

Capítulo 8

Conclusiones

En este trabajo se han evaluado diferentes posibilidades para obtener la modulación completa del plano complejo mediante el uso de pantallas de cristal líquido, teniendo en cuenta las limitaciones que presentan estos dispositivos. Como aplicación de esta modulación compleja se ha realizado 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. Se han utilizado dos tipos de dispositivos, unas pantallas de cristal líquido nemático que actúan por transmisión y unas pantallas ferroeléctricas que actúan por reflexión. Con estos dispositivos se estudian los montajes que permiten acoplar dos pantallas para obtener la modulación compleja completa.

De este estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Hologramas de Fresnel

- Se ha introducido la aproximación de Fresnel para tratar la difracción de la luz. Se ha estudiado un método de cálculo para obtener esta aproximación y su aplicación al cálculo de hologramas. Estos hologramas de Fresnel se obtienen retropropagando a una distancia deseada el objeto a codificar, utilizando la transformada de Fresnel. La reconstrucción del objeto se obtiene propagando el holograma hasta la distancia que se ha calculado previamente.
- Se ha estudiado como afecta a las reconstrucciones del objeto el solo usar parte de la información compleja del holograma. Para ello se han realizado recons-

trucciones a distintas distancias usando solo la amplitud, la fase, la parte real o la parte imaginaria.

- Al utilizar solo la amplitud el error en la imagen reconstruida aumenta rápidamente según aumenta la distancia de propagación para estabilizarse a distancias mayores, dando unas reconstrucciones que solo presentan la información de bajas frecuencias.
- En el caso de usar solo la fase el error es mayor y prácticamente constante para todas las distancias, ya que las reconstrucciones presentan solo la información de alta frecuencia.
- En los casos de utilizar solo la parte real o la parte imaginaria se tienen resultados complementarios, el error en las reconstrucciones oscila con un periodo $\lambda/2$, dependiendo si a la distancia de propagación se tiene una interferencia constructiva o destructiva. En el caso de propagar a una distancia donde se tiene la interferencia constructiva para la parte real, el error es bajo y la reconstrucción que se obtiene es aceptable, en cambio para la parte imaginaria se tiene una interferencia destructiva que da un error alto y una reconstrucción muy ruidosa.
- Para obtener reconstrucciones perfectas a cualquier distancia de propagación es necesario utilizar la función compleja completa.

Hologramas en soporte fotográfico

- Se ha estudiado la representación de hologramas de Fresnel en un soporte fotográfico. Para ello se ha analizado el método de codificación de Lee, que utiliza cuatro píxeles para representar un valor complejo, aprovechando las propiedades de la transformada de Fourier. Este método se ha adaptado al caso de la representación de hologramas de Fresnel, con los que es posible obtener la reconstrucción de un objeto en planos diferentes al plano de Fourier. Se han analizado dos montajes ópticos que permiten obtener la reconstrucción de un holograma de Lee, un sistema $2f$ y un sistema convergente, y se ha visto que los cambios de escala introducidos por las lentes hacen variar las distancias a las que se obtienen las reconstrucciones. Los resultados experimentales que se obtienen coinciden con las simulaciones, aunque los hologramas que se recuperan presentan solo los detalles de los objetos, debido a la umbralización que se realiza durante la codificación de Lee, ya que la distribución de frecuencias de la transformada de Fourier está muy localizada en las bajas frecuencias.

Pantallas de cristal líquido

- Los dispositivos que se emplean para representar la información compleja de los hologramas son las pantallas de cristal líquido, que actúan como moduladores de la luz. Se ha introducido el funcionamiento de estos dispositivos utilizando la notación de las matrices de Jones, para tener una descripción teórica de su comportamiento en términos de la polarización.
- Los primeros moduladores son unas pantallas VGA de cristal líquido nemático, extraídas de un videoprojector Epson EMP-3000, que actúan por transmisión. Se ha mostrado el modelo teórico de estas pantallas en función de la polarización de la luz y el voltaje aplicado y se presentan las configuraciones de trabajo que son accesibles. La primera de estas configuraciones es una curva de alto contraste (HC) con la que se obtiene un contraste máximo de 125:1 y presenta una modulación en fase limitada a $0,75\pi$. La siguiente configuración es la curva de casi fase (PM), con la que se obtiene una modulación en fase de $1,60\pi$ con un contraste máximo de 5.4:1. Por último, utilizando luz polarizada elíptica se obtiene una curva de casi fase $0 - \pi$ (SP), que apenas introduce modulación en la amplitud, dando un máximo de contraste de solo 1.1:1, aunque el desfase máximo está limitado a $0,98\pi$.
- Los segundos dispositivos de los que se dispone son unas pantallas ferroeléctricas BNS que actúan por reflexión. Estas pantallas se pueden modelizar como un retardador de onda $\lambda/2$ cuyo eje rápido puede variar de orientación dependiendo del voltaje aplicado. Utilizando luz polarizada adecuadamente se obtienen dos configuraciones que permiten la modulación de la luz solo en el eje real (RE) o solo en el eje imaginario (IM).

Pantallas de transmisión acopladas en cascada

- La primera opción para acoplar dos pantallas de transmisión ha sido utilizar un montaje en cascada para obtener el producto de la información que se muestra en cada pantalla. De esta forma la información se puede separar en dos partes que multiplicadas permiten recuperar la función compleja. Se han estudiado dos métodos para utilizar este sistema.
- Un primer método consiste en utilizar la amplitud y la fase de la información compleja por separado. Así la primera pantalla se usa para mostrar la fase y la segunda para mostrar la amplitud. Al ajustar la amplitud a la configuración de

alto contraste hay que tener en cuenta que esta curva también modula la fase. Así, esta fase que introduce la segunda pantalla se compensa restándola a la fase que se quiere mostrar antes de realizar el ajuste a una de las configuraciones de la primera pantalla.

- Otra alternativa es realizar el ajuste de la función compleja directamente a una configuración densa que se obtiene de la multiplicación de las dos configuraciones de las pantallas que se van a usar. Entonces cada valor de la función compleja se ajusta por mínima distancia a uno de los puntos accesibles de esta curva densa y en cada pantalla se muestran los niveles de gris accesibles que multiplicados dan el valor al que se ha ajustado la función.
- Se ha realizado la reconstrucción de hologramas de Fresnel simulando el ajuste a una de las pantallas de transmisión y utilizando los dos métodos que emplean la multiplicación de dos pantallas. Debido a las limitaciones de modulación que presentan las configuraciones de las pantallas, las reconstrucciones que se obtienen utilizando solo un dispositivo no son de gran calidad. En cambio, al utilizar los métodos que combinan dos pantallas las reconstrucciones que se obtienen son más cercanas al objeto original. Aún así, estas reconstrucciones no son del todo perfectas, ya que no se cuenta con una configuración que permita una modulación de 2π en la fase, lo que permitiría cubrir todo el plano complejo. También se ha mostrado la posibilidad de codificar diferentes objetos en un solo holograma, de forma que sus reconstrucciones se obtienen a distintas distancias de propagación.
- Se ha analizado el error de las reconstrucciones a diferentes distancias utilizando los diferentes métodos con las configuraciones accesibles de las pantallas de transmisión. Utilizando solo una pantalla para representar el holograma ajustado a una de las configuraciones (HC, PM o SP) los errores de las reconstrucciones oscilan entre una zona de máximo error y una de mínimo error, de forma similar para las tres curvas, con las que se obtienen reconstrucciones muy ruidosas. En el caso de utilizar dos pantallas multiplicadas se obtienen mejores resultados. El error de las reconstrucciones también presenta oscilaciones dependiendo de la distancia de propagación, aunque la amplitud de estas oscilaciones es mucho menor que en el caso de utilizar solo una pantalla. La zona de error máximo usando dos pantallas es solo superior a la zona de mínimo error al utilizar una pantalla en el caso de utilizar las configuraciones HC y SP con el

método que ajusta la amplitud y la fase por separado. En el caso de utilizar el método de ajuste a la curva combinada, ya sea multiplicando las configuraciones HC y PM o HC y SP, y en el caso de realizar el ajuste de la amplitud y la fase por separado a las configuraciones HC y PM, el error para todas las distancias es siempre menor que al utilizar una sola pantalla.

- Las diferencias al usar las distintas configuraciones se han comprobado utilizando una distribución test del plano complejo unidad, que se ajusta utilizando las diferentes curvas de las pantallas de transmisión, utilizando una sola pantalla o los métodos de ajuste a dos pantallas multiplicadas. Con lo que se verifica que se obtienen mejores resultados al utilizar dos pantallas acopladas. La principal diferencia entre el método que ajusta la amplitud y la fase del holograma por separado y el método que realiza el ajuste de la función compleja a la curva que se obtiene al multiplicar dos configuraciones radica en el tiempo de cálculo, que es mucho menor en el primer caso.
- Se ha realizado un montaje experimental para conseguir la multiplicación de dos pantallas de transmisión VGA. Este montaje utiliza una sola lente para formar la imagen de la primera pantalla sobre la segunda pantalla, obteniendo así la superposición de la información mostrada en ambas. Mediante una iluminación convergente adecuada se eliminan los términos de fase que introduce esta lente, de forma que la información que se muestra sea solo la del holograma. Para probar este montaje se han representado unos hologramas con el método que realiza el ajuste por separado de la amplitud y la fase, en este caso utilizando las configuraciones de alto contraste HC y de casi fase $0 - \pi$ SP, respectivamente. Las reconstrucciones experimentales que se obtienen coinciden con los resultados simulados, aunque se aprecia una pérdida de calidad debida a las dificultades experimentales.

Pantallas de reflexión acopladas en configuración de Michelson

- La siguiente opción que se ha estudiado para acoplar dos pantallas es la de realizar la suma de la información que se muestra en cada una de ellas. Entonces la información compleja se separa en sus partes real e imaginaria y para representar cada una de estas partes se utilizan las pantallas ferroeléctricas por reflexión, ya que cuentan con las configuraciones idóneas para ello. La suma de la información representada en estas pantallas se obtiene entonces utilizan-

do un divisor de haz polarizante, de forma que la arquitectura del sistema es similar a la de un interferómetro de Michelson.

- Con este sistema se han realizado simulaciones de la reconstrucción de hologramas a distintas distancias, utilizando la modulación compleja completa mediante la suma de la parte real y la parte imaginaria, y se comparan con las reconstrucciones que se obtienen solo usando una de las dos partes. Las distancias que se utilizan para la propagación corresponden a posiciones donde el error de la reconstrucción que se tiene utilizando la parte real o la parte imaginaria es mínimo (y por tanto, el error es máximo para la parte complementaria). Cuando la parte utilizada corresponde a un mínimo del error la reconstrucción que se obtiene es aceptable aunque algo ruidosa, en cambio si el error es máximo la reconstrucción es mucho más ruidosa con lo que se pierde calidad. En el caso de utilizar toda la información compleja, mediante la suma de las dos partes ajustadas a las configuraciones de solo parte real (RE) y solo parte imaginaria (IM) de las pantallas de reflexión, tenemos que las reconstrucciones son prácticamente perfectas y solo presentan un pequeño ruido debido a la discretización de los valores. Al realizar la reconstrucción de objetos a distintas distancias usando un solo holograma es necesario utilizar la modulación compleja.
- Estos resultados se han evaluado calculando el error de las reconstrucciones a distintas distancias utilizando el ajuste a las configuraciones RE y IM de las pantallas de reflexión. En el caso de utilizar solo la parte real o la parte imaginaria se ve como el error oscila dependiendo de la distancia de propagación, tal como se ha visto anteriormente. En cambio, al utilizar la modulación compleja completa mediante la suma de las dos partes ajustadas, el error es prácticamente constante y muy cercano a cero. Esto es debido a que utilizando las configuraciones con las que cuentan las pantallas de reflexión es posible cubrir totalmente el plano complejo, como se ha comprobado al realizar el ajuste de la distribución test del plano complejo unidad.
- Se ha realizado el montaje experimental con dos pantallas ferroeléctricas de reflexión de BNS, dispuestas según una arquitectura equivalente a un interferómetro de Michelson, con un divisor de haz polarizante que es el encargado de realizar la suma de los frentes de onda que se muestran en cada una de las pantallas, en una la parte real y en la otra la parte imaginaria de la función compleja que forma el holograma. Con este montaje se muestran los hologramas que realizan la reconstrucción de los objetos a las mismas distancias que en

las simulaciones, obteniendo resultados muy similares en ambos casos. Se han analizado posibles fuentes de errores introducidos por el montaje experimental, como la diferencia en la distancia de propagación para las dos partes o el efecto del pixelado de las pantallas, que se han tenido en cuenta a la hora de realizar el montaje experimental.

Pantallas de transmisión acopladas en configuración de Mach-Zehnder

- La última posibilidad que se ha estudiado es la de obtener modulación compleja completa mediante la suma de la información mostrada en dos pantallas, con configuraciones diferentes a la solo real o solo imaginaria. En particular se realiza la suma de la información mostrada en las pantallas de transmisión VGA. Primero se ha analizado el caso de representar un número complejo como la suma de dos fases y se ha visto que este método no da buenos resultados debido a las limitaciones en la modulación que presentan las configuraciones de las pantallas de transmisión, ya que sería necesario contar con una modulación solo de fase ideal.
- Una alternativa es realizar el ajuste de la función compleja a una distribución densa, que se obtiene sumando las dos configuraciones de las pantallas que se utilizan, de forma similar a como se hace en el caso de multiplicar pantallas. De esta forma combinando las tres configuraciones de las pantallas de transmisión (de alto contraste HC, de casi fase PM y de casi fase $0 - \pi$ SP) se obtienen seis configuraciones combinadas diferentes: PM+SP, PM+PM, SP+HC, PM+HC, HC+HC y SP+SP. Se ha evaluado el ajuste de la distribución test del plano complejo unidad a estas seis configuraciones y a las nueve combinaciones posibles para ajustar cada una de las dos fases, en las que se puede descomponer la función compleja, a una de las curvas de las pantallas (HC, PM o SP). La suma de los ajustes de las fases a una sola pantalla no da buenos resultados, ya que las configuraciones introducen valores de amplitud y fase que no se corresponden exactamente a los valores que se han ajustado. Usando el ajuste a las curvas combinadas se obtienen mejores resultados, de forma que cuanto mayor es el área de plano complejo cubierta por la suma de las dos configuraciones menor es el error de la función compleja ajustada.
- Se han realizado reconstrucciones simuladas utilizando el método de ajuste a la curva combinada, de forma que las reconstrucciones con menor error se obtienen utilizando las curvas PM+SP y PM+PM, que son las que mayor área del

plano complejo cubren, ya que las curvas que se suman presentan mayor combinación de modulación tanto en fase como en amplitud. En cambio, los peores resultados se obtienen con las combinaciones SP+SP y HC+HC, que son las que menos área del plano complejo cubren. Este comportamiento se ha comprobado al calcular los errores de las reconstrucciones para diferentes distancias.

- Los errores de las reconstrucciones oscilan con la distancia, de forma similar a las oscilaciones que se producen en el caso de utilizar dos pantallas multiplicadas. El periodo de estas oscilaciones corresponde a la longitud de onda λ , y esta relacionado con el factor de fase global de la transformada de Fresnel, $\exp(ikd)$. Esta fase hace rotar la distribución compleja que se ha de representar alrededor de los ejes del plano, de forma que cuando esta coincide con una zona cubierta por las configuraciones se tiene un mínimo en el error, pero si la distribución cae en una zona que no esta cubierta, el error es mayor.
- Para llevar a cabo las reconstrucciones experimentales se ha realizado un montaje con las pantallas de transmisión VGA y dos divisores de haz, de forma que la suma de los frentes de onda de la información mostrada en las dos pantallas se obtiene mediante una arquitectura similar a la de un interferómetro de Mach-Zehnder. Las configuraciones de las pantallas que se utilizan son la de alto contraste HC y la de casi fase PM, de forma que el holograma a representar se ajusta a la combinación PM+HC. Los resultados que se obtienen coinciden con las simulaciones llevadas a cabo, aunque hay una pérdida de calidad debido a dificultades experimentales, como la no uniformidad en la iluminación o el ruido introducido por los elementos polarizantes. Otros factores de error que se han analizado y tenido en cuenta son el desplazamiento relativo de las pantallas en las direcciones vertical y horizontal o las limitaciones en el hardware de control de las pantallas.

Conclusión final y continuidad del trabajo

Como conclusión final del trabajo podemos decir que se ha realizado un estudio a fondo de las diferentes posibilidades de obtener modulación completa del plano complejo mediante la combinación de dos pantallas de cristal líquido. Estas técnicas se han aplicado experimentalmente con dos tipos de dispositivos. Unas pantallas de cristal líquido nemático de transmisión y unas pantallas ferroeléctricas de reflexión. Para obtener resultados óptimos es necesario contar con configuraciones que permitan una modulación ideal, ya sea para combinar una modulación de amplitud y una

de fase, dos de fase o una modulación en parte real y otra en parte imaginaria. Las pantallas de reflexión presentan unas configuraciones idóneas para realizar la modulación de la parte real y de la parte imaginaria, con lo que se obtiene unos resultados óptimos a la hora de representar información compleja mediante la suma de ambos dispositivos. En el caso de las pantallas de transmisión, las configuraciones de las que se dispone son menos ideales a la hora de modular la amplitud o la fase, pero aún así se ha demostrado que se pueden obtener buenos resultados de modulación compleja combinando dos dispositivos. El hecho de utilizar dos dispositivos permite no utilizar ningún método de codificación de la información compleja, de forma que se puede utilizar la resolución completa de las pantallas.

El objetivo futuro de este trabajo pasa por utilizar los métodos de modulación completa del plano complejo en diversas aplicaciones donde la representación de este tipo de información puede resultar de gran utilidad, como en la correlación óptica, utilizando filtros totalmente complejos, o en la realización de trampas ópticas holográficas, que permitirían el atrapado múltiple y a distintas profundidades de partículas. En cuanto a la representación de hologramas, el siguiente paso es estudiar la posibilidad de la codificación de objetos tridimensionales en un solo holograma, teniendo en cuenta factores como las posibles ocultaciones y diferentes formas del objeto. Temas que ya se han comenzado a desarrollar dentro del grupo de investigación en Óptica Física de la Universidad de Barcelona.

