

Capítulo 1

Introducción

A finales de los años 30 del siglo pasado la Óptica comenzó a establecer una estrecha conexión con los campos de la comunicación e información relacionadas con el estudio del procesado de señal. Mientras que en la Ingeniería Electrónica se utilizan principalmente señales eléctricas, que generalmente varían en el tiempo, en el Procesado Óptico de Información se utiliza la luz para la detección, almacenamiento, transmisión o procesado de una señal, de la que habitualmente se estudia la variación espacial, como la variación de la amplitud o la intensidad en una región limitada, lo que da lugar al procesado óptico de imágenes. El desarrollo de los láseres en los años 60 y la invención de la holografía ha permitido un gran desarrollo en este campo, en el que se relaciona la teoría de la difracción de la luz con el tratamiento de la información.

Otro factor que ha facilitado el desarrollo del Procesado Óptico de la Información ha sido la aparición de los moduladores espaciales de luz (SLM, *spatial light modulators*), que han sustituido los soportes fotográficos y holográficos clásicos, de forma que se pueden realizar montajes ópticos para el tratamiento de imágenes en tiempo real. Estos dispositivos permiten la modulación espacial de la luz en una, dos o tres dimensiones mediante un control eléctrico o óptico. Existe una gran variedad de moduladores espaciales de luz, dependiendo del material y del efecto físico en el que se basan [Efr95], de entre ellos, los más utilizados en el campo del procesado óptico de imágenes son los dispositivos de cristal líquido (LCD, *liquid crystal devices*), como por ejemplo, las pantallas que se encuentran en videoproyectores o en televisores de bolsillo. Las múltiples ventajas de estos dispositivos, como su fácil acceso, el control electrónico, la alta definición y su bajo consumo energético, ha hecho que las pantallas de cristal líquido sean uno de los elementos básicos para obtener la modulación

de frentes de onda. En el presente trabajo se estudia la utilización de estos dispositivos para representar información compleja mediante la modulación de la luz.

La naturaleza de la luz hace que para describir completamente un frente de onda sea necesario utilizar la amplitud, la fase y la polarización. Hasta la introducción de la holografía por Dennis Gabor [Gab48] la mayoría de aplicaciones estaban limitadas a utilizar solo la amplitud o intensidad de la luz. La holografía permite la captación y representación de la amplitud y la fase de un frente de onda que se hace interferir con otra onda de referencia. A principios de los años 60, con la introducción de los primeros láseres, la holografía óptica se desarrolló ampliamente, en especial con los trabajos de E. N. Leith y J. Upatnieks [LU62] [LU64], que introdujeron la holografía fuera de eje, y de Y. N. Denisyuk [Den62a] [Den62b], que inventó la holografía por reflexión. La aparición de los ordenadores y la invención de los hologramas generados por ordenador (CGH, *computer generated holograms*) por B. R. Brown, A. W. Lohmann y D. P. Paris [BL66] [LP67] dio un nuevo impulso, al permitir crear hologramas sin necesidad de realizar una captación interferométrica previa. De esta forma se simplifica la representación de la información compleja (amplitud y fase) de frentes de ondas.

La aparición de las pantallas de cristal líquido ha representado una revolución en el campo del procesado óptico ya que permiten la modulación en tiempo real de frentes de onda, y pueden ser controladas de forma sencilla mediante un ordenador. La modulación que introduce este tipo de dispositivos está generalmente limitada a solo amplitud, solo fase o modulaciones de amplitud y fase acopladas. Actualmente no existen pantallas que permitan representar el plano complejo completo, y, por tanto, poder controlar la amplitud y la fase simultáneamente. Tradicionalmente una forma de solventar este problema ha sido la utilización de técnicas de codificación, que permiten transformar una función con valores complejos en otra función que sea representable dentro del rango de modulación limitado del SLM que se utilice. Una de estas técnicas es la de utilizar el cálculo de hologramas generados por ordenador, que transforman la información compleja en valores reales positivos [Lee70] [Bur70] [Tri87]. Otras formas de codificación de información compleja para ser representadas en pantallas de cristal líquido proponen utilizar varios píxeles para representar cada valor, Serati *et al.* [SB99] utilizan las propiedades de la transformada de Fourier para representar la información compleja de un píxel utilizando cuatro píxeles de la pantalla. Birch *et al.* [BYC⁺00] utilizan dos píxeles de filas consecutivas para codificar la

información de la parte real e imaginaria. Haist *et al.* [HST97] utilizan un algoritmo iterativo para conseguir una representación de solo fase que recupera información de amplitud al realizar la transformada de Fourier. Estos métodos que emplean varios píxeles para codificar información conllevan una pérdida de resolución, que de entrada ya es limitada debido al tamaño de las pantallas actuales. Existe la posibilidad de utilizar otros métodos de codificación que utilizan elementos difractivos [NT96] [KVTN97] [DCC⁺99], pero también se ven limitados por la resolución de las pantallas.

Una alternativa a los métodos de codificación es la de utilizar más de una pantalla para obtener modulación compleja completa. De esta forma acoplando dos dispositivos y combinando sus propiedades se puede obtener una modulación completa del plano complejo. Juday y Florence [JF91] y Gregory *et al.* [GKT92] propusieron los dos sistemas ópticos comunes para acoplar dos pantallas que representan por separado la amplitud y la fase del frente de ondas, una arquitectura para combinar ambas partes como suma y otra como producto. Otros autores han utilizado variaciones de este sistema para representar frentes de ondas [AMS93] [NRS96]. En este trabajo estudiamos distintos aspectos de esta opción que combina dos pantallas para obtener modulación compleja completa.

En nuestro caso la aplicación de este sistema será la representación de hologramas de Fresnel, con los que se puede representar la reconstrucción de un objeto a una distancia deseada mediante la propagación de la luz. Pero la modulación de información compleja puede encontrar utilidad en otras aplicaciones, entre las que se encuentran:

- Elementos Ópticos Difractivos (DOE, *diffractive optical element*). Son elementos ópticos que utilizan las propiedades de la difracción, lo que les permite controlar la distribución de la luz de diferentes formas, que serían difícil o imposible conseguir utilizando elementos ópticos clásicos, basados en la refracción y reflexión. Los elementos difractivos suelen tener menor peso y volumen que sus equivalentes clásicos [Goo96]. La aparición de las pantallas de cristal líquido a permitido además la generación de elementos difractivos programables, de forma que sus propiedades se pueden reconfigurar en tiempo real, lo que permite su uso en diversas aplicaciones como en óptica difractiva activa, procesado óptico u óptica adaptativa [LMP94] [KGBH97] [Lau98] [MIE⁺01] [SBA01].
- Correlación óptica. Una de las aplicaciones del procesado óptico es el reconoci-

miento de objetos. Para ello se utilizan los montajes ópticos denominados correladores. Existen dos arquitecturas básicas para estos sistemas, la del correlador de VanderLugt o $4f$ [Van64] y la del correlador de transformadas conjuntas [Rau66] [WG66]. Ambos montajes utilizan las propiedades de la transformada de Fourier óptica para realizar la detección de los objetos mediante la correlación. El montaje de Vanderlugt se basa en la realización de forma simultánea de dos transformadas ópticas y la utilización de un filtro con información compleja del objeto a detectar. La aparición de las pantallas de cristal líquido ha permitido el desarrollo de la detección en tiempo real y ha generado el desarrollo de diversas técnicas para generar filtros complejos que optimizan distintos parámetros en el plano de detección y su adaptación a las pantallas [KH90] [Réf91] [Jud93] [MUCJ95] [LCMB⁺00] [PLVC03].

- **Criptografía.** Otra posibilidad del procesado óptico es la encriptación de información. Mediante la utilización de montajes ópticos con pantallas de cristal líquido y empleando las propiedades de la transformada óptica de Fourier se puede proteger la información contenida en imágenes, que después solo puede ser recuperada de nuevo si se utiliza la llave de codificación adecuada [JH94] [RJ95] [TJL99]. La introducción de la holografía digital en el proceso de encriptación permite además que la información codificada sea tridimensional [YY98] [JN00] [TJ00] [MJ02].
- **Pinzas ópticas (*Optical tweezers*).** El atrapado óptico (*optical trapping*) es una técnica de importancia creciente que permite controlar y manipular materia de escalas nanométricas a milimétricas. Una pinza óptica usa las fuerzas ejercidas por los gradientes de intensidad de un haz de luz para atrapar y mover partículas de volumen microscópico [ADBC86]. La utilización de pantallas de cristal líquido y la aplicación de técnicas de holografía generada por ordenador permiten el control en tiempo real y la utilización de trampas múltiples y a distintas profundidades para la manipulación de las partículas [RHWT99] [LRHT00] [CKG02] [XCC04] [MSM⁺03] [XCC04].

En todas estas aplicaciones es necesario poder controlar la amplitud y la fase de los frentes de onda, para ello se utilizan moduladores espaciales de luz, como las pantallas de cristal líquido. Por tanto, el poder representar de forma precisa la información compleja completa de los frentes de onda en este tipo de dispositivos puede resultar

especialmente útil en cualquiera de los casos citados anteriormente.

A parte de la representación de información compleja, otro aspecto a contemplar relacionado con la holografía es la captación de frentes de ondas, que normalmente se realiza a través de la interferencia del frente de onda a captar y un haz de referencia. Tradicionalmente se utilizaba película fotográfica como soporte para realizar el registro, que, tras el proceso de revelado necesario, permite recuperar la información almacenada al iluminarse de nuevo con un haz similar al de referencia. El desarrollo de las cámaras digitales y el aumento de resolución de las CCDs (*charged coupled devices*), que cuentan con el tamaño y número de píxeles necesarios para captar las interferencias, ha permitido sustituir los soportes fotográficos clásicos por dispositivos digitales, en los que la captación se realiza directamente con una CCD y la reconstrucción posterior se realiza mediante métodos numéricos [SJ94]. Esto ha hecho que la holografía digital se desarrolle ampliamente y sea de utilidad en diversas aplicaciones [SJ02], entre ellas en el análisis de deformaciones y medidas de formas [PST99] [HJJ04] [MWLJ04], microscopía holográfica [TO00] [DMM⁺02], localización y seguimiento de partículas [LBCM03] [PM03], o en la medida de parámetros de polarización [CCM⁺04].

1.1. Objetivos y estructura del trabajo

Esta tesis se enmarca dentro de las líneas de investigación en el campo del procesamiento óptico de imágenes y la holografía digital del Grupo de Investigación en Óptica Física del Departamento de Física Aplicada y Óptica de la Universidad de Barcelona. El principal objetivo del trabajo es el estudio de diferentes posibilidades de obtener modulación completa de información compleja mediante la combinación de dos pantallas de cristal líquido, teniendo en cuenta las limitaciones de estos dispositivos. Para ello se utilizan dos tipos de dispositivos, unas pantallas que actúan por transmisión y otras que actúan por reflexión. Con estas pantallas se diseñan distintos sistemas para combinar una modulación de amplitud y una de fase, dos de fase o una modulación en parte real y otra en parte imaginaria. En particular se estudia el caso de la representación de hologramas de Fresnel. Estos hologramas se generan por ordenador y se representan en las pantallas de cristal líquido de forma que al propagarse la luz se obtiene la reconstrucción del objeto codificado a una distancia predeterminada.

El trabajo está dividido en 8 capítulos, de los que el primero de ellos es esta introduc-

ción. En el capítulo 2 se presenta la aproximación de Fresnel de la teoría escalar de la difracción y los conceptos básicos de la holografía. También se describe el método de cálculo de la transformada de Fresnel que utilizaremos a lo largo del presente trabajo y finalmente se analiza el comportamiento de la información compleja al propagarla mediante la fórmula de Fresnel, lo que resulta útil a la hora de saber si es posible utilizar solo parte de la información a la hora de calcular un holograma para reconstruir el objeto que se desea codificar.

En el capítulo 3 se muestra la representación de hologramas de Fresnel en soporte fotográfico. Para ello se utiliza el método de codificación diseñado por Lee [Lee70]. Se explica en que consiste este método de codificación y como se adapta a la representación de hologramas de Fresnel. A continuación se presentan las reconstrucciones simuladas y experimentales obtenidas utilizando este sistema y se analizan las características de estas reconstrucciones al utilizar distintos montajes experimentales.

En el siguiente capítulo se introducen los dos tipos de pantallas de cristal líquido que se utilizan en este trabajo. Primero se presenta el modelo teórico para describir las propiedades de modulación de los dispositivos de transmisión de los que se dispone. Después se analiza el funcionamiento de estas pantallas y se presentan las distintas configuraciones de trabajo dependientes de la polarización de la luz y del voltaje aplicado. Finalmente se presenta el modelo teórico de las pantallas de reflexión y las diferentes configuraciones que se obtienen dependiendo de la polarización de la luz que se utilice para iluminarlas.

En el capítulo 5 se desarrolla un primer sistema para obtener la modulación compleja completa que permite representar los hologramas de Fresnel que reconstruyen un objeto. En este caso utilizamos dos pantallas de transmisión acopladas de forma que se obtiene la multiplicación de la información representada en ambas. Se analizan dos métodos para representar los valores de la distribución compleja ajustándolos a las configuraciones de las pantallas. El primer método utiliza la amplitud y la fase por separado para ajustarlas a las dos pantallas y el segundo método ajusta directamente la función compleja a una combinación obtenida de la multiplicación de las configuraciones de las dos pantallas. Ambos métodos son comparados entre ellos y con los casos de solo considerar una pantalla para realizar las reconstrucciones y se presentan resultados simulados de los distintos casos. También se muestra la posibilidad de codificar varios objetos en un mismo holograma para reconstruirlos a diferentes

distancias. Finalmente se presentan el montaje experimental y las reconstrucciones experimentales obtenidos con él. Los resultados de este capítulo han sido publicados en [TLMB⁺02].

En el capítulo 6 se presenta otra alternativa para representar la información compleja. En este caso se utiliza la suma de dos pantallas de reflexión, que presentan las configuraciones adecuadas para realizar el ajuste por separado de las partes real e imaginaria del holograma a representar, que posteriormente son sumadas. Utilizando este método se realizan distintas simulaciones y se comparan con las reconstrucciones que se obtienen utilizando solo la parte real o la imaginaria. A continuación se describe el montaje experimental realizado con estas pantallas y se muestran los resultados experimentales que se obtienen. Finalmente se analizan algunos de los posibles factores de error debidos al montaje experimental. Los resultados de este capítulo se hallan resumidos en [TMBL⁺03b].

En el capítulo 7 se estudia el método que obtiene la modulación compleja completa mediante la suma de dos pantallas, generalizado para el caso en el que las pantallas no presentan configuraciones de solo parte real o solo parte imaginaria. Una primera opción pasa por representar los valores complejos como la suma de dos fases. La limitación en la modulación de las pantallas que se utilizan, en este caso las de transmisión, hace que las reconstrucciones obtenidas con la suma del ajuste de las fases calculadas no den resultados óptimos. Una alternativa es la de realizar el ajuste de la función compleja a la curva que se obtiene de la suma de las configuraciones de las dos pantallas. Tras comparar estas dos opciones, se presentan resultados simulados y se evalúa el método que combina las configuraciones de las dos pantallas. Finalmente se describe el montaje experimental para obtener la suma de la información representada en las pantallas de transmisión y se muestran las imágenes de las reconstrucciones experimentales que se obtienen al utilizar el método que combina las configuraciones de los dos dispositivos. Este capítulo se basa en los resultados presentados en [TMBL⁺03a] y [TMBL⁺04].

Para acabar se presentan las conclusiones del trabajo y se comentan las posibles líneas de investigación a desarrollar en un futuro. Para completar el estudio, en la parte final de este trabajo se presenta un apéndice donde se muestra un ejemplo de captación de información compleja, mediante técnicas de holografía digital.

