

Capítulo 3

Hologramas en soporte fotográfico

En este capítulo en primer lugar utilizamos la holografía en soporte fotográfico para representar la información compleja de los hologramas, con lo que es necesario emplear un método de codificación para mostrar la distribución compleja. El método escogido se adapta a la representación de hologramas de Fresnel, con lo que se han de tener en cuenta las características del montaje experimental a la hora de obtener las reconstrucciones de los objetos representados en los hologramas.

3.1. Codificación de información compleja con el método de Lee

A la hora de representar la información compleja de un holograma generado por ordenador en un soporte no preparado para la modulación compleja, como sucede con la mayoría de dispositivos de los que habitualmente se dispone, es necesario la codificación de la distribución compleja en una función que se pueda mostrar en uno de estos soportes, en los que normalmente solo es posible representar valores reales positivos. En este caso utilizaremos película fotográfica para representar los hologramas de Fresnel que calculamos en el ordenador, como ejemplo de soporte clásico utilizado para representar hologramas. De entre las distintas posibilidades existentes para obtener la codificación de un holograma generado por ordenador (CGH, *computer generated hologram*) que existen en la literatura, [BL66] [Bur70] [Tri87] [Les92] [Luc93] [HST97] [JPOPBV97] [MSL⁺97] [PSWB97] [MT00] [YD02], hemos escogido el método diseñado por W. H. Lee [Lee70] para codificar la información compleja de nuestro holograma de Fresnel.

Este método se basa en la utilización de la suma de funciones de valores reales positivos para codificar la información, que mediante las propiedades de la transformada de Fourier recuperan la distribución compleja que se desea mostrar. Si consideramos una función compleja $F(u, v)$, la podemos descomponer en:

$$F(u, v) = F_1(u, v) - F_3(u, v) + iF_2(u, v) - iF_4(u, v) \quad (3.1)$$

Donde estas cuatro funciones se escogen de forma que sean reales y positivas. Una posibilidad es realizar las proyecciones de $F(u, v)$ sobre los ejes real e imaginario y considerar solo las funciones con las partes con valores positivos, así:

$$\begin{aligned} F_1(u, v) &= \begin{cases} \operatorname{Re}[F(u, v)] & \text{si } \operatorname{Re}[F(u, v)] > 0 \\ 0 & \text{si } \operatorname{Re}[F(u, v)] \leq 0 \end{cases} \\ F_3(u, v) &= F_1(u, v) - \operatorname{Re}[F(u, v)] \\ F_2(u, v) &= \begin{cases} \operatorname{Im}[F(u, v)] & \text{si } \operatorname{Im}[F(u, v)] > 0 \\ 0 & \text{si } \operatorname{Im}[F(u, v)] \leq 0 \end{cases} \\ F_4(u, v) &= F_2(u, v) - \operatorname{Im}[F(u, v)] \end{aligned} \quad (3.2)$$

De esta forma las funciones $F_i(u, v)$ no tienen valores negativos que impidan su representación en soporte fotográfico. A continuación es necesario añadir las fases a las cuatro componentes de forma que la suma recupere la función $F(u, v)$, para ello utilizaremos la discretización de la función y las propiedades de la transformada de Fourier. Consideramos la función $G(u, v)$, real y positiva, discretizada, con un tamaño de píxel Δp :

$$G_d(u, v) = G(u, v) \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \delta(u - n\Delta p + b, v - m\Delta p) \quad (3.3)$$

Donde $\delta(u, v)$ es la función delta de Dirac bidimensional y b es un factor de desfase. Si realizamos la transformada de Fourier de esta función tenemos:

$$g_d(x, y) = g(x, y) * \frac{1}{\Delta p^2} \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \delta\left(x - \frac{n}{\Delta p} + b, y - \frac{m}{\Delta p}\right) \quad (3.4)$$

El sumatorio de las deltas de Dirac que se convolucionan con la función $g(x, y)$ se puede expresar como un sumatorio de fases [Van92]:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nd_0) = \frac{1}{d_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(i2\pi \frac{nx}{d_0}) \quad (3.5)$$

De esta forma la función $g_d(x, y)$ se puede escribir como:

$$\begin{aligned} g_d(x, y) &= g(x, y) * \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \exp(i2\pi((x+b)n\Delta p + ym\Delta p)) = \\ &= g(x, y) * \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \exp(i2\pi bn\Delta p) \exp(i2\pi\Delta p(xn + ym)) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Y utilizando de nuevo la relación de la ecuación 3.5:

$$\begin{aligned} g_d(x, y) &= g(x, y) * \frac{1}{\Delta p^2} \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \exp(i2\pi bn\Delta p) \delta\left(x - \frac{n}{\Delta p}, y - \frac{m}{\Delta p}\right) = \\ &= \frac{1}{\Delta p^2} \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \exp(i2\pi bn\Delta p) g\left(x - \frac{n}{\Delta p}, y - \frac{m}{\Delta p}\right) = \\ &= \frac{1}{\Delta p^2} \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} t_n\left(x - \frac{n}{\Delta p}, y - \frac{m}{\Delta p}\right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Con lo que tenemos que esta serie presenta en cada término la función $g(x, y)$ desplazada y multiplicada por una fase constante. De cada factor $t_n(x, y)$ de la serie se puede recuperar la función $G(u, v)$, multiplicada por una fase que depende del valor de b , de forma que escogiendo este valor adecuadamente se puede obtener la fase que hace que con la suma de las funciones $F_i(u, v)$ se recupere la función $F(u, v)$. Si consideramos el término $n = 1$ de la serie, para distintos valores de b tenemos:

$$\begin{aligned} b = 0 &\implies t_1(x, y) = g(x, y) \\ b = \frac{1}{4\Delta p} &\implies t_1(x, y) = ig(x, y) \\ b = \frac{1}{2\Delta p} &\implies t_1(x, y) = -g(x, y) \\ b = \frac{3}{4\Delta p} &\implies t_1(x, y) = -ig(x, y) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Así podemos transformar un desplazamiento en el espacio de Fourier en una fase en el espacio real. El holograma que reconstruye la información compleja se calcula entonces utilizando la transformada de Fourier sobre la distribución compleja, el resultado de esta transformación se separa en las 4 funciones $F_i(u, v)$, reales y positivas, de forma que se genera una nueva imagen, donde estas cuatro funciones aparecen discretizadas, cada una en uno de cada cuatro píxeles consecutivos, de forma que de una imagen de tamaño $n \times n$ píxeles pasamos a tener una de $4n \times 4n$ píxeles, ya que para mantener la proporción de la imagen se replica la discretización también en el eje y . De esta forma el holograma que calculamos tendrá la forma:

$$H(u, v) = \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^4 F_k(u, v) \delta\left(u - \frac{(4n - k + 1)}{4} \Delta p, v - \frac{4m}{4} \Delta p\right) \quad (3.9)$$

Así tenemos el holograma construido solo con valores reales y positivos que podemos representar en un soporte fotográfico. Al realizar la transformada de Fourier de este holograma reconstruimos la información compleja codificada:

$$\begin{aligned} h(x, y) &= \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^4 f_k\left(x - \frac{n}{\Delta p}, y - \frac{m}{\Delta p}\right) \exp\left(i2\pi \frac{n(k-1)}{4}\right) = \\ &= \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} T_n\left(x - \frac{n}{\Delta p}, y - \frac{m}{\Delta p}\right) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Donde las funciones $f_k(x, y)$ corresponden a las transformadas de Fourier de $F_k(u, v)$. Cada término $T_n(x, y)$ de la serie aparece desplazado y contribuye de forma distinta, si consideramos el término con $n=1$:

$$T_1(x, y) = \sum_{k=1}^4 f_k(x, y) \exp\left(i2\pi n \frac{(k-1)}{4}\right) \quad (3.11)$$

Es equivalente a la transformada de Fourier de $F(u, v)$, considerando la suma de las funciones reales positivas en las que se descompone y los términos de fase que las acompañan, de esta forma se obtiene la reconstrucción de la función $f(x, y)$, con la información compleja que se ha codificado. El término central, $T_0(x, y)$, no tiene contribución de las fases y por tanto aparece como una mancha en la que se encuentran sumados los términos de la transformada de Fourier de las partes real e imaginarias de $F(u, v)$. Por último, si $F(u, v)$ es a una función hermítica el término $T_{-1}(x, y)$, que sale desplazado en el sentido contrario, equivale a la reconstrucción invertida del objeto, $f(-x, -y)$.

Una simplificación de este método, propuesta por Burckhardt [Bur70], consiste en realizar la descomposición de la función en solo tres funciones reales positivas y no en cuatro. No utiliza entonces las proyecciones sobre los ejes real e imaginario, sino sobre los ejes correspondientes a las fases 0 , $\frac{2\pi}{3}$ y $\frac{4\pi}{3}$, utilizando entonces tres píxeles en lugar de cuatro para codificar la función. Aunque el tamaño de los hologramas es menor en este caso, empleamos el método diseñado por Lee ya que mantiene la relación 2^N en el tamaño de las imágenes, lo que permite continuar utilizando el algoritmo FFT para realizar los cálculos de la transformada de Fourier.

3.2. Hologramas de Fresnel codificados con el método de Lee

Usualmente este método de codificación se utiliza para codificar hologramas de Fourier, en los que el objeto que se quiere reconstruir es la información que directamente se codifica. En nuestro caso estamos interesados en reconstruir hologramas de Fresnel, por lo tanto la información que codificamos en el holograma de Lee es la distribución compleja de la retropropagación, a la distancia escogida, del objeto que se desea reconstruir, de esta forma se pueden obtener reconstrucciones en posiciones diferentes a las del plano de Fourier.

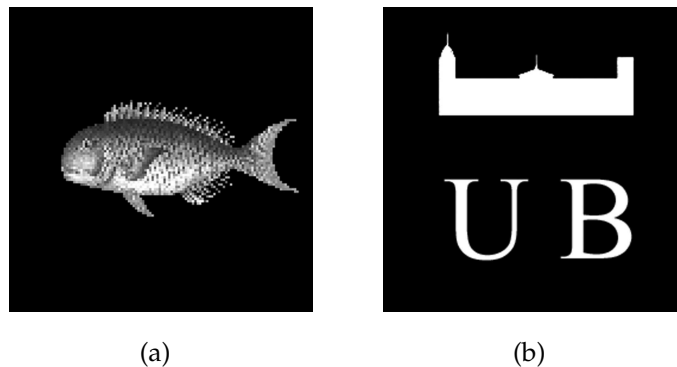


Figura 3.1: Imágenes de 256×256 píxeles con los objetos originales: (a) el pez y (b) el logo de la UB

En esta ocasión utilizaremos como objeto las imágenes del pez y del logo de la UB de un tamaño de 256×256 píxeles que se muestran en la figura 3.1. Cada una de estas imágenes se retropropaga, mediante la transformada de Fresnel, a una distancia de 240.88 mm, entonces con la distribución compleja que se obtiene se calcula la transformada de Fourier y se aplica el método de Lee para codificarla en valores reales positivos. De esta forma obtenemos los hologramas de 1024×1024 píxeles que se muestran en la figura 3.2. Debido al rango dinámico en que se distribuye la información en la transformada de Fourier, en la que las bajas frecuencias tienen mucha más intensidad que las altas frecuencias, es necesario utilizar un umbral en la intensidad para conservar información de los detalles de la imagen, de forma que se traduce entonces en una pérdida de información en las bajas frecuencias, dando lugar a reconstrucciones donde solo se aprecian los contornos y detalles del objeto.

Para simular las reconstrucciones a partir de estos hologramas hay que realizar dos

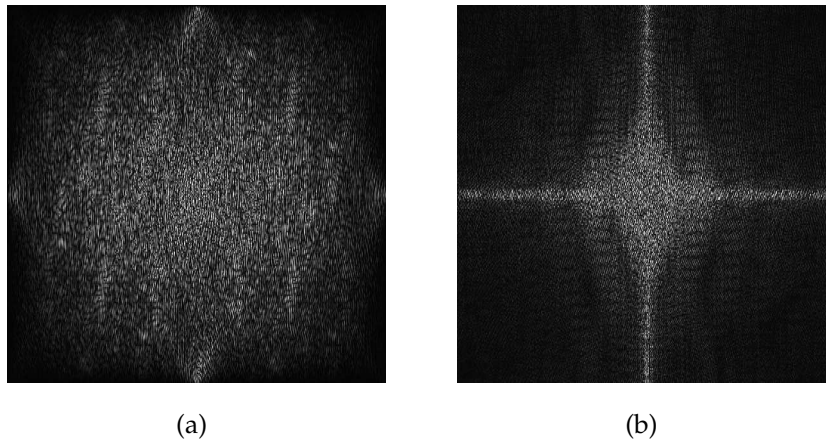


Figura 3.2: Hologramas de Lee con la codificación de la distribución compleja que reconstruye a 240.88 mm: (a) el pez y (b) el logo de la UB

pasos, primero calculamos la transformada de Fourier del holograma, y después propagamos el resultado con la transformada de Fresnel hasta la distancia en la que se obtiene la reconstrucción. De esta forma obtenemos los resultados que se muestran en la figura 3.3(b), para la reconstrucción del pez a 240.88 mm, y 3.3(d) para la reconstrucción del logo de la UB a 240.88 mm. En estas imágenes se puede ver como la reconstrucción del objeto se obtiene desplazada del centro, como era de esperar, ya que es el término para $n = 1$ de la serie de la ecuación 3.10. El hecho de no utilizar la transformada inversa en el proceso de codificación y reconstrucción y solo utilizar la transformada de Fourier directa hace que el objeto aparezca invertido. En el centro vemos la contribución del término con $n = 0$, que en este caso se trata de la propagación hasta 240.88 mm de la suma de los términos sin las fases que permiten la reconstrucción de la distribución compleja. Para obtener la reconstrucción invertida del término con $n = -1$, se ha de realizar la propagación a la distancia también negativa, es decir a -240.88 mm tras el plano de Fourier donde se obtiene la información compleja que se ha codificado en el holograma de Lee. Estas reconstrucciones invertidas se muestran en las figuras 3.3(a), para el pez, y 3.3(c) para el logo de la UB. En este caso la inversión del objeto debida a las dos transformadas directas de Fourier se ve contrarrestada por el cambio de signo en las fases de la ecuación 3.10. En estas imágenes con las reconstrucciones solo se aprecian los detalles y contornos de los objetos, debido a la umbralización que se realiza en la transformada de Fourier a la hora de realizar el cálculo del holograma.

El hecho de utilizar la codificación de hologramas de Fresnel nos permite tener las

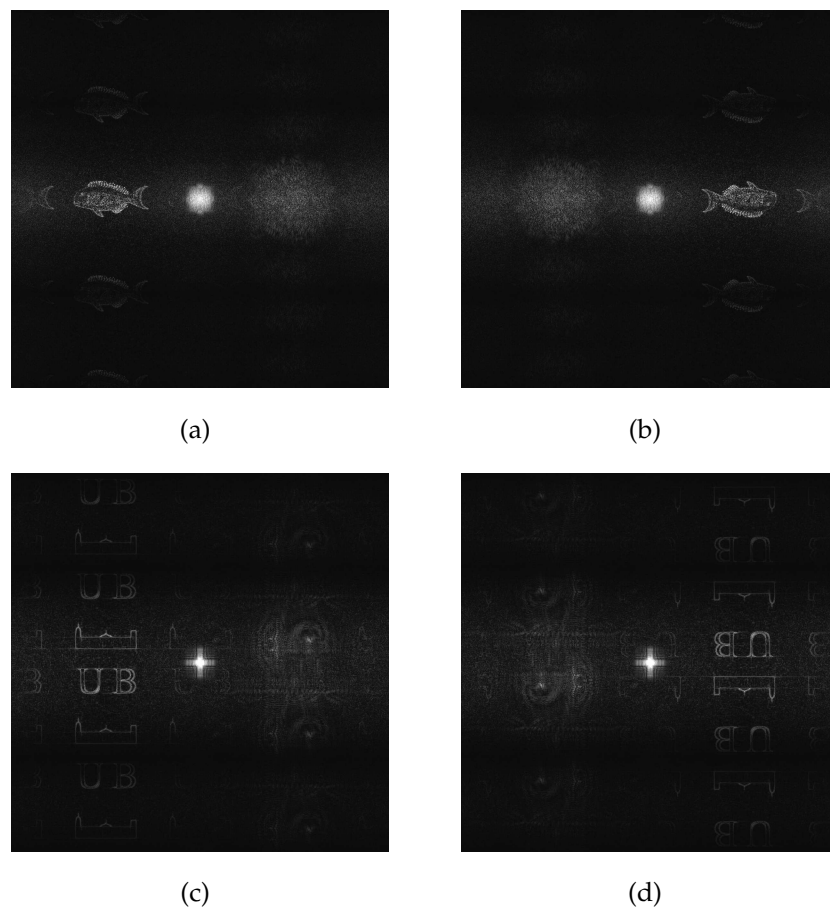


Figura 3.3: Imágenes de las amplitudes reconstruidas tras realizar la transformada de Fourier del holograma de Lee: (a) el pez a -240.88 mm, (b) el pez a 240.88 mm, (c) el logo a -240.88 mm y (d) el logo a 240.88 mm

reconstrucciones en planos distintos del plano de Fourier, lo que permite mayor flexibilidad a la hora de representar información compleja. Para mostrar esta posibilidad hemos codificado la distribución de un holograma de Fresnel que reconstruye por separado el edificio y las letras UB de la imagen del logo. En la figura 3.4(a) se muestra la reconstrucción a -240 mm, donde es la silueta del edificio la que aparece enfocada mientras que las letras aparecen desenfocadas, en la figura 3.4(b) se muestra la reconstrucción a -320 mm, donde tenemos el caso contrario, las letras aparecen enfocadas y el edificio aparece desenfocado. Esto no sería posible si en lugar de codificar una distribución calculada con la transformada de Fresnel se codificara directamente la información del objeto, con lo que se tendría un holograma de Fourier en el que las reconstrucciones se obtienen solo en el plano donde aparece la transformada de Fourier del holograma.

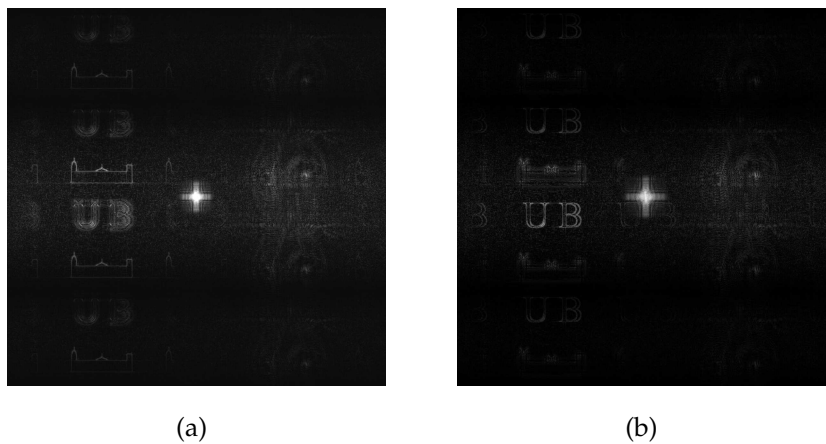


Figura 3.4: Imágenes de las amplitudes reconstruidas tras realizar la transformada de Fourier del holograma que contiene las letras y el edificio del logo a diferentes distancias: (a) a -240 mm donde focaliza el edificio y (b) a -320 mm donde focalizan las letras UB

3.3. Reconstrucción experimental de hologramas de Lee

Para reconstruir experimentalmente las imágenes del pez y del logo de la UB, primero hay que pasar el holograma de Lee que se ha calculado a un negativo fotográfico. Para ello primero hacemos una inversión de los valores de gris de la imagen del holograma de Lee y la imprimimos. Después mediante una cámara fotográfica realizamos una fotografía de esta imagen, de forma que tras realizar la fotografía y revelar la película tenemos el holograma de Lee directamente representado en el negativo.

Entonces para mostrar la información registrada en el holograma hay que utilizar un montaje que realice la transformada de Fourier ópticamente. En la figura 3.5 se muestra un montaje habitual para obtener la transformada de Fourier mediante un sistema $2f$, en la que el holograma se coloca en el plano focal objeto de una lente y se ilumina mediante una onda plana, de forma que en el plano focal imagen se obtiene la transformada de Fourier. Otra alternativa es utilizar un montaje convergente, como el que se muestra en la figura 3.6, en el que solo se utiliza una lente que se coloca delante del holograma, de forma que en el plano donde se forma la imagen de la fuente puntual de iluminación se obtiene la transformada de Fourier.

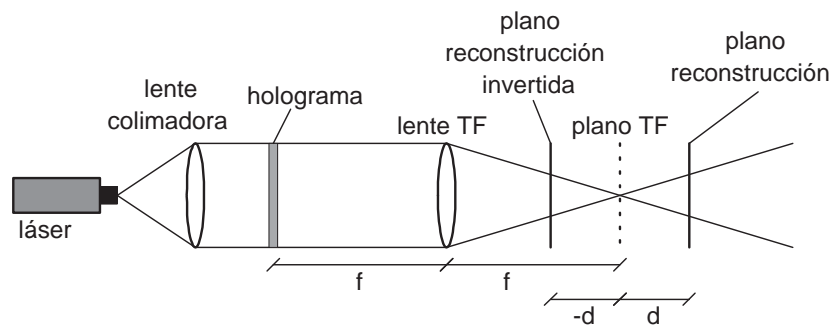


Figura 3.5: Montaje experimental $2f$ para obtener la reconstrucción de un holograma de Lee

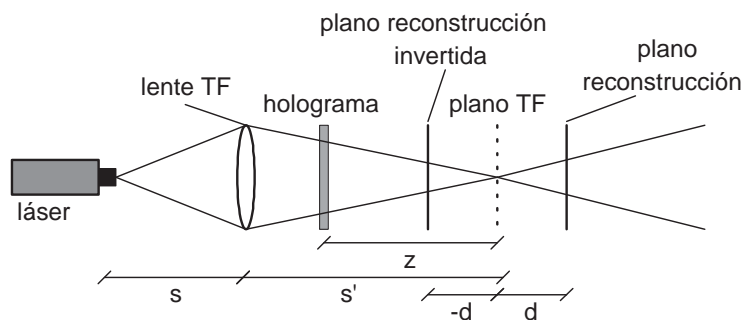


Figura 3.6: Montaje experimental convergente para obtener la reconstrucción de un holograma de Lee

3.3.1. Cambios de escala

Un aspecto a tener en cuenta a la hora de realizar el registro de un holograma de Fresnel en un soporte fotográfico usando la codificación de Lee son los cambios de escala que se producen en los distintos pasos del proceso, tanto en la codificación como en la reconstrucción, lo que hace variar las dimensiones de los objetos y las distancias a las que se obtienen las reconstrucciones. Así, cuando codificamos el holograma primero se calcula la transformada de Fresnel a la distancia que se desea propagar el objeto. Este paso no implica un cambio de tamaño, ya que el cálculo se realiza mediante dos FFT consecutivas, que mantienen las dimensiones de la imagen. En nuestro caso tenemos una imagen cuadrada de $N = 256 \times 256$ píxeles de tamaño $\Delta p = 0,042$ mm, por lo que el tamaño de un lado de la imagen es de $l = 10,75$ mm.

El siguiente paso es realizar la transformada de Fourier antes de llevar a cabo la codificación de Lee, en este caso si que hay un cambio de dimensiones al pasar del espacio

directo al espacio de Fourier. Si tenemos en cuenta que se mantiene el número de píxeles, el tamaño de estos se transforma de la forma $\Delta p' = 1/l = 1/N\Delta p$, así tenemos una imagen de $N' = 256 \times 256$ píxeles de $\Delta p' = 0,093$ mm, y el tamaño de un lado de la imagen transformada es de $l' = 23,81$ mm. El siguiente cambio es la codificación, que multiplica el número de píxeles por 4 pero mantiene su tamaño, así pasamos a tener $N'' = 1024 \times 1024$ píxeles con $\Delta p'' = 0,093$ mm y el tamaño de un lado del holograma es entonces de $l'' = 95,24$ mm.

Hasta aquí hemos considerado los cambios que se producen a la hora de calcular el holograma. Al imprimir esta imagen, en nuestro caso con una resolución de 150 dpi, y fotografiarla para pasar al negativo, tenemos un nuevo cambio de escala, ya que el tamaño de la imagen se reduce, y pasamos de un lado del holograma de 95.24 mm a un lado de 23.65 mm, con lo que el factor de reducción es $\alpha = 0.25$.

Si la reconstrucción se realiza con la transformada de Fourier numérica, que es equivalente a una transformada escalada con un factor $K = 1 \text{ mm}^2$, el cambio de dimensiones se vuelve a invertir, de forma que se puede considerar el cambio de escala que introducen las transformadas igual a 1, las transformadas no son reescaladas y el objeto final solo varía su dimensión debido a la reducción fotográfica, manteniéndose las distancias a las que se obtiene la reconstrucción. Sin embargo, al usar un montaje con lentes para obtener la transformada de Fourier óptica se introduce un reescalado, que hace variar las dimensiones del objeto y la distancia a la que se obtiene esta reconstrucción. Si utilizamos un montaje $2f$ como el de la figura 3.5, el campo en el plano de Fourier tiene la forma [CJVB01]:

$$U(x, y, 0) = A \frac{\exp(ik2f)}{i\lambda f} \text{TF}_{\lambda f}[H(u, v)] \quad (3.12)$$

Con lo que tenemos la transformada de Fourier del holograma $H(u, v)$ escalada por la relación λf . En el caso de utilizar un montaje convergente como el de la figura 3.6, el factor de escala de la transformada de Fourier varía y aparecen más términos de fase en el plano de Fourier:

$$U(x, y, 0) = A \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right) \text{TF}_{\lambda z}[H(u, v)] \quad (3.13)$$

En este caso el factor es λz , donde z es la distancia entre el holograma y el plano de Fourier. Si cuando se calcula el holograma no se introduce un cambio de escala K para compensar los que se introducen al utilizar lentes, hay que tener en cuenta que

la distancia de propagación desde el plano de Fourier hasta el plano en el que se reconstruye el objeto ya no se corresponde con la que se ha utilizado en la simulación y las dimensiones del objeto también habrán cambiado, ya que se verán afectadas por los cambios de escala al realizar la transformada de Fourier óptica, que influyen en la posterior propagación de Fresnel.

Así, si consideramos que tras la transformada de Fresnel y la de Fourier numéricas que se realizan para calcular el holograma ($K = 1 \text{ mm}^2$), se realiza la transformada óptica y la propagación de Fresnel para reconstruir el objeto, tenemos que, en el caso de utilizar un montaje $2f$, la nueva distancia a la que se recupera el objeto original desde el plano de Fourier es:

$$d' = d \frac{\lambda^2 f^2}{K^2} \quad (3.14)$$

y el campo a esa distancia:

$$U(x, y, d') = \frac{K^2 \exp(ik(d' + 2f - d))}{i\lambda^2 f^2} g\left(\frac{-Kx}{\lambda f}, \frac{-Ky}{\lambda f}\right) \quad (3.15)$$

De forma que si antes teníamos una distancia de propagación $d = 240 \text{ mm}$, al utilizar un montaje $2f$ con una lente de focal $f = 500 \text{ mm}$ y un láser de 632.8 nm de longitud de onda, el factor de escala es $\lambda f / K = 0.32$ y la nueva distancia de propagación es $d' = 24 \text{ mm}$, donde se obtiene la reconstrucción del objeto invertido y de nuevo reescalado. Al captar la intensidad del campo, los términos de fase que aparecen no tienen influencia. En el caso de utilizar el montaje convergente para realizar la reconstrucción, el término de fase cuadrática que aparece en la expresión de la ecuación 3.13 influye en la nueva distancia de reconstrucción de forma que si la distancia entre el holograma y el plano donde se obtiene la transformada de Fourier es z , la nueva distancia de propagación desde este plano es:

$$d' = \frac{\lambda^2 z^2 d}{K^2 - \lambda^2 z d} \quad (3.16)$$

y el campo a esa distancia:

$$U(x, y, d') = \frac{K^2 \exp(ik(d' + z - d))}{i\lambda(z + d')} \exp\left(\frac{ik(x^2 + y^2)}{2(z + d')}\right) g\left(\frac{-Kx}{\lambda(z + d')}, \frac{-Ky}{\lambda(z + d')}\right) \quad (3.17)$$

Utilizando un sistema convergente con una lente de focal $f = 500 \text{ mm}$ y un láser de 632.8 nm de longitud de onda, de forma que la distancia entre el holograma y el plano de Fourier es de $z = 835 \text{ mm}$, tenemos que la distancia de propagación desde

este plano al plano donde se obtiene la reconstrucción del objeto pasa de 240 mm a 72.8 mm y el factor de escala $\lambda(z + d')/K = 0.57$. De nuevo en este plano aparecen términos de fase que pueden ser despreciados al captar la intensidad del campo y el objeto aparece invertido y reescalado.

3.3.2. Reconstrucciones con iluminación convergente

Teniendo esto en cuenta hemos utilizado un montaje convergente, con una lente de 500 mm de focal y un láser de He-Ne de 632.8 nm de longitud de onda, para reconstruir los hologramas de Lee del pez y el logo de la UB, calculados teóricamente con una distancia de propagación de 240.88 mm. Usamos una cámara CCD para captar las reconstrucciones que se muestran en la figura 3.7, donde se pueden ver los resultados tanto para la propagación que recupera las imágenes 73.14 mm detrás del plano de Fourier, como las reconstrucciones invertidas (con el objeto no invertido) que se obtienen colocando la cámara 73.14 mm antes del plano de Fourier, lo que equivale a una distancia de propagación negativa. Estas imágenes recuperan solo los bordes y los detalles del pez y del logo, debido a la limitación que se realiza en las frecuencias de la transformada de Fourier a la hora de calcular el holograma. Aún así se puede apreciar como estos resultados se corresponden perfectamente con las simulaciones que se han mostrado anteriormente (figura 3.3).

Por último, en la figura 3.8 se muestran las reconstrucciones del holograma que tiene codificados dos objetos a distintas distancias, 64 mm antes del plano de Fourier aparece enfocado la silueta del edificio mientras que las letras están desenfocadas (figura 3.8(a)), unos 20 mm más adelante tenemos la situación inversa, las letras aparecen enfocadas y el edificio ya está desenfocado (figura 3.8(b)). La posibilidad de reconstruir en distintos planos surge del hecho de realizar el holograma de Lee a partir de una distribución compleja que ya contiene la información del holograma de Fresnel, en lugar de codificar directamente el objeto, con lo que solo se tiene la reconstrucción del mismo en el plano de Fourier.

Como se ha comentado anteriormente, existen otras posibilidades para codificar una distribución compleja para poder ser representada, con diferentes resultados, aunque en la mayoría de casos la codificación implica una limitación en la resolución de la información que se desea mostrar. Una posible alternativa a la codificación es la de representar directamente solo la parte real (o imaginaria) de la función compleja, de

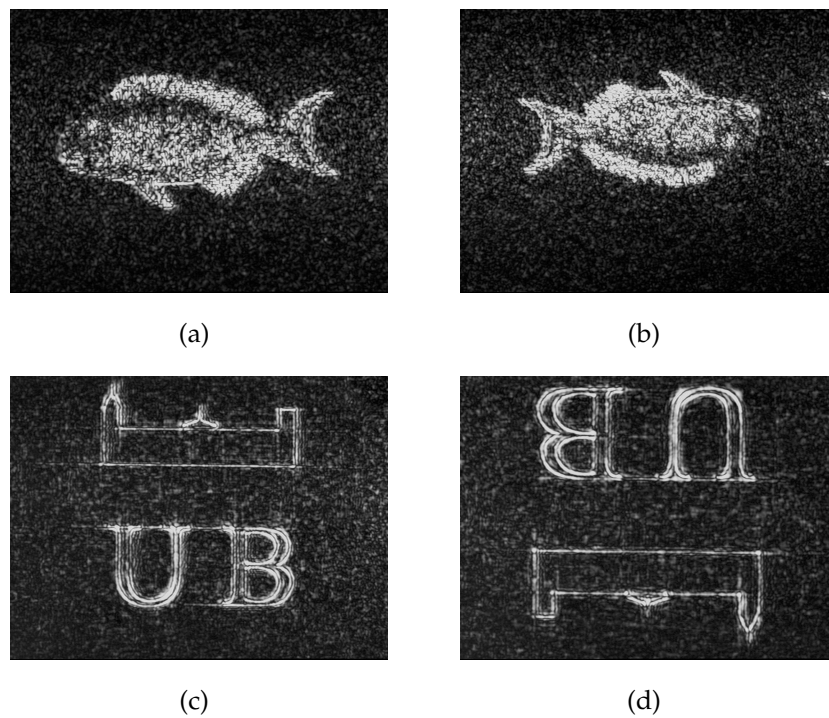


Figura 3.7: Imágenes de las reconstrucciones de los hologramas de Lee: (a) del pez a distancia negativa, (b) del pez invertido a distancia positiva, (c) del logo a distancia negativa y (d) del logo invertido a distancia positiva

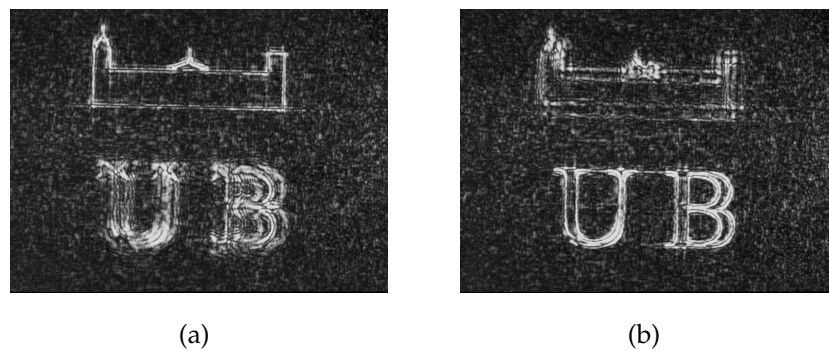


Figura 3.8: Imágenes de las reconstrucciones del holograma de Lee con las letras y el edificio a dos distancias: (a) distancia a la que aparece el edificio enfocado y (b) distancia a la que las letras aparecen enfocadas

esta forma para ciertas distancias de propagación la reconstrucción es bastante aceptable, como se vio en el capítulo 2. El problema reside en los valores negativos que pueden aparecer en la parte real, para evitarlos se puede sumar una constante a todos los valores, pero entonces el valor cero aparece con un valor medio, lo que hace que lo antes aparecía en la reconstrucción como negro sea ahora un gris, por encima de

las partes en las que los valores de la función sean negativos, por lo que la reconstrucción puede ser difícil de apreciar para los valores negativos. Si lo que se considera es el valor absoluto, entonces la reconstrucción ya no es tan buena, ya que se pierde la información de las fases 0 y π que se mantiene en la parte real, con lo que se aproxima al resultado que se obtiene al usar solo la amplitud, que como se vio anteriormente, no permite una reconstrucción del todo correcta.

Así que para obtener unas reconstrucciones correctas para todas las distancias se hace necesario utilizar un método de modulación compleja completa, como los que se mostrarán en capítulos posteriores. De forma que si además se utilizan pantallas de cristal líquido se puede evitar el proceso de revelado, lo que permite una manipulación en tiempo real de la información que se desea mostrar.