



José Azaña Luna, nacido en Toledo en Diciembre de 1972, obtuvo el Título de Ingeniero de Telecomunicación en Mayo de 1997 y el grado de Doctor Ingeniero en Febrero de 2001, ambos por la *Universidad Politécnica de Madrid*. Realizó su Tesis Doctoral en el *Grupo de Señal Fotónica* de la *Universidad Politécnica de Madrid*, bajo la dirección del Prof. Miguel A. Muriel, disfrutando de una Beca de Formación de Personal Investigador concedida por la Comunidad de Madrid (1997-2001). Durante este periodo realizó varias estancias de investigación en diversas Universidades Norteamericanas, incluidas la *University of Toronto* (Canadá) y la *University of California* (EE.UU.), donde completó parte de los experimentos de su Tesis Doctoral. En Octubre de 2001, el Dr. Azaña se incorporó al *Photonic Systems Group* de *McGill University* (Montreal, Canadá), donde trabaja como Investigador Postdoctoral, parcialmente financiado por el Ministerio de Educación y Cultura Español. Hasta la fecha, su trabajo de investigación se ha centrado fundamentalmente en el área de tecnologías en fibra óptica para el procesado de señal fotónica ultrarrápida, con aplicaciones en sistemas de telecomunicación por fibra y sistemas de computación óptica. Su trabajo científico ha dado lugar a más de 30 publicaciones en revistas y congresos de prestigio internacional, habiendo merecido además el reconocimiento de la *Optical Society of America (OSA)* durante dos años consecutivos (2000 y 2001) en su selección anual de las contribuciones científicas de mayor relevancia en el área de óptica.

DATOS DE LA TESIS DOCTORAL

“PROCESADO DE SEÑAL FOTÓNICA MEDIANTE TRATAMIENTOS DUALES EN REDES DE DIFRACCIÓN EN FIBRA”

Autor

José Azaña Luna
Ingeniero de Telecomunicación (U.P.M.)

Director

Miguel Ángel Muriel Fernández
Catedrático de Universidad (U.P.M.)

Entidad Investigadora

Departamento de Tecnología Fotónica
E.T.S.I. Telecomunicación
Universidad Politécnica de Madrid

Fecha de Defensa

2 de Febrero de 2001

Calificación

Sobresaliente *Cum Laude* (por unanimidad)

Montreal, 1 de Febrero de 2002

RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL

“PROCESADO DE SEÑAL FOTÓNICA MEDIANTE TRATAMIENTOS DUALES EN REDES DE DIFRACCIÓN EN FIBRA”

I.- Introducción: Contexto y Antecedentes

I.1. *Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica*

Los sistemas de telecomunicación utilizando fibra óptica como medio de transmisión ofrecen una extraordinaria capacidad potencial: la fibra óptica permite soportar anchos de banda de hasta 30 THz, a las longitudes de onda típicas de comunicación óptica 1.3 μ m y 1.5 μ m. Como resultado, tales sistemas están siendo rápidamente demandados en aplicaciones de tipo multimedia, especialmente en redes digitales de servicios integrados (servicios de Internet, por ejemplo), donde los requerimientos de ancho de banda son cada día mayores [1].

A efectos de utilizar eficientemente todo el ancho de banda disponible en la fibra óptica, los sistemas de comunicación óptica por fibra de generación futura harán uso de alguna o varias estrategias de multiplexación (transmisión simultánea de varios canales de comunicación). Hasta la actualidad se han propuesto y utilizado fundamentalmente tres estrategias: la multiplexación por división en longitud de onda (WDM), la multiplexación por división en el tiempo óptico (OTDM), y protocolos de acceso al medio óptico por división de código (OCDMA). Cada uno de dichos esquemas de multiplexación tiene sus propias ventajas e inconvenientes. En general, la tecnología más adecuada dependerá de la aplicación concreta y los requerimientos del sistema al que deba incorporarse. No obstante, la combinación de varias técnicas diferentes, por ejemplo esquemas híbridos WDM/OTDM o WDM/OCDMA, puede resultar la solución tecnológica más acertada para cubrir de forma efectiva la creciente demanda de ancho de banda.

El esfuerzo investigador en el área de sistemas de fibra óptica se concentra actualmente en la eliminación de cualquier paso al dominio electrónico (excepción hecha de los procesos de detección). Las operaciones con electrónica convencional constituye un auténtico “cuello de botella” en estos sistemas y limitan drásticamente las posibilidades de utilización óptima todo el potencial de ancho de banda de la fibra óptica. En otras palabras, como objetivo principal en el área de las telecomunicaciones por fibra, se busca una transparencia óptica total entre el origen y destino. Esto exige, por un lado, el desarrollo de nuevas tecnologías que posibiliten la implementación todo-óptica de las estrategias multi-canal mencionadas y, por otro lado, el desarrollo de nuevos dispositivos fotónicos para el procesamiento de las señales siempre en el dominio óptico, especialmente para aquellos procesos y operaciones que típicamente se están realizando en el dominio electrónico (incluyendo encaminamiento, conmutación, etc.). En última instancia, el desarrollo de todas estas tecnologías posibilitará la implementación práctica de redes de comunicación completamente ópticas (incluyendo la muy deseable Internet Óptica).

I.2. *Dispositivos Basados en Redes de Difracción de Bragg en Fibra Óptica*

La tecnología de redes de difracción de Bragg en fibra óptica [2] es una de las tecnologías claves para la consecución de los objetivos arriba mencionados. Una red de difracción en fibra es

una perturbación periódica del índice de refracción a lo largo de núcleo de la fibra, que se graba permanentemente por exposición del mismo a un patrón de interferencia óptica intenso. Básicamente, estos componentes operan como filtros paso-banda, reflejando unas frecuencias específicas y transmitiendo el resto. Entre sus múltiples ventajas conviene destacarse que se trata de componentes pasivos en fibra (bajas pérdidas de inserción), muy compactos (unos pocos centímetros, a lo sumo), poco sensibles a la polarización y que actualmente resultan relativamente baratos y sencillos de fabricar. En los últimos años, numerosos grupos de investigación han centrado su interés en los diversos aspectos relacionados con esta tecnología en fibra, fundamentalmente por su tremenda significación práctica. Los métodos que, basados en la técnica de máscara de fase, se utilizan actualmente para la escritura de redes de Bragg en fibra, permiten la obtención de prácticamente cualquier perfil de índice arbitrario. Esta enorme flexibilidad se traduce, a su vez, en la gran variedad de funciones de transferencia espectrales que las redes de difracción son capaces de proporcionar en sus respuestas en reflexión (más corrientemente) o transmisión. De esta forma han podido fabricarse dispositivos en fibra que no eran previamente posibles, capaces de aportar soluciones tecnológicamente viables a algunos de los problemas latentes en los sistemas de comunicación por fibra. Entre las aplicaciones más relevantes de estos dispositivos conviene mencionarse las siguientes: operaciones de filtrado óptico, aplanado de la curva de ganancia de los amplificadores ópticos en fibra, compensación de la dispersión cromática en enlaces de fibra óptica y un largo etcétera.

En la actualidad, la investigación en el área se centra en la búsqueda de nuevas estructuras de difracción en fibra y nuevas aplicaciones para las mismas. En concreto se están ensayando estructuras complejas, usando la concatenación o superposición de redes de difracción básicas, con interesantes aplicaciones en sistemas ópticos basados en alguna de las estrategias de multiplexación ya mencionadas (OCDMA o WDM, fundamentalmente). Así mismo, se encuentra en plena fase de investigación la potencialidad de aplicación de estructuras de difracción en fibra para la realización en el dominio todo-óptico de técnicas de procesado de señal que típicamente se han venido implementando mediante electrónica convencional [3], [4].

1.3. Tecnologías de Láseres Pulsados Ultra-Rápidos

Otra de las contribuciones fundamentales a la evolución de las comunicaciones ópticas en la forma deseada lo constituye el desarrollo de la tecnología láser de pulsos temporales ultra-cortos [5]. Fuentes láser en fibra pulsadas a velocidades en el régimen de los terahertzios han sido ya propuestas y demostradas experimentalmente y se está llevando a cabo un enorme esfuerzo investigador hacia la consecución de fuentes multi-longitud de onda pulsadas a elevados regímenes binarios para su utilización en sistemas basados en WDM y sistemas híbridos WDM/OTDM [6]. El avanzado estado de madurez de la tecnología de láseres ultra-rápidos hace ahora necesario el desarrollo de nuevos dispositivos que permitan la adecuada manipulación y procesado de los pulsos temporales ultracortos que pueden generarse. Destacaré en este punto que el procesado de pulsos ultracortos no solamente resulta de interés para aplicaciones de telecomunicaciones, sino también en otras muchas áreas científicas, tales como computación óptica, en el estudio de propiedades transitorias y no lineales de materiales y dispositivos, espectroscopia molecular, etc. [7].

II.- Motivación y Contribuciones Originales de la Tesis

Con el trabajo de Tesis Doctoral a concurso se ha pretendido fundamentalmente investigar la potencialidad de aplicación de redes difracción en fibra, operando en el régimen lineal, al procesamiento óptico de la señal (y más en particular, al tratamiento de la forma temporal de pulsos ópticos). Las redes de difracción en fibra resultan especialmente atractivas de cara a tal aplicación por las ventajas antes enumeradas. Para la consecución de nuestros objetivos, se ha ahondado primeramente en el conocimiento de las propiedades ópticas y dispersivas de redes de difracción en fibra, utilizando para ello herramientas de análisis de señal en el dominio conjunto tiempo – frecuencia (TF). Este tipo de análisis resulta óptimo para la caracterización del comportamiento dispersivo de los componentes, en tanto que involucra a las dos variables de interés, el tiempo y la frecuencia, de forma simultánea. Además de su utilidad desde este punto de vista, se ha demostrado que la representación en el dominio TF del coeficiente de reflexión de campo de cualquier red de difracción en fibra proporciona información clave sobre la estructura física asociada. Este hecho se ha utilizado para el desarrollo de nuevas técnicas de síntesis de redes de difracción en fibra, basadas en distribuciones de señal TF. Dichas técnicas se han demostrado, así mismo, útiles para aplicaciones de sensado de esfuerzo o temperatura distribuidos a lo largo de un tramo de fibra. Como otra de las aportaciones más relevantes de cara a la aplicación de redes de difracción al procesamiento óptico de pulsos temporales, se ha definido, formalizado y demostrado la dualidad matemática que, bajo condiciones apropiadas, se da entre las ecuaciones que describen la difracción espacial de haces de luz coherente y la dispersión temporal de pulsos ópticos reflejados en redes de difracción en fibra de “chirp” lineal (RDCLs). Dicha dualidad nos permite la traslación al dominio temporal de conceptos y técnicas bien conocidas de procesamiento de señal óptica espacial. Esta idea nos ha permitido diseñar este tipo de componentes para diversas aplicaciones de interés: realización de analizadores de espectros ópticos en tiempo real y aplicaciones asociadas; implementación de técnicas de auto-imagen para la multiplicación de frecuencias de repetición de secuencias periódicas de pulsos ópticos, etc. Finalmente se han propuesto y demostrado nuevas estructuras de difracción en fibra para la implementación simultánea de las técnicas de procesamiento de señal basadas en redes de difracción sobre varios canales espectrales (canales de comunicación en sistemas multiplexados en longitud de onda, WDM).

A continuación se presentan, de forma resumida, las aportaciones más relevantes del trabajo de Tesis.

II.1. Estudio de Propiedades Ópticas y Dispersivas de Redes de Difracción en Fibra Óptica mediante Distribuciones de Señal TF

El conocimiento de las propiedades dispersivas de las redes de difracción en fibra resulta tanto o más importante que el de sus propiedades de filtrado (respuesta de amplitud espectral). De hecho, en los últimos años, numerosos trabajos de investigación han centrado su atención en este punto [3], [4]. En particular, las características dispersivas de las redes de difracción pueden aprovecharse para llevar a cabo tratamientos concretos sobre formas de onda temporales, de interés en muy diversas aplicaciones. En el trabajo a concurso se hizo uso de distribuciones de señal TF [8] para investigar numéricamente las propiedades dispersivas de estructuras de

difracción en fibra. Nuestro estudio se centró en la representación simultánea TF de las respuestas al impulso temporal en las redes bajo análisis. La representación TF resulta óptima para la caracterización de los componentes desde el punto de vista de su comportamiento dispersivo, en tanto que involucra a las dos variables de interés, el tiempo y la frecuencia, de forma simultánea. Como resultado fundamental, dicho análisis nos ha permitido representar, en una sola imagen, toda la información relevante del comportamiento dispersivo, a nivel *microscópico*, del componente, revelando detalles no accesibles por ningún otro método. Además, nuestro estudio nos ha proporcionado un conocimiento intuitivo previo de las redes bajo análisis de enorme utilidad para la optimización del diseño de las mismas en sus diversas aplicaciones a lo largo del resto del trabajo. Así mismo el análisis se orientó a la búsqueda de nuevas aplicaciones para estos dispositivos, basadas, precisamente, en sus propiedades dispersivas: codificadores/decodificadores de secuencias de pulsos para sistemas ópticos de acceso múltiple por división de código o OCDMA, aplicaciones de conformación de formas temporales de pulsos ópticos o “optical pulse shaping”, etc.

II.2. *Desarrollo de Nuevas Técnicas de Síntesis de Redes de Difracción en Fibra basadas en Distribuciones de Señal TF*

La síntesis o reconstrucción de estructuras de difracción en fibra (reconstrucción del periodo de la perturbación y/o modulación del índice de refracción) a partir de medidas de sus respuestas en reflexión o transmisión constituye un problema especialmente importante de cara al diseño de este tipo de componentes para aplicaciones específicas, así como en procesos de “ingeniería inversa”. De hecho, tal problema ha centrado el interés de un nutrido grupo de investigadores [9]. Como parte de la Tesis a concurso, se ha propuesto una nueva técnica para la reconstrucción de la variación del periodo de red y la longitud de estructuras de difracción en fibra a partir de su respuesta (espectral o temporal) en reflexión. La técnica está basada en el análisis de señal TF, precisando de una representación TF de alta resolución y bajo nivel de interferencia. Dicha representación se ha conseguido obtener mediante la combinación adecuada de las distribuciones bien conocidas de Wigner-Ville y espectrograma [8]. La técnica propuesta se ha demostrado tanto numérica como experimentalmente. Los parámetros sintetizables mediante nuestra técnica (periodo de red local y longitud de perturbación) resultan de extrema importancia en los procesos de síntesis, en especial si los mismos pretenden aplicarse al sensado de esfuerzo o temperatura distribuidos a lo largo de la estructura de difracción; téngase en cuenta que distribuciones de esfuerzo o temperatura arbitrarias pueden inducir variaciones no uniformes en el periodo de red de la estructura considerada. En el trabajo de Tesis se estudió también la aplicación del análisis TF al sensado de esfuerzo distribuido a lo largo de un tramo de fibra óptica. Así, se ha demostrado que la técnica TF permite una reconstrucción muy precisa de la función de esfuerzo local, con independencia del perfil de esfuerzo aplicado y longitud sobre la que pretende extenderse la medida, lo que consecuentemente permite superar las principales limitaciones asociadas a las técnicas previamente propuestas con el mismo fin [10].

II.3. Formalización Teórica General de la Dualidad Espacio – Tiempo en Redes de Difracción en Fibra de Chirp Lineal (RDCLs).

Existe una interesante dualidad matemática entre las ecuaciones que describen la difracción paraxial de haces confinados en el espacio y la dispersión temporal de pulsos de banda estrecha en dieléctricos [11]. Como extensión de dicha dualidad, surge el concepto de lente temporal: un dispositivo capaz de impartir una modulación de fase cuadrática sobre cualquier forma de onda actúa como equivalente temporal de una lente espacial [12]. La dualidad básica y sus extensiones no resultan solamente una curiosidad físico – matemática, sino que, además y más importantemente, pueden aplicarse para la creación de análogos temporales de sistemas bien estudiados de procesamiento espacial de señal. Entre las técnicas de procesamiento temporal de pulsos ópticos basadas en dualidades espacio – tiempo merecen mención especial las técnicas de transformada de Fourier en tiempo real [13], las técnicas de imagen temporal [12], y sistemas de filtrado espectral en tiempo real [11]. Cualquiera de estas técnicas requiere la incorporación de configuraciones dispersivas apropiadas, operando como equivalentes temporales del espacio libre (es decir, proporcionando respuesta espectral de amplitud constante y fase cuadrática sobre el ancho de banda de la señal a procesar). Hasta el momento las configuraciones dispersivas incorporadas en estos sistemas han sido la fibra óptica monomodo [13] y el par de redes de difracción de volumen espacial [11]. En principio, podrían utilizarse también para tal propósito cualquiera de las configuraciones resonantes previamente ensayadas para compensación de la dispersión cromática en enlaces de fibra óptica. Sin embargo, la implementación de las condiciones duales a la difracción Fresnel requiere, de forma general, de configuraciones capaces de proporcionar fuertes dispersiones sobre anchos de banda suficientemente grandes, en las que, además, estos dos requerimientos (dispersión y ancho de banda) puedan fijarse de forma independiente. Por un lado, la longitud de fibra óptica requerida suele ser, en la mayor parte de las aplicaciones, excesivamente larga (decenas-centenas de kilómetros) como para que la implementación resulte realmente práctica. Por otro lado, en las configuraciones de dispersión basadas en estructuras resonantes o pares de redes de difracción espaciales, los requerimientos de dispersión y ancho de banda suelen ser contradictorios (es decir, un mayor coeficiente de dispersión lleva asociado un menor ancho de banda, y viceversa). Como alternativa a los esquemas dispersivos mencionados en el trabajo de Tesis se propuso la utilización de RDCLs [2] para la implementación práctica de equivalentes temporales de resultados de la difracción paraxial. Tales componentes resultan óptimos de cara a tal aplicación en tanto que en el diseño de los mismos, los requerimientos de dispersión y ancho de banda pueden fijarse de forma independiente, resultando además en estructuras extraordinariamente compactas (decenas-centenas de milímetros); aún más, como ya se ha mencionado, se trata de componentes en fibra cuya tecnología de fabricación se encuentra en un estado avanzado de madurez. Para poder diseñar este tipo de componentes de cara a su aplicación como equivalentes temporales del espacio libre, se ha precisado llevar a cabo primero una formalización matemática de la dualidad difracción espacial – dispersión temporal, para un medio dispersivo general, que se ha particularizado finalmente para el caso de RDCLs. Debe tenerse en cuenta que en todos los trabajos anteriores la mencionada dualidad se había desarrollado asumiendo para el coeficiente de dispersión del medio una dependencia lineal con la longitud del mismo (y este no es el caso de las redes de difracción).

II.4. Definición de Régimen Fraunhofer Temporal en la Propagación de Pulsos Ópticos en RDCLs: Análisis de Espectros Ópticos en Tiempo Real y Aplicaciones

Entre las aplicaciones de la dualidad espacio – tiempo resulta de especial interés práctico la realización de transformación de Fourier en tiempo real. Las propuestas previas [11], precisan todas ellas de la combinación de líneas ópticas dispersivas y mecanismos de lente temporal, lo que dificulta seriamente sus posibilidades reales de implementación. Y.C. Tong y colaboradores [13] sin embargo, han demostrado análisis de espectros ópticos en tiempo real por simple propagación del pulso original a través de un tramo suficientemente largo de fibra óptica. Aunque en el trabajo no se menciona de forma explícita, los autores realizan el equivalente temporal de la conocida difracción de Fraunhofer (o de campo lejano) [14]. La principal ventaja de esta equivalencia es que no precisa de mecanismos de modulación de fase. La transformación deseada se consigue por simple propagación de la señal a procesar a través de un medio dispersivo adecuado. Haciendo uso de la teoría general de dualidad difracción espacial – dispersión temporal, en el trabajo a concurso se estableció, por primera vez, la formulación matemática equivalente, en el dominio temporal, de la difracción espacial de Fraunhofer (o de campo lejano). Dicha formulación permitió el diseño de RDCLs para su aplicación como transformadores de Fourier en tiempo real, con todas las ventajas que ello implica. La validez de la formulación Fraunhofer ha sido contrastada tanto numérica como experimentalmente. Se ha hecho uso además de representación TF de las señales involucradas en los procesos de propagación con el objeto de conseguir un conocimiento más detallado sobre la física del régimen Fraunhofer temporal. En general, se concluyó que la transformación de Fourier en tiempo real, además de constituir una atractiva alternativa para el análisis de espectros ópticos, proporciona capacidades adicionales para controlar y modificar la forma temporal de pulsos ópticos, lo que la hace útil para otras muy diversas aplicaciones: nuevas técnicas para la conformación temporal de pulsos ópticos (“optical pulse shaping”), medida de dispersión cromática en redes de difracción en fibra, filtrado espectral en tiempo real, asistencia a la modulación externa de señales multiplexadas por división en longitud de onda (WDM) etc. Otros autores han terminado por confirmar la potencialidad de la técnica introducida en esta Tesis en otras muy diversas aplicaciones, de interés en sistemas de computación óptica y sistemas de comunicaciones por fibra [15].

II.5. Efecto Talbot Temporal en RDCLs: Teoría General y Aplicación para la Multiplicación de Frecuencias de Repetición de Trenes de Pulsos Ópticos

La dualidad espacio - tiempo es también aplicable a un caso muy peculiar de difracción espacial: el conocido efecto Talbot o de auto-imagen. El efecto Talbot espacial [16] se observa cuando, bajo condiciones apropiadas, un haz de luz coherente se transmite a través de (o refleja en) un objeto periódico (en una o dos dimensiones). La difracción de la luz en el objeto produce imágenes idénticas al mismo a distancias específicas a lo largo de la dirección de propagación del haz de luz (efecto Talbot *entero*). Además de las imágenes de reconstrucción pueden

observarse otros muchos interesantes patrones. Por ejemplo, en otras posiciones a lo largo de la dirección de propagación, el patrón periódico original reaparece pero lo hace con una periodicidad múltiplo de la original (efecto Talbot *fraccional*). La contrapartida temporal del efecto Talbot aparece cuando una señal periódica en el dominio temporal (un tren de pulsos ópticos, por ejemplo) se propaga a través de un medio dispersivo bajo la aproximación de dispersión cromática de primer-orden (reflexión en RDCL, por ejemplo). El efecto Talbot temporal *entero* fue descrito por primera vez por T. Jansson y J. Jansson [17]. El fenómeno de auto-imagen temporal ha atraído de nuevo, en los últimos años, el interés de diversos investigadores [18]. Esto se debe fundamentalmente al hecho de que el fenómeno (en particular, el equivalente temporal del efecto Talbot *fraccional*) puede aplicarse para multiplicar la frecuencia de repetición de secuencias periódicas de pulsos (como los producidos por láseres “mode-locked”) sin afectar esencialmente las características del pulso individual (su forma temporal y duración), y, básicamente, sin pérdida de energía. Debe tenerse en cuenta que la generación de trenes de pulsos cortos a muy altas velocidades de repetición resulta de tremendo interés para el desarrollo de las futuras comunicaciones ópticas de ultra-alta velocidad binaria, en computación óptica, y en otras muchas áreas científicas (ya mencionadas con anterioridad) [7]. A pesar de que la aplicación del efecto de auto-imagen temporal resulta muy importante, el efecto en si mismo no ha sido completamente explicado o detalladamente estudiado desde una perspectiva analítica. En respuesta a este “vacío” teórico, en el trabajo a concurso se llevo a cabo un análisis teórico completo y general de los fenómenos de auto-imagen temporal. Mediante este estudio se establecieron soluciones analíticas para todos los casos de interés (es decir, efectos Talbot temporal entero y fraccional). Aunque el estudio desarrollado es general e independiente del medio dispersivo concreto, haciendo uso de la teoría de dualidad espacio-tiempo en RDCLs, los resultados se particularizaron para el caso de estos componentes en fibra. En concreto, se ha demostrado y analizado con detalle el diseño de tales componentes para la implementación de la técnica Talbot de multiplicación de velocidad de repetición de trenes periódicos de pulsos ópticos. Por las razones anteriormente expuestas para el caso de transformación de Fourier en tiempo real, la RDCL se constituye como la alternativa óptima para la realización práctica de la técnica. Finalmente, también como parte del trabajo de Tesis, se propusieron y discutieron nuevas aplicaciones para los fenómenos de auto-imagen temporal en RDCLs.

II.6. Extensión de las Técnicas de Procesado Óptico basadas en Redes de Difracción para el Tratamiento Paralelo de Señales WDM

La multiplexación por división en longitud de onda o WDM se constituye como una de las técnicas más prometedoras para el aprovechamiento completo del tremendo potencial de ancho de banda de la fibra óptica. La incorporación de las técnicas conocidas de procesamiento óptico de señal en sistemas WDM, haciendo uso además de componentes todo-fibra, se considera actualmente una de las tareas claves para la evolución de los sistemas de comunicaciones por fibra hacia su siguiente generación [1]. En el trabajo de Tesis, se propusieron, diseñaron y demostraron nuevas estructuras de difracción en fibra para la implementación de técnicas mono-canal de procesamiento de señal (incluyendo aquellas basadas en dualidad espacio – tiempo) sobre varios canales espectrales (canales de comunicación WDM), de forma independiente y simultánea. Las estructuras de difracción propuestas se basan en la

superposición de varias RDCLs diferentes sobre el mismo tramo de fibra óptica. Cabe destacarse que estructuras de este tipo han sido ya fabricadas con éxito [2]. En general, los diseños propuestos resultan en componentes extraordinariamente compactos (unos pocos milímetros) capaces de procesar simultáneamente un elevado número de canales espectrales (más de 100, en algunos casos).

III.- Reseña Bibliográfica

- [1] R. Ramaswami, K. N. Sivarajan, *Optical Networks: A Practical Perspective*, Morgan Kaufmann Publishers, S. Francisco, CA, (1998).
- [2] R. Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*, Academic Press, London, (1999)
- [3] C. Martijn de Sterke, B. J. Eggleton, P. A. Krug, “High-Intensity Pulse Propagation in Uniform Gratings and Grating Superstructures”, *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 15, nº 8, pp. 1494-1502, (1997).
- [4] L. R. Chen, S. D. Benjamin, P. W. E. Smith, J. E. Sipe “Applications of Ultrashort Pulse Propagation in Bragg Gratings for Wavelength-Division Multiplexing and Code-Division Multiple Acces”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 34, pp. 2117-2129, (1998).
- [5] P. W. E. Smith, A. M. Weiner, “Ultrashort Light Pulses”, *IEEE Circuits and Devices Mag.*, vol. 4, pp. 3-7, (1988).
- [6] K. Vlachos, K. Zoiros, T. Houbavlis, H. Avramopoulos, “10 × 30 GHz Pulse Train Generation from Semiconductor Amplifier Fiber Ring Láser”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, nº 1, pp. 25-27, (2000)
- [7] A. M. Weiner, "Femtosecond Pulse Processing", *Opt. Quantum Electron.*, Special Issue on Ultrafast Optoelectronics, vol. 32, pp. 473-487, (2000).
- [8] L. Cohen, *Time-Frequency Analysis*, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, N.J. (1995)
- [9] R. Feced, M.N. Zervas. M.A. Muriel, “An Efficient Inverse Scattering Algorithm for the Design of Nonuniform Fiber Bragg Gratings”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, nº 8, pp. 1105-1115, (1999).
- [10] M.M. Ohn, S.Y. M. M. Ohn, S. Y. Huang, R. M. Measures, J. Chwang, “Arbitrary Strain Profile Measurement within Fibre Gratings using Interferometric Fourier Transform Technique”, *Electron. Lett.*, vol. 33, nº 14, pp. 1242-1243, (1997).
- [11] A. Papoulis, “Pulse Compression, Fiber Communications, and Diffraction: a Unified Approach”, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, pp. 3-13, (1994).
- [12] B. H. Kolner, “Space-Time Duality and the Theory of Temporal Imaging”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, pp.1951-1963, (1994).
- [13] Y. C. Tong, L. Y. Chan, K. Tsang, “Fibre Dispersion or Pulse Spectrum Measurement using a Sampling Oscilloscope”, *Electron. Lett.*, vol. 33, nº 11, pp. 983-985, (1997).
- [14] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, (1996).
- [15] P. C. Chou, H. A. Haus, J. F. Brennan III, “Reconfigurable time-domain spectral shaping of pules stretched by a fiber Bragg grating”, *Opt. Lett.*, vol. 25, nº 8, pp. 524-526, (2000).
- [16] M. V. Berry, S. Klein, “Integer, fractional and fractal Talbot effects”, *J. Mod. Opt.*, vol. 43, nº 10, pp. 2139-2164, (1996).
- [17] T. Jansson, J. Jansson, “Temporal self-imaging effect in single-mode fibers”, *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 71, nº 11, pp. 1373-1376, (1981).

[18] F. Mitschke, U. Morgner, “The Temporal Talbot Effect”, *Opt. Photon. News*, vol. 9, n° 6, pp. 45-47, (1998).

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DEL AUTOR

(Orden cronológico inverso)

I.- Publicaciones en Revistas Científicas Internacionales

(se muestra entre corchetes el *índice de impacto* de la revista, de acuerdo con los más recientes *ISI-Journal Citation Reports*[®])

- [1] **J. Azaña**, L. R. Chen, “Multiwavelength optical signal processing using multistage ring resonators”, aceptado para su publicación en *IEEE Photonics Technology Letters* [1,877], (Mayo 2002).
- [2] **J. Azaña**, M. A. Muriel, “Technique for simultaneously multiplying the repetition rate of multiwavelength optical pulse trains”, *IEEE Photonics Technology Letters* [1,877], Vol. 13, nº 12, pp. 1358-1360, Diciembre 2001.
- [3] **J. Azaña**, M. A. Muriel, “Simultaneous multi-wavelength real-time optical spectrum analysis”, *Applied Optics* [1,359], Vol. 40, nº 23, pp. 3831-3842, Agosto 2001.
- [4] **J. Azaña**, M. A. Muriel, “Temporal self-imaging effects: theory and application for multiplying pulse repetition rates”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* [2,233], Vol. 7, nº 4, pp. 728 – 744, Julio/Agosto 2001.
- [5] **J. Azaña**, M. A. Muriel, L. R. Chen, P.W.E. Smith, “Fiber Bragg grating period reconstruction using time-frequency signal analysis and application to distributed sensing”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology* [1,587], Vol. 19, nº 5, pp.646-654, Mayo 2001.
- [6] **J. Azaña**, M. A. Muriel, “Real-time Fourier transformations performed simultaneously over multi-wavelength signals”, *IEEE Photonics Technology Letters* [1,877], Vol. 13, nº 1, pp.55-57, Enero 2001.
- [7] **J. Azaña**, M. A. Muriel, “Reconstruction of fiber gratings period profile by employing Wigner-Ville distributions and spectrograms”, *Journal of the Optical Society of America A* [1,481], Vol. 17, nº 12, pp. 2496-2505, Diciembre 2000.
- [8] **J. Azaña**, M. A. Muriel, A. Carballar, “Real-time Fourier transformer system using transmissive fiber gratings”, *Journal of Fiber and Integrated Optics* [0,300], Vol. 19, nº 4, pp. 439-453, Septiembre 2000.
- [9] **J. Azaña**, M. A. Muriel, “Reconstructing arbitrary strain distributions within fiber gratings by time-frequency signal analysis”, *Optics Letters* [2,989], Vol. 24, nº 10, pp. 698-700. Mayo 2000.
- [10] **J. Azaña**, M. A. Muriel, “Real-time optical spectrum analysis based on the time-space duality in chirped fiber gratings”, *IEEE Journal of Quantum Electronics* [2,000], Vol. 36, nº 5, pp. 517-526, Mayo 2000.
- [11] **J. Azaña**, L. R. Chen, M. A. Muriel, Peter W. E. Smith, “Experimental demonstration of real-time Fourier transformation using linearly chirped fiber Bragg gratings”, *Electronics Letters* [0,931], Vol. 35, nº 25, pp. 2223-2224, Diciembre 1999.

- [12] **J. Azaña**, M. A. Muriel, "Technique for multiplying the repetition rate of periodic trains of pulses by means of a temporal self-imaging effect in chirped fiber gratings", *Optics Letters* [2,989], Vol. 24, n° 23, pp. 1672-1674, Diciembre 1999.
- [13] **J. Azaña**, M. A. Muriel, "Temporal Talbot effect in fiber gratings and its applications", *Applied Optics* [1,359], Vol. 38, n° 32, pp. 6700-6704, Noviembre 1999.
- [14] A. Carballar, M. A. Muriel, **J. Azaña**, "Fiber grating filter for WDM systems: an improved design", *IEEE Photonics Technology Letters* [1,877], Vol. 11, n° 6, pp. 694-696, Junio 1999.
- [15] M. A. Muriel, A. Carballar, **J. Azaña**, "Field distributions inside fiber gratings", *IEEE Journal of Quantum Electronics* [2,000], Vol. 35, n° 4, pp. 548-558, Abril 1999.
- [16] A. Carballar, M. A. Muriel, **J. Azaña**, "WDM channel selector based on transmissive chirped Moiré fibre grating", *Electronics Letters* [0,931], Vol. 35, n° 5, pp. 386-388, Marzo 1999.
- [17] M. A. Muriel, **J. Azaña**, A. Carballar, "Real-time Fourier transformer based on fiber gratings", *Optics Letters* [2,989], Vol. 24, n° 1, pp. 1-3, Enero 1999.
- [18] M. A. Muriel, **J. Azaña**, A. Carballar, "Fiber grating synthesis by use of time-frequency representations", *Optics Letters* [2,989], Vol. 23, n° 19, pp. 1526-1528, Octubre 1998.

II.- Capítulos de Libros

- [19] M. A. Muriel, **J. Azaña**, "Signal processing techniques applied to fiber gratings synthesis", *Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides 1999, OSA Trends in Optics & Photonics Series*, vol. 33, E. J. Friebele, R. Kashyap, T. Erdogan (editores), Optical Society of America, Washington, DC, 2000, pp. 91-97.
- [20] **J. Azaña**, M. A. Muriel, "Dual-channel real-time Fourier transformer based on chirped Moiré fiber grating", *Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides 1999, OSA Trends in Optics & Photonics Series*, vol. 33, E. J. Friebele, R. Kashyap, T. Erdogan (editores), Optical Society of America, Washington, DC, 2000, pp. 79-85.
- [21] A. Carballar, M. A. Muriel, **J. Azaña** "Sidelobes suppression in fiber gratings: a new design", *Applications of Photonic Technology 3: Closing the Gap between Theory, Development and Application*, G. A. Lampropoulos, R. A. Lessard (editores), *Proceedings of SPIE*, vol. 3491, pp. 124-127 (1998).

III.- Actas Procedentes de Conferencias Internacionales

- [22] **J. Azaña**, L.R. Chen, "Pulse shaping using a space-to-frequency-to-time technique", aceptado para su presentación en el 22nd *Conference on Lasers and Electro-optics (CLEO '2002)*, 19-24 Mayo, 2002, Long Beach, California, USA.
- [23] **J. Azaña**, M. A. Muriel, "Simultaneous multiplication of multi-wavelength pulse repetition rates", 26th *European Conference on Optical Communication (ECOC '2000)*, 3-7 Septiembre, 2000, Munich, Germany, Paper P1.13.

- [24] **J. Azaña**, M. A. Muriel, "Superimposed in-fiber grating structures for optical signal processing in wavelength-division-multiplexing systems", *25th Conference on Optical Fiber Communication (OFC '2000)*, 7-10 Marzo, 2000, Baltimore, Maryland, USA, Paper WM8, pp. 233-235.
- [25] M. A. Muriel, **J. Azaña**, A. Carballar, "Signal processing techniques applied to fiber gratings synthesis", *Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides (OSA - BGPP'99)*, 23-25 Septiembre, 1999, Stuart, Florida, USA, Paper SaA1-1, pp. 250-251, [PONENCIA INVITADA].
- [26] **J. Azaña**, M. A. Muriel, "Dual-channel real-time Fourier transformer based on chirped Moiré fiber grating", *Bragg Gratings, Photosensitivity and Poling in Glass Waveguides (OSA - BGPP'99)*, 23-25 Septiembre, 1999, Stuart, Florida, USA, Paper ThE1-1, pp. 48-50.
- [27] A. Carballar, M. A. Muriel, **J. Azaña**, "Channel selector for WDM systems based on transmissive chirped moiré fiber grating", *11th Annual Meeting of the IEEE Laser and Electro-Optics Society (IEEE - LEOS'98)* 1-2 Diciembre, 1998, Orlando, Florida, USA, vol. 2, Paper FE4, pp. 325-326.
- [28] A. Carballar, M. A. Muriel, **J. Azaña**, "Internal impulse response in fiber gratings", *11th Annual Meeting of the IEEE Laser and Electro-Optics Society (IEEE - LEOS'98)*, 1-2 Diciembre, 1998, Orlando, Florida, USA, vol. 1, Paper WO6, pp. 265-266.
- [29] M. A. Muriel, A. Carballar, **J. Azaña**, "Accurate and fast reflectivity estimation in fiber gratings", *11th Annual Meeting of The IEEE Laser and Electro-Optics Society (IEEE - LEOS'98)*, 1-2 Diciembre 1998, Orlando, Florida, USA., vol. 1, Paper WO5, pp. 263-264.
- [30] M. A. Muriel, **J. Azaña**, A. Carballar, "Time-frequency representation applied to fiber gratings synthesis", *24th European Conference on Optical Communication (ECOC'98)* September 20-24, 1998, Madrid, Spain, vol. 1, Paper WdA01, pp. 383-384.

IV.- Artículos de Divulgación Científica

- [31] **J. Azaña**, M. A. Muriel, "Synchronized multiplication of repetition-rates in multiwavelength optical pulse trains", *Optics in 2001* in *OSA Optics & Photonics News*, vol. 12, nº 12, pp. 47, Diciembre 2001.
[Seleccionado por la *Optical Society of America (OSA)* como uno de los 58 trabajos científicos en óptica de mayor relevancia del año 2001]
- [32] **J. Azaña**, M. A. Muriel, "Reconstruction of fiber gratings by use of time-frequency signal analysis: application to distributed sensing", *Optics in 2000* in *OSA Optics & Photonics News*, vol. 11, nº 12, pp. 41-42, Diciembre 2000.
[Seleccionado por la *OSA* como uno de los 33 trabajos científicos en óptica de mayor relevancia del año 2000]

OTROS MERITOS

(Orden cronológico inverso)

I.- Citaciones al Trabajo de Tesis por otros Investigadores

(se citan solamente referencias en revistas científicas internacionales incluidas en los *ISI-JCR*[®]; se incluyen las afiliaciones de los autores)

- [1] M. Marano⁽¹⁾, S. Longhi⁽¹⁾, P. Laporta⁽¹⁾, M. Belmonte⁽²⁾ and B. Agogliati⁽²⁾, “All-optical square-pulse generation and multiplication at 1.5 μm by use of a novel class of fiber Bragg gratings”, *Optics Letters*, Vol. 26, No 20, pp. 1615-1617, 2001.

Afiliaciones: ⁽¹⁾ *Politecnico di Milano*, Milán (Italia).

⁽²⁾ *Corning – Optical Technologies Italia S.p.A.*, Milán (Italia)

- [2] E. Mutafungwa, “Optical hop number limits imposed by various 2 x 2 cross-connect node designs”, *Optics Express*, Vol. 9, No 8, pp. 400-410, 2001.

Afiliación: *Helsinki University of Technology*, Helsinki (Finlandia)

- [3] V.P. Minkovich⁽¹⁾, A.N. Starodumov⁽¹⁾, V.I. Borisov⁽²⁾, V.I. Lebedev⁽²⁾, S.N. Perepechko⁽²⁾, “Temporal interference of coherent laser pulses in optical fibers”, *Optics Communications*, Vol. 192, pp. 231-235, 2001.

Afiliaciones: ⁽¹⁾ *Centro de Investigaciones en Óptica*, León (México).

⁽²⁾ *Mogilev State University*, Mogilev (Bielorrusia)

- [4] F. Hakimi, H. Hakimi, “Measurement of optical fiber dispersion and dispersion slope using a pair of short optical pulses and Fourier transform property of dispersive medium”, *Optical Engineering*, vol. 40, No 6, pp. 1053-1056, 2001.

Afiliación: *Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, Cambridge (USA)

- [5] J. Skaar⁽¹⁾, L.G. Wang⁽²⁾, T. Erdogan⁽²⁾, “On the synthesis of fiber Bragg gratings by layer peeling”, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 37, No 2, pp. 165-173, 2001.

Afiliaciones: ⁽¹⁾ *Norwegian University of Science and Technology (NTNU)*, Trondheim (Norway)

⁽²⁾ *Institute of Optics, University of Rochester*, Rochester (USA)

- [6] M. Bataineh, O.R. Asfar, "Application of multiple scales analysis and the fundamental matrix method to rugate filters: Initial-value and two-point boundary problem formulations" *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, No 12, pp. 2217-2223, 2000.

Afiliación: *Jarmouk University, Irbid (Jordania)*

- [7] S. Longhi⁽¹⁾, M. Marano⁽¹⁾, P. Laporta⁽¹⁾, V. Pruneri⁽²⁾, "Multiplication and reshaping of high-repetition-rate optical pulse trains using highly dispersive fiber Bragg gratings", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 12, no 11, pp. 1498-1500, 2000.

- [8] S. Longhi⁽¹⁾, M. Marano⁽¹⁾, P. Laporta⁽¹⁾, O. Svelto⁽¹⁾, M. Belmonte⁽³⁾, B. Agogliati⁽³⁾, L. Arcangeli⁽³⁾, V. Pruneri⁽²⁾, M.N. Zervas⁽²⁾, M. Ibsen⁽²⁾, "40-GHz pulse-train generation at 1.5 μ m with a chirped fiber grating as a frequency multiplier", *Optics Letters*, Vol. 25, No 19, 1481-1483, 2000.

Afiliaciones: ⁽¹⁾ *Politecnico di Milano, Milán (Italia)*

⁽²⁾ *Optoelectronics Research Centre, Southampton University, Southampton (UK)*

⁽³⁾ *Pirelli Cavi & Sistema S.p.A., Milán (Italia)*

- [9] N.K. Berger, B. Levit, S. Atkins, B. Fischer, "Time-lens-based spectral analysis of optical pulses by electrooptic phase modulation", *Electronics Letters*, Vol. 36, No 19, pp. 1644-1646, 2000.

- [10] N.K. Berger, B. Levit, A. Bekker, B. Fischer, Real-time optical spectrum analyser based on chirped fibre Bragg gratings, *Electronics Letters*, Vol. 36, No 14, pp. 1189-1191, 2000

Afiliación: *Technion – Israel Institute of Technology, Haifa (Israel)*

- [11] C. C. Yang, Y.C. Lai, "Apodised fiber Bragg gratings fabricated with a uniform phase mask using Gaussian beam laser", *Optics and Laser Technology*, Vol. 32, No 5, pp. 307-310, 2000.

- [12] C.C. Yang, Y.C. Lai, "Apodised fibre Bragg gratings fabricated with uniform phase mask using low cost apparatus", *Electronics Letters*, Vol. 36, No 7, pp. 655-657, 2000

Afiliación: *Institute of Electro-Optical Engineering (National Chiao-Tung University), y Industrial Technology Research Institute, Hsinchu, Taiwan (China).*

- [13] L. Poladian, "Simple grating synthesis algorithm", *Optics Letters*, Vol. 25, No 11, pp. 787-789, 2000.

Afiliación: *Optical Fibre Technology Centre, University of Sydney, Sidney (Australia).*

[14] P.C. Chou⁽¹⁾, H.A. Haus⁽¹⁾, J.F. Brennan III⁽²⁾, “Reconfigurable time-domain spectral shaping of an optical pulse stretched by a fiber Bragg grating”, *Optics Letters*, Vol. 25, No 8, pp. 524-526, 2000.

Afiliaciones: ⁽¹⁾ *Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge (USA).*

⁽²⁾ *3M Telecommunication Systems Division, Austin (USA)*

[15] J.D. Mills, C.W.J. Hillman, W.S. Brocklesby, B.H. Blott, “Evanescent field imaging of an optical fiber Bragg grating”, *Applied Physics Letters*, Vol. 75, No 26, pp. 4058-4060, 1999.

Afiliación: *University of Southampton, Southampton (UK).*

[16] Z.K. Chen, M.A. Karim, “Optical subband coding system”, *Optics Communications*, Vol. 169, pp. 45-49, 1999.

Afiliación: *University of Tennessee, Knoxville (USA).*

II.- Patentes

[1] “Método de diseño de redes de difracción en fibra óptica por variación del periodo de la red para su aplicación como filtro óptico”. (con M. A. Muriel y A. Carballar).

Presentada en la Oficina Española de Patentes y Marcas con fecha 25 de Febrero de 1999 (Referencia nº P9900390)

Entidad titular: Universidad Politécnica de Madrid.

[2] “Transformador de Fourier de señales ópticas en el dominio temporal, basado en redes de difracción en fibra”. (con M. A. Muriel y A. Carballar).

Presentada en la Oficina Española de Patentes y Marcas con fecha 26 de Noviembre de 1998 (Referencia nº P9802483).

Entidad titular: Universidad Politécnica de Madrid.

III.- Becas y Ayudas (incluyendo Estancias en otros Centros de Investigación)

- Beca para estancia de investigación *Postdoctoral* en el extranjero, concedida por el Ministerio de Educación y Cultura de España. *Department of Electrical and Computer Engineering, McGill University*, Montreal (Canadá). Octubre 2001– (Septiembre 2003). Supervisor: Prof. Lawrence R. Chen.
- Beca Formación de Personal Investigador (FPI) concedida por la Comunidad de Madrid. Departamento de Tecnología Fotónica, Universidad Politécnica de Madrid. Octubre 1997 – Septiembre 2001. Supervisor: Prof. Miguel A. Muriel.
- 3 Ayudas para estancias cortas (inferiores a 3 meses) en centros de investigación en el extranjero, concedidas por la Comunidad de Madrid, según la siguiente relación:
 - *Department of Applied Science* de la *University of California, Davis* (USA). Julio – Septiembre 2000. Supervisor: Prof. Brian H. Kolner.
 - *Department of Electrical and Computer Engineering* de la *University of Toronto* (Canadá). Julio – Septiembre 1999. Supervisor: Prof. Peter W.E. Smith.
 - Centro de Excelencia *Photonics Research Ontario* adscrito a la *University of Toronto* (Canadá). Junio 1998. Supervisor: Dr. Xijia Gu.
- Beca para asistencia a investigación concedida por *AT&T* Microelectrónica España. Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad Politécnica de Madrid. Enero – Diciembre 1995. Supervisor: Prof. Tomás Rodríguez.