis matemático para un pulso gaussiano, completado con estudios numéricos de cómo afectan al sistema las características de cada uno de los dispositivos que lo forman, no incluidas en aquel análisis por simplicidad. Se consideran los efectos de las imperfecciones en la curva de retardo de las redes de difracción, de su limitación en ancho de banda, de la forma de coseno y la máxima amplitud de la tensión aplicada al modulador electro-óptico,... Se ha comprobado que el sistema triplica en general, con respecto a un compensador fijo, la dispersión de segundo orden residual que puede admitirse en el extremo final de un sistema de comunicaciones digital por fibra óptica sin un empeoramiento excesivo de la calidad de la transmisión. En concreto, se ha demostrado este gran rango de sintonía con el análisis de la penalización en la apertura de los diagramas de ojo de sistemas con velocidad de transmisión de 10 y 40 Gb/s, con codificación NRZ y RZ, sistemas típicos en redes SDH/TDM de alta velocidad. Con la configuración propuesta puede hacerse un ajuste fino en tiempo real de la dispersión cromática ofrecida por el compensador, pudiendo variar las características de la señal recibida, para adaptarse a cambios imprevistos en las condiciones del enlace o en las necesidades del operador del sistema. Pueden adaptarse las condiciones de transmisión modificando la señal eléctrica para tener más inmunidad al *jitter* o falta de sincronismo o más inmunidad al ruido, según las características requeridas. Este sistema de sintonía es apto además tanto para velocidades de transmisión bajas como para altas velocidades y sería especialmente útil

en sistemas con multiplexación óptica en el dominio del tiempo (OTDM) si se hiciera la sintonía antes de la multiplexación.

El reto abordado en la segunda parte de la tesis era el traslado de todo el conocimiento adquirido sobre redes de difracción en fibra óptica al desarrollo de estructuras análogas que funcionasen en un rango de frecuencias bien distinto, el de microondas o milimétricas propio de las redes de acceso. Un reto justificado por dos razones: los grandes avances logrados en los enlaces de fibra óptica gracias al desarrollo en estos años recientes de muy diversos tipos de redes de difracción sobre fibra óptica, por un lado; la reciente propuesta de una cierta clase de cristal electromagnético en tecnología *microstrip* con respuestas en frecuencia cualitativamente similares a las redes Bragg en fibra óptica, por otro lado.

Este novedoso elemento fue fabricado por primera vez taladrando una serie de círculos en el plano de masa de una línea *microstrip* en lo demás convencional, justo debajo de la tira conductora, de forma equiespaciada y siendo todos ellos del mismo tamaño. Lo que se consigue con ello es la variación periódica a lo largo de la dirección de propagación de la constante dieléctrica efectiva de una estructura de guiado de ondas electromagnéticas, algo totalmente análogo a lo que se hace para fabricar redes de difracción en fibra óptica, y que permite clasificar a ambos dispositivos como estructuras *photonic band gap* o cristales fotónicos (electromagnéticos si se ha de hablar con propiedad en el caso de la tecnología *microstrip*) unidimensionales.

El primer paso dado en la tesis, tras la comprobación de que el habitual método de análisis de redes de difracción, la teoría de acoplo, plantea serios problemas teóricos y prácticos en cristales electromagnéticos en *microstrip*, es la obtención de un modelo que encuentra la equivalencia entre una red de difracción en fibra y un cristal electromagnético en *microstrip* con la misma respuesta en frecuencia, centrada cada una obviamente en la frecuencia propia de la tecnología en que se construyen. Este modelo, que implica la comprobación de la sugerida analogía entre ambas estructuras y que ha sido validado con simulaciones y medidas, permite un análisis rápido y sencillo de los cristales electromagnéticos que evita el empleo de simuladores electromagnéticos comerciales, caros, lentos y de más difícil manejo. Además, permite obtener por primera vez unas reglas para el diseño de estos dispositivos, diseño que hasta ahora se basaba en el método de prueba y error.

La respuesta en frecuencia del primer cristal electromagnético que se propuso en tecnología *microstrip* era la de un filtro paso-banda en reflexión, pero con un elevado nivel en los lóbulos secundarios y bandas reflejadas presentes también en todos los armónicos de la frecuencia central de la banda principal. Basándose en la demostrada analogía con las redes de difracción, se proponen en la tesis modificaciones sobre la estructura original que mejoran sus cualidades como filtro en frecuencia. Así, mediante

el grabado en el plano de masa de un patrón sinusoidal en lugar de las originarias filas de círculos, se consigue una respuesta en frecuencia con las bandas reflejadas en los armónicos de la banda principal muy atenuadas, algo no habitual en los filtros periódicos clásicos de microondas que siempre presentan reflexión en múltiples bandas.

Para la disminución de los lóbulos laterales, que generarían una interferencia entre canales intolerable en el caso de ser usados para la demultiplexación en frecuencia, se propone el empleo de ventanas para disminuir la desadaptación a la entrada y salida, técnica que se demuestra válida tanto en cristales formados por círculos como en los que la perturbación es sinusoidal. El precio a pagar es la disminución del nivel de rechazo en la frecuencia central, así como el cambio del ancho de banda del filtro y de la pendiente en los flancos de la banda reflejada. En la tesis se define un nuevo parámetro, el número equivalente de periodos, relacionado con el número de periodos por el mismo factor que la longitud equivalente y la longitud física en las redes de difracción Bragg en fibra, y que permite diseñar elementos que incluyan ventanas y por tanto lóbulos secundarios de bajo valor, manteniendo el ancho de banda y la reflectividad de la estructura antes de aplicarse la ventana, debiendo para ello aumentar la longitud total del elemento.

Por otro lado, también se ha comprobado que la variación del periodo a lo largo del dispositivo o *chirp* produce los efectos que se esperan, esto es, un aumento del ancho de banda y una serie de lóbulos laterales que pueden disminuirse de forma considerable también mediante la aplicación de ventanas. Por último, mediante la introducción de cambios de fase en el interior de un cristal electromagnético conseguidos truncando por ambos lados uno de los periodos de estructuras sinusoidales, se introducen finas bandas dentro de la banda de reflexión con transmisión unidad, cuya posición en frecuencia se controla mediante la longitud del periodo central que es eliminada, es decir, con la magnitud del salto de fase introducido en el centro de la estructura del cristal electromagnético.

En último lugar, señalar que las líneas abiertas por esta tesis doctoral pueden agruparse en dos grandes apartados: por un lado, una vez analizado en detalle el sistema temporal equivalente a un sistema de imagen espacial, se pueden estudiar otras aplicaciones como su uso para variar la velocidad de transmisión de señales binarias, la obtención en tiempo real de la transformada de Fourier de una señal de entrada,...; por otro lado, son muchas las variantes que se pueden introducir en los cristales electromagnéticos unidimensionales fabricados en microstrip, para mejorar sus características de filtrado y para conseguir realizar nuevas funciones, además de ser muy interesante el aumentar los grados de libertad del diseño pasando a desarrollar cristales electromagnéticos bidimensionales, con un nuevo mundo de aplicaciones (nuevas guías en microondas, codos, acopladores de alto ancho de banda, ...).

# ***Relación cronológica de las publicaciones nacionales e internacionales de la autora:***

---

## **Publicaciones en revistas internacionales:**

M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde, T. Lopetegi, F. Falcone, and M. Sorolla, "Analysis and design of 1-D photonic bandgap microstrip structures using a fibre grating model," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 223-226, August 1999.

**M. J. Erro**, M. A. Gomez, D. Benito, M. J. Garde, and M. A. Muriel, "A novel electrically tunable dispersion compensation system," *IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 5, pp. 1332-1338, September/october 1999.

D. Benito, **M. J. Erro**, M. A. Gomez, M. J. Garde, and M. A. Muriel, "Emulated single-mode fiber-optic link by use of a linearly chirped fiber Bragg grating," *IEEE Journal Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 5, pp. 1345-1352, September/october 1999.

D. Benito, M. A. Gomez, **M. J. Erro**, M. J. Garde, and M. A. Muriel, "Chirped fiber grating-based fiber optic communication evaluator: design and implementation," *Optical Engineering*, vol. 38, no. 10, pp. 1640-1644, October 1999.

**M. J. Erro**, M. A. G. Laso, T. Lopetegi, D. Benito, M. J. Garde, and M. Sorolla, "Optimization of tapered Bragg reflectors in microstrip technology," *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 21, no. 2, pp.231- 245, February 2000

M. A. G. Laso, T. Lopetegi, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde, and Mario Sorolla, "Novel wideband photonic bandgap microstrip structures," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 24, no. 5, pp. 357-360, March 2000.

T. Lopetegi, M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde, F. Falcone, and M. Sorolla, "Novel photonic bandgap microstrip structures using network topology," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 25, no. 1, pp. 33-36, April 2000.

M. A. G. Laso, T. Lopetegi, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde, and M. Sorolla, "Multiple-frequency-tuned Photonic Bandgap microstrip structures," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 10, no. 6, pp. 220-222, June 2000.

**M. J. Erro**, M. A. G. Laso, D. Benito, M. J. Garde, and M. A. Muriel, "Third-order dispersion in linearly chirped Bragg gratings and its compensation," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 19, no. 4, pp. 367-382, September 2000.

**M. J. Erro**, M. A. G. Laso, T. Lopetegi, D. Benito, M. J. Garde, and M. Sorolla, "Modeling and testing of uniform fiber Bragg gratings using 1-D photonic bandgap structures in microstrip technology," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 19, no. 4, pp. 311-325, September 2000.

**M. J. Erro**, M. A. G. Laso, T. Lopetegui, M. J. Garde, and D. Benito, "Electrically tunable dispersion compensation in a high bit rate TDM system using fiber Bragg gratings," *Electronics Letters*, vol. 37, no. 13, pp. 847-848, June 2001.

M. A. G. Laso, T. Lopetegi, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde, M. A. Muriel, M. Sorolla, M. Guglielmi, "Chirped delay lines in microstrip technology," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol 11, no. 12, pp. 486-488, December 2001.

**M. J. Erro**, M. A. G. Laso, T. Lopetegi, D. Benito, M. J. Garde, and M. Sorolla, "Analysis and design of electromagnetic crystals in microstrip technology using a fiber grating model," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 297-310; January 2002

T. Lopetegi, M. A. G. Laso, R. Gonzalo, **M. J. Erro**, F. Falcone, D. Benito, M. J. Garde, P. de Maagt, and M. Sorolla, "Electromagnetic crystals in microstrip technology," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 34, no. 1, pp. 279-295, January 2002

### **Publicaciones en congresos internacionales y nacionales**

M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde y M. A. Muriel, "Distribución de los compensadores de dispersión en sistemas ópticos de gran longitud: Fluctuaciones de la distancia de regeneración", Libro de Actas del *XIII Simposium Nacional U.R.S.I.'98*, Pamplona, Septiembre 1998.

**M. J. Erro**, M. A. G. Laso, D. Benito, M. J. Garde y M. A. Muriel, "Relación entre la dispersión cúbica de las redes Bragg y sus parámetros físicos", Libro de Actas del *XIII Simposium Nacional U.R.S.I.'98*, Pamplona, Septiembre 1998.

D. Benito **M. J. Erro**, M.J. Garde, M. A. Muriel, "Single-Mode Fiber-Optic Link Emulator based on a Chirped Fiber Grating," *Proc. WFOPC IEEE/LEOS 98*, Pavia (Italia), September 1998.

**M. J. Erro**, M.A. G. Laso, D. Benito, M. J. Garde, M. A. Muriel, "Electrically tunable dispersion compensation system," *Proc. 11th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, paper WT6, vol.1, Orlando (USA), December 1998.

M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, D. Benito, M.J. Garde, M. A. Muriel, "Third order dispersion compensation of linearly chirped Bragg gratings," *Proc. 11th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society*, paper FE5, vol.1, Orlando (USA), December 1998.

**M. J. Erro**, M. A. G. Laso, D. Benito, M. J. Garde, T. Lopetegi, F. Falcone, and M. Sorolla, "Extended model based on the coupled-mode theory in fibre gratings for the analysis and design of 1-D photonic bandgap devices in microstrip technology", *Proc. of SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, pp. 166-175, Denver, Colorado, July 1999.

M. A. G. Laso, T. Lopetegi, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde y M. Sorolla, "Aplicación de técnicas para el aumento de ancho de banda a estructuras de bandgap fotónico en tecnología microstrip", Libro de Actas del *XIV Simposium Nacional U.R.S.I.'99*, pp. 75-76, Santiago de Compostela, Septiembre 1999.

M. J. Asarta, A. Escudero, M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, T. Lopetegi, D. Benito, M. J. Garde y M. Sorolla, "Análisis y diseño de estructuras de bandgap fotónico en microstrip usando un modelo equivalente de red de difracción óptica", Libro de Actas del *XIV Simposium Nacional U.R.S.I.'99*, pp. 83-84, Santiago de Compostela, Septiembre 1999.

M. Ezcurra, R. Artieda, **M. J. Erro**, M. A. G. Laso, T. Lopetegi, D. Benito, M. J. Garde y M. Sorolla, "Estudio comparativo de las prestaciones obtenidas por distintas ventanas aplicadas a estructuras de bandgap fotónico en tecnología microstrip", Libro de Actas del *XIV Simposium Nacional U.R.S.I.'99*, pp. 73-74, Santiago de Compostela, Septiembre 1999.

M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, T. Lopetegui, D. Benito, M. J. Garde, F. Falcone, and M. Sorolla, "Optimization of tapered photonic bandgap structures in microstrip", Proc. of the 24<sup>th</sup> *International Conference on Infrared and Millimeter Waves*, TH-D2, Monterey, California, September 1999.

M. López-Amo, M.J. Garde, I. Zabala, J. Sevilla, I. Matias, M.A. Erro, D. Benito, C. Barriain, c. Aramburu, F. J. Arregui, A. Loayssa, M. Galarza, **M. J. Erro**, A. Gaston, M.A. Gomez, A. Unanua, S. Abad, C. Fernandez, M.A. Galdeano, "Grupo de comunicaciones ópticas y aplicaciones electrónicas," *Libro de Actas de la Reunión Española de Optoelectrónica (Optoel'99)*, pp. 27-28, Teruel, Septiembre 1999.

M. López-Amo, M.J. Garde, I. Zabala, J. Sevilla, I. Matias, M.A. Erro, D. Benito, C. Barriain, c. Aramburu, F. J. Arregui, A. Loayssa, M. Galarza, **M.J. Erro**, A. Gaston, M.A. Gomez, A. Unanua, S. Abad, C. Fernandez, M.A. Galdeano, "Líneas actuales de trabajo en optoelectrónica en la Universidad Pública de Navarra," *Libro de Actas de la Reunión Española de Optoelectrónica (Optoel'99)*, pp. 149-154, Teruel, Septiembre 1999.

**M. J. Erro**, T. Lopetegui, M. A. G. Laso, D. Benito, M.J. Garde, F. Falcone, and M. Sorolla, "Novel wideband photonic bandgap microstrip structures", Proceedings of the 29<sup>th</sup> *European Microwave Conference*, pp. 345-348, Munich, Germany, October 1999.

T. Lopetegui, M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, F. Falcone, and M. Sorolla, "Bandpass filter in microstrip technology using photonic bandgap reflectors", Proceedings of the 29<sup>th</sup> *European Microwave Conference*, pp. 337-340, Munich, Germany, October 1999.

T. Lopetegui, M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, D. Benito, M.J. Garde, F. Falcone, and M. Sorolla, "New Results in Microstrip Grating Technology", invited conference in 7<sup>th</sup> *International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology (ISRAMT'99)*, pp. 507-510, Málaga, December 1999.

T. Lopetegui, M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde, F. Falcone, and M. Sorolla, "Microstrip continuous gratings (MCGs)", Proc. of the 7<sup>th</sup> *International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology (ISRAMT'99)*, pp. 601-604, Málaga, December 1999.

T. Lopetegui, M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, R. Gonzalo, J. Tirapu, A. Marcotegui, D. Benito, M. J. Garde, and M. Sorolla, "Electromagnetic Crystals in Microstrip Technology", Technical Digest of the *International Workshop on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures (PECS)*, W4-9, Sendai, Japan, March 2000.

M. Irisarri, T. Lopetegui, M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, D. Benito, M.J. Garde, and M. Sorolla, "Optimization of compact photonic bandgap microstrip structures", Proc. of the *Millennium Conference on Antennas and Propagation, (AP2000)*, 1A9, Davos, Switzerland, April 2000.

T. Lopetegui, M. A. G. Laso, **M. J. Erro**, R. Gonzalo, J. Tirapu, A. Marcotegui, D. Benito, M. J. Garde, and M. Sorolla, "Photonic Crystals in Microstrip Technology", presented at the *NATO ASI - Photonic Crystals and Light Localization*, Crete, Greece, June 2000.

M. A. G. Laso, T. Lopetegui, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde, and M. Sorolla, "Estructuras continuas de Bandgap Fotónico en tecnología microstrip con sintonía múltiple", Libro de Actas del *XV Simposium Nacional U.R.S.I.'00*, pp. 257-258, Zaragoza, Septiembre 2000.

M. A. G. Laso, T. Lopetegui, R. Gonzalo, **M. J. Erro**, D. Benito, M. J. Garde, P. de Maagt, and M. Sorolla, "Applications of Electromagnetic Crystals in Microstrip Technology", Proceedings of the 30<sup>th</sup> *European Microwave Conference*, pp. 108-111, Paris, France, October 2000.

## ***Otros méritos relacionados con la tesis doctoral:***

---

### **a) Referencias al trabajo por parte de otros investigadores:**

En las publicaciones que a continuación se citan se referencian algunos de los trabajos de la autora.

- “Collisions between spatiotemporal solitons of different dimensionality in a planar waveguide,” H.E. Nistazakis, D.J. Frantzeskakis, B.A. Malomed, *Physical Review E*, vol. 6402, no. 2, p. 6604, 2001.
- “Novel microstrip bandgap cell structures,” Z.W. Du, K. Gong, J.S. Fu, B.X. Gao, *Int. Journal of Infrared and Milimeter Waves*, vol. 22, no. 7, pp. 1075-1086, 2001.
- “Line of periodically arranged passive dipole scatterers,” S.A. Tretyakov, A.J. Viitanen, *Electrical Engineering*, vol. 82, no. 6, pp. 353-361, 2000.
- “Meander microstrip photonic bandgap filter using a Kaiser tapering window,” A. Dorazio, M. Desario, V. Gadaleta, V. Petruzzelli, F. Prudenzano, *Electronic Letters*, vol. 37, no. 19, pp. 1165-1167, 2001.
- “Efecto del parámetro de control de la variación media de la modulación de índice en redes de difracción de Bragg de fibra compensadoras de dispersión”, P. Fernández, J:C. Aguado, J. Blas, F. González, I. De Miguel, RM. Lorenzo, EJ. Abril, M. López, Libro de Actas del *XVI Simposium Nacional U.R.S.I.'01*, Villaviciosa de Odón, Septiembre 2001.

### **b) Proyectos a los que se asocia la tesis doctoral**

Este trabajo de tesis doctoral fue realizado en el contexto de dos proyectos de investigación financiados por la CICYT [TIC95-0250-C02-02] y [TIC98-1073-C02-02] y en parte gracias a los resultados obtenidos surge la posibilidad de solicitar un nuevo proyecto de investigación coordinado con el grupo de comunicaciones ópticas de la Universidad Politécnica de Valencia y el grupo de Tecnología Electrónica de la Universidad Sevilla, proyecto que ha sido también aprobado recientemente por la CICYT [TIC2001-2969-C03].

### **c) Revisora de la revista internacional *Optical Engineering***

**d) Aplicabilidad práctica e interés industrial:**

La autora participó en un proyecto entre la Universidad Pública de Navarra y la empresa Talltec Sensors con un estudio sobre dos de los dispositivos analizados en la tesis doctoral, las redes de difracción en fibra óptica y los cristales fotónicos o electromagnéticos.

Por otro lado, la continuación del trabajo iniciado en esta tesis doctoral ha dado lugar a una patente nacional, sobre un sistema de análisis espectral basado en cristales electromagnéticos realizados en tecnología *microstrip*.