

Capítulo 3

Óptica y holografía digital¹

¹ Parcialmente basado en el Proyecto Fin de Carrera “Algoritmos de Reconstrucción de Interferometría Holográfica Digital. Desarrollo e interfaz de usuario.” elaborado por el ingeniero Rafael Coronado Santos bajo la dirección del Prof. Dr. Emilio Gómez González, Universidad de Sevilla, 2001.

3.1. Registro de hologramas digitales.

En el registro de hologramas digitales utilizamos el mismo montaje que para la holografía física, con la única diferencia de que el material sensible donde se hace el registro del holograma pasa a ser un sensor electrónico de captura llamado CCD.

El fenómeno físico de interferencia se produce en la misma forma que en la holografía física, es decir, que lo que se registra en el CCD es la distribución de irradiancia recibida como superposición de la onda objeto y la onda de referencia.

Un CCD es un elemento electrónico que transforma la señal analógica recibida, en información digital, para su posterior tratamiento en una computadora. En un CCD tenemos una matriz de puntos sensibles llamados píxeles, que serán los encargados de tomar medida de la irradiancia recibida. La información que registra el CCD queda inmediatamente almacenada en la computadora en forma de una matriz ordenada con el valor registrado por cada pixel. Esto representa una gran ventaja respecto a los medios tradicionales de registro de hologramas, ya que elimina los largos y tediosos procesos de revelado químico de las placas fotográficas. Por el contrario, hasta ahora, los CCD no han podido igualar en resolución a las placas fotográficas, aunque los avances de la tecnología en este campo son cada vez mayores, y continuamente van apareciendo en el mercado nuevos CCD con más resolución y mayor profundidad de campo.

Otra ventaja de los CCD frente a las placas fotográficas es la reducción del tiempo de exposición para el registro del holograma. A continuación presentamos una tabla con una comparativa de varios materiales sensibles.

Material sensible	Tipo de holograma	Procesado	Exposición requerida [J/m ²]	Sensible al espectro de onda. [nm]	Resolución [mm ⁻¹]
Silver halides	Ampl./Fase	Químico	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-1}$	400 – 700	$10^3 - 10^4$
Photochromics	Amplitud	No	$10^2 - 10^3$	300 – 700	>5000
Photoresists	Fase	Químico	10^2	UV-500	3000
CCD	Amplitud	No	$10^{-4} - 10^{-3}$	400 – 1000	75

Como vemos en la tabla, el umbral de energía necesario para que el CCD registre una señal es bastante menor que los materiales tradicionales para el registro de hologramas. Esto permite que si disponemos de un láser de gran potencia, podemos realizar registros consecutivos en un espacio de tiempo muy corto, obteniendo así una película del objeto, en el que cada fotograma es un holograma del objeto en un instante determinado.

Otra de las ventajas más importantes de los sensores CCD frente a las placas holográficas es que el número de registros sobre un mismo CCD es ilimitado. En las placas holográficas sólo podemos hacer un registro, sólo podemos almacenar un holograma. Si por cualquier circunstancia el proceso de registro reviste algún error, la placa holográfica queda inservible para una posterior utilización. Estamos obligados a utilizar una placa nueva. Si empleamos un CCD, el hecho de realizar un registro holográfico no impide que pueda ser utilizados posteriormente para realizar otro holograma, fotografía o vídeo captura. Si con un CCD el proceso de registro reviste algún error, no hay más que repetir el experimento, pudiendo utilizar todos los materiales en las mismas circunstancias que antes.

Una desventaja importante es la baja resolución de estos sensores comparada con la resolución de los materiales convencionales. Hoy en día se trabaja para paliar esta diferencia y conseguir que la resolución de los CCD sea del mismo orden que la de los materiales convencionales. Sin embargo, esta desventaja en la resolución del holograma no es importante, ya que para nuestro estudio, lo que importa es la resolución del interferograma, o más concretamente, la cantidad de puntos en los que tenemos calculada la distribución de interferencia de fase. De esta forma, pese a que el holograma digital registrado es de una resolución bastante más baja que un holograma físico, durante el procesado del holograma digital para la obtención de la distribución de interferencia de fase obtendremos una resolución más alta en el interferograma. Así, la información que obtenemos de la interferograma acerca de los parámetros físicos de interés será más precisa. Esta forma de procesado la estudiaremos más adelante en este capítulo.

Los hologramas realizados con un CCD son hologramas de amplitud. Por eso, en nuestro caso, al concluir el proceso de registro, lo que tendremos es un fichero en donde está almacenada información de la irradiancia recibida en forma de una transmitancia. Esta transmitancia es una distribución de valores ordenados en una matriz comprendidos entre cero y uno. Los puntos del CCD que más irradiancia hayan recibido tendrán valores cercanos a uno, y aquellos puntos que hayan recibido menor irradiancia tendrán valores cercanos a cero. De esta forma, los valores cercanos a uno son puntos de la transmitancia que cuando se ilumine dejarán pasar la mayor parte de la energía radiante recibida, mientras que aquellos puntos cuya transmitancia resultante sea cercana a cero casi no dejarán pasar la energía recibida.

Si visualizáramos la distribución de los valores registrados por el CCD obtendríamos una imagen análoga a un holograma convencional. Para visualizar esta imagen asignamos, a cada valor de la irradiancia registrada, un color dentro de una escala de grises. Así, un valor cercano a uno será de un color gris muy claro, cercano al blanco, mientras que si el valor es cercano a cero, el color gris resultante será muy oscuro, casi negro. La imagen resultante es nuestro holograma digital.

El proceso que acabamos de explicar es análogo al que se producía en el registro de los hologramas físicos, cuando en función de la energía recibida el material respondía de tal forma que aquellos puntos que recibían más energía se volvían blancos, mientras que aquellos puntos que recibían menor cantidad de energía radiante permanecían siendo oscuros. Cuanto mayor era la energía radiante recibida, mas claro se volvía el punto sensible.

Como hemos visto apenas hay diferencias entre el proceso de registro de un holograma físico y uno digital. En donde si encontraremos muchas diferencias será en la reconstrucción ya que un archivo de información no se puede iluminar físicamente

3.2. Reconstrucción de hologramas digitales.

El proceso de reconstrucción digital es considerablemente distinto al de reconstrucción física. La mayor diferencia radica en ahora no tenemos físicamente un holograma, sino que disponemos de un fichero informático que representa un holograma digital. Al no disponer de un holograma físico no podemos realizar el proceso físico de reconstrucción, que consistía en la iluminación del holograma físico por el frente de onda de referencia. Ahora no tenemos ningún holograma que iluminar.

Para obtener un holograma físico a partir del registro del CCD podríamos, de alguna manera, editar la imagen que representa el holograma digital, y así, una vez que tengamos el holograma físico, extraído a partir del holograma digital registrado por el CCD, podemos proceder a su iluminación con la onda de referencia colocando el holograma en las mismas condiciones en las que se hizo el registro. Esto, aunque es una solución posible, no se hace, ya carece de sentido físico realizar el registro en un CCD para luego tener que editarlo y iluminarlo, ya que la resolución es muy baja y los

hologramas generados por este procedimiento son de muy baja calidad, tanto más los interferogramas.

La solución a la reconstrucción de un holograma digital no está en el ámbito de lo físico, sino en el de lo virtual. Disponemos de un fichero que almacena el holograma digital, que no es más que una distribución ordenada de valores numéricos que representa una transmitancia. Si esta transmitancia fuera físicamente un holograma, al ser iluminada por la onda de referencia, cada punto de la transmitancia difractaría el frente onda de referencia incidente, produciéndose tras la transmitancia, el proceso de reconstrucción del frente de onda objeto por interferencia de todas las ondas difractadas por la transmitancia. Como hemos dicho, esta transmitancia no es más que una distribución de valores numéricos ordenados, que no se pueden iluminar físicamente. Sin embargo, podemos iluminarla de forma virtual, es decir, podemos desarrollar un software que reproduzca el fenómeno de la difracción de una transmitancia al ser iluminada por una onda de referencia virtual y la posterior interferencia de las ondas difractadas tras la transmitancia.

El fundamento de la reconstrucción digital de frentes de onda a partir de un holograma registrado en un CCD es evaluar la integral de Fresnel-Kirchoff para cada uno de los puntos del plano de reconstrucción. Vemos en la figura 3.1. el sistema de referencia empleado para la definición de las variables del problema. En ella vemos el llamado plano de difracción, en el que colocamos la transmitancia, y evaluamos el patrón de difracción que genera (tras ser iluminado virtualmente) en el llamado plano de observación, donde calculamos la superposición de las ondas difractadas virtualmente.

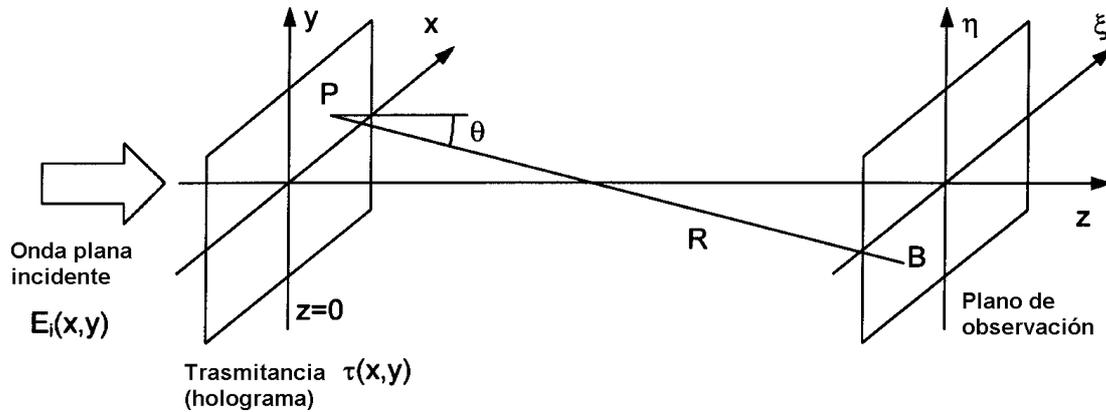


Figura 3. 1 Sistema de referencia empleado en la reconstrucción holográfica [4]

La transmitancia, como dijimos anteriormente, no es más que una distribución ordenada de valores numéricos resultante del registro de la irradiancia realizada por el CCD. Ahora veremos la transmitancia como una imagen digital, es decir, que el conjunto de dichos valores forma el holograma digital. Cada uno de estos valores es un pixel del holograma. Sin embargo, para formar el holograma digital, que será nuestra transmitancia, no basta con el valor numérico de cada pixel, necesitamos también el tamaño del pixel, para dar dimensiones a nuestra transmitancia. Cuando tengamos el tamaño del pixel podremos generar nuestra transmitancia ordenando los píxeles según su posición, con su tamaño característico y con su transmisividad correspondiente. La imagen del holograma digital se genera así como si fuera un puzzle en el que se encajan piezas ordenadamente, donde cada pieza es un pixel, de un color dentro de una escala de grises asignada a los valores de la irradiancia registrada.

Para la obtención del tamaño del pixel, tenemos que introducir algún tipo de referencia, dentro del montaje holográfico, que nos permita saber el tamaño de los objetos bajo estudio y así calcular el tamaño físico de la imagen digital registrada. Si no introducimos el tamaño correcto del pixel, nuestra transmitancia será de un tamaño distinto al holograma físico que hubiésemos obtenido de realizar un montaje de holografía física, y por lo tanto, la reconstrucción digital que procedamos a evaluar a

partir de esa transmitancia, aunque esté bien calculada, su resultado estará desvirtuado, al no concordar con el proceso físico que quiere simular.

Suponiendo que los datos necesarios para la reconstrucción digital (registro de la irradiancia realizada por el CCD y tamaño del píxel equivalente en el objeto) se han obtenido correctamente, podemos proceder a la simulación de la interferencia de las ondas difractadas.

En holografía digital, como anteriormente habíamos dicho, los hologramas capturados por un sensor CCD son almacenados como hologramas de Fresnel (hologramas de amplitud). Para una más fácil comprensión de los fenómenos que vamos a explicar, supondremos que el proceso de registro del holograma se hizo empleando una onda de referencia de incidencia ortogonal al plano del CCD. Para la reconstrucción virtual del campo luminoso generado tras la transmitancia, debemos utilizar, para simular el proceso de iluminación virtual, una onda de referencia idéntica a la que se utilizó en el proceso de registro. Por eso, nuestra reconstrucción virtual del campo luminoso, se hará empleando una onda de referencia que incida ortogonalmente sobre la transmitancia.

El proceso físico de reconstrucción del campo luminoso guardado en una placa holográfica se realizaba iluminando el holograma con la onda de referencia en las mismas condiciones en las que se hizo el registro holográfico:

$$\begin{aligned}
 E_{reconstr} &= T E_R = \alpha E_R - \beta t_B E_R (E_P E_P^* + E_R E_R^* + E_P^* E_R + E_P E_R^*) = \\
 &= (\alpha - \beta t_B (|E_R|^2 + |E_P|^2)) E_R - \\
 &\quad - \beta t_B E_R^2 E_P^* - \\
 &\quad - \beta t_B |E_R|^2 E_P
 \end{aligned} \tag{78}$$

La difracción de la onda plana de referencia se describe mediante la integral de Fresnel-Kirchhoff:

$$E(\xi, \eta, z) = \frac{i \cdot E_0}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tau(x, y) \frac{e^{-i \cdot k \cdot R}}{R} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right) dx dy \quad [79]$$

Si asumimos que la distancia z entre el holograma y el objeto, y por tanto, la distancia entre el holograma y la imagen real, es mucho mayor que la máxima dimensión del CCD, de tal forma que:

$$z^3 \gg \max \left\{ \frac{\pi}{4 \lambda} \left[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 \right]^2 \right\} \quad [80]$$

entonces se cumple la condición de campo cercano o, lo que es lo mismo, la aproximación de Fresnel es válida. De esta forma podemos utilizar la transformada discreta finita de Fresnel para calcular la amplitud compleja de la onda difractada por el holograma digital como si este fuese un holograma físico. Supongamos que nuestra transmitancia esta forma por $N \times M$ píxeles de tamaño $\Delta x \times \Delta y$. Si procedemos ahora, a la evaluación de la integral de la amplitud compleja de las ondas difractadas en el plano de observación, obtenemos:

$$E(n, m, z) = \frac{i E_0}{\lambda z} e^{-i \pi \lambda z \left(\frac{n^2}{N^2 \Delta x^2} + \frac{m^2}{M^2 \Delta y^2} \right)} \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{M-1} \tau(k, l) e^{-\frac{i \pi}{\lambda z} (k^2 \Delta x^2 + l^2 \Delta y^2)} e^{i 2\pi \left(\frac{k n}{N} + \frac{l m}{M} \right)} \quad [81]$$

$E_0 \neq 0$ representa la amplitud real de la onda de referencia de reconstrucción virtual y puede ser arbitraria (lo importante es, que en cada punto incide con la misma fase). Esta ecuación es la transformada inversa de Fourier del producto del holograma digital $\tau(k, l)$ multiplicado por un factor de carácter exponencial que puede ser considerado como un plano zonal de Fresnel. Esta transformada de Fourier se puede evaluar mediante algoritmos FFT que proporcionan un cálculo muy efectivo.

Para la reconstrucción virtual del campo luminoso tras un holograma digital disponemos de una herramienta de cálculo computacional. Esta herramienta de cálculo está pensada para proporcionar la interferencia de las ondas luminosas difractadas por una transmitancia cuando incide sobre ella un frente de onda. Esta interferencia se calcula en un volumen de observación. En nuestro caso, la transmitancia será el holograma digital, y el campo luminoso calculado tras la transmitancia será el campo luminoso reconstruido del objeto en el estado en el que se realizó el holograma. Para la correcta reconstrucción del campo luminoso necesitamos saber todos los datos del proceso de registro: registro del holograma digital, tamaño de pixel, longitud de onda del láser empleado, energía característica del láser, posición del origen del frente de onda referencia, forma del frente de onda de referencia y distancia del objeto al CCD. Con estos datos podemos reconstruir virtualmente el campo luminoso del objeto bajo estudio.

Solo queda decidir el tipo de reconstrucción que vamos emplear. Tenemos a nuestra disposición dos opciones: realizar una aproximación FFT con lo que la computadora se encarga de realizar la discretización del espacio de calculo, o realizar una discretización propia del medio y resolver la integral de Fresnel-Kirchhof. La aproximación FFT es mucho mas rápida al ser algoritmos depurados de gran eficiencia. Sin embargo, no siempre es posible emplearlos, ya que esta forma de reconstrucción simula la difracción bajo la condición de Fraunhofer o de campo lejano, por lo que solo en el caso de que el proceso de registro del holograma cumpla la condición de Fraunhofer podremos emplear dicha algoritmo de reconstrucción. Para que el proceso de registro del holograma este bajo las condición de Fraunhofer se debe cumplir que el haz de iluminación sea colimado y que el objeto bajo estudio sea cuasi-plano, para que se así, el haz objeto reflejado que incide sobre el CCD sea también colimado. Si alguna de estas condiciones no se cumple, estamos obligados a usar el algoritmo de discretización propia.

La imagen reconstruida en el plano de reconstrucción $E(n,m,z)$ es una función compleja, por lo que tenemos acceso tanto a la amplitud $E(P)$ como a la fase de la

onda $\phi(P)$ para cada punto P del plano de reconstrucción. Esto contrasta con la holografía física, donde solo podíamos calcular la amplitud del campo luminoso. Esta es la ventaja principal de la óptica digital, que al calcular de forma virtual la fase del campo reconstruido ofrece un nuevo campo de investigación y desarrollo.

La intensidad del campo luminoso reconstruido virtualmente la determinamos mediante:

$$I(n, m, z) = |E(n, m, z)|^2 = \{\text{Re}[E(n, m, z)]\}^2 + \{\text{Im}[E(n, m, z)]\}^2 \quad [82]$$

Y la distribución de fase la podemos calcular como:

$$\phi(n, m, z) = \arctan \frac{\text{Im}[E(n, m, z)]}{\text{Re}[E(n, m, z)]} \quad [83]$$

que proporciona valores comprendidos entre $]-\pi, +\pi]$, si la función arcontangente la hemos tenido en cuenta con numerador y denominador de forma separada. Si la superficie del objeto bajo estudio es rugosa la distribución de fase varía de forma aleatoria.

Si ahora representamos conjuntamente los sistemas de referencia del objeto con el del holograma y el plano de observación, vemos que los tres comparten el mismo eje z. Este será el sistema de referencia global que adoptaremos en el estudio de la óptica digital aplicada a la interferometría holográfica.

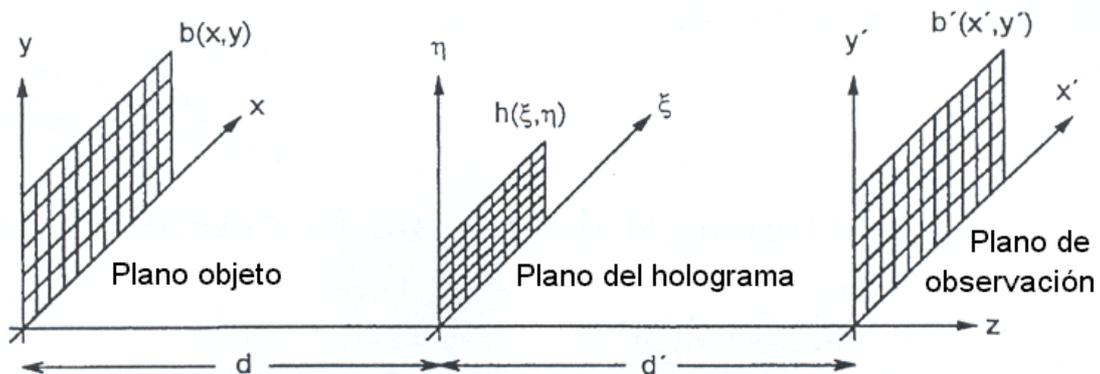


Figura 3. 2 Sistema de referencia global para interferometría. [7]

Concluimos diciendo, que la óptica digital combinada con la holografía, permite la reconstrucción virtual de frentes de ondas almacenados en hologramas digitales, ofreciendo nuevos campos de investigación y proporcionando a las técnicas de interferometría holográfica una forma rápida y eficaz de comparar frentes de ondas.

3.3. Interferometría holográfica digital.

Vamos a estudiar ahora la forma de aplicar las nuevas posibilidades que ofrece la óptica digital, a las técnicas de interferometría holográfica.

En la interferometría holográfica física comparábamos dos campos luminosos reconstruidos a partir de dos hologramas (interferometría de doble exposición y de tiempo promedio) o comparando uno reconstruido a partir de un holograma y otro proveniente directamente del objeto (interferometría en tiempo real). Estos campos luminosos interferían físicamente proporcionando el interferograma, que era una distribución de intensidades de la que podíamos deducir la diferencia de fase entre los dos frentes de onda. La diferencia de fase la tenemos que deducir a partir de la distribución de intensidades del interferograma, por que no tenemos acceso a la fase de

los frentes de onda, ya que no existe ningún sensor que la mida. Esto supone una gran limitación para la interferometría holográfica física ya que al tener que procesar el interferograma, no siempre obtenemos una distribución de interferencia de fase satisfactoria para calcular a partir de ella el campo de desplazamientos.

Los fundamentos de la reconstrucción digital de campos luminosos a partir de hologramas digitales ya han sido presentados. Utilizando estas técnicas, podemos reconstruir dos campos luminosos de forma virtual y compararlos para determinar la diferencia de fase entre los dos frentes de onda. Con este método no necesitamos calcular el interferograma, es decir, no tenemos por que calcular el campo resultante de la superposición de los dos campos reconstruidos virtualmente para determinar la distribución de intensidades (interferograma) y partir de ella deducir la diferencia de fase. Ahora, podemos calcular la diferencia de fase directamente al tener acceso a la fase de los campos reconstruidos. Más adelante veremos la forma de obtener esta diferencia de fase.

La interferometría holográfica digital requiere que los dos campos a comparar sean reconstruidos virtualmente. Esto es debido a que si uno de los campos reconstruidos es físico, no tenemos acceso al cálculo de la fase del frente de onda y por tanto no podremos calcular la diferencia de fase entre los dos frentes de onda. Además, no se puede producir interferencia entre un campo virtual y uno físico, por lo que tampoco podemos obtener el interferograma para calcular después la distribución de interferencia de fase. Por esto, los dos campos a comparar deben ser reconstruidos virtualmente a partir de hologramas digitales.

La holografía digital esta limitada principalmente por los parámetros del CCD. Debemos asumir por simplicidad que los píxeles se encuentran contiguos, sin espacios libres entre ellos, y sin solaparse, por lo que podemos decir que los centros de los píxeles están separados por las distancias Δx y Δy acordes con las dimensiones de los píxeles.

Por el teorema del muestreo o sampling, estados del sólido cuya frecuencia espacial sean menores que $f_{x,\max}$ en la dirección x, y menores que $f_{y,\max}$ en la dirección y, pueden ser eficazmente reconstruidos, donde:

$$f_{x,\max} = \frac{1}{2\Delta x} \quad f_{y,\max} = \frac{1}{2\Delta y} \quad [84]$$

La frecuencia es la inversa de la distancia entre franjas. Esta distancia la podemos poner como $\pi/|k''|$. Por esto, el máximo ángulo admisible entre el objeto y la onda de referencia es $\gamma_{x,\max}$ (ver figura 3.3.), donde:

$$\gamma_{x,\max} = 2 \cdot \arcsen\left(\frac{\lambda}{2} f_{x,\max}\right) \quad [85]$$

La misma relación se sigue en la dirección y.

Objetos de gran tamaño deben ser colocados lo suficientemente alejados del CCD para que el máximo ángulo entre el objeto y la onda de referencia esté dentro del máximo admisible. Si el objeto es demasiado grande, podemos recurrir al empleo de lentes que reducen su tamaño aparente para el CCD.

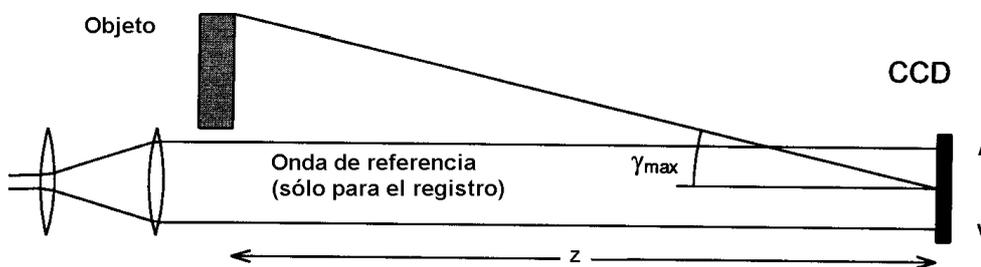


Figura 3.3 Ángulo máximo entre el objeto y el haz de referencia [4]

Un montaje típico empleando lentes cóncavas para reducir el ángulo de la onda objeto lo podemos ver en la figura 3.4. . Vemos que el ángulo original que formaba el frente de onda objeto α se transforma, gracias a la acción de las lentes, de tal forma que ahora el frente de onda objeto proviene de la imagen virtual del objeto formando un ángulo de incidencia β con el CCD. Por eso, todos los rayos provenientes del objeto virtual y la onda de referencia cumplen la condición de estar dentro del margen establecido por el máximo ángulo admisible. Vemos como ahora la distancia de reconstrucción debe ser z' , en vez de z , para la correcto funcionamiento de la simulación virtual.

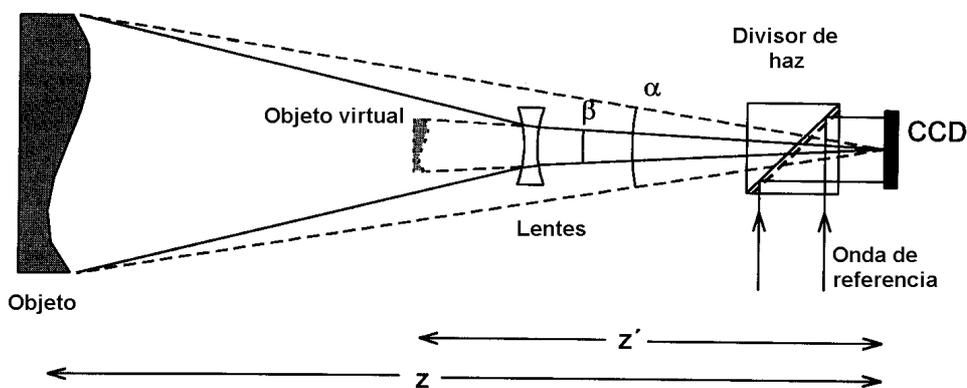


Figura 3. 4 Montaje óptico para obtener distinto tamaño aparente [4]

Teniendo en cuenta estas consideraciones preliminares, ya estamos en disposición de emplear un sensor CCD para la aplicación de técnicas de interferometría holográfica.

Tenemos varias posibilidades para emplear técnicas de óptica digital en la interferometría holográfica. A continuación vamos a hacer una análisis de estas técnicas comparándolas con las que ya existían dentro de la interferometría holográfica física. Veremos la forma de hacer interferometría holográfica digital de doble exposición , en tiempo real y de tiempo promedio.

También veremos como determinar la distribución de interferencia de fase a partir de la cual deduciremos valores cuantitativos de los parámetros físicos a determinar.

3.3.1. Interferometría holográfica digital de doble exposición.

Esta es la técnica por excelencia dentro de la interferometría holográfica digital. En la interferometría holográfica física de doble exposición realizábamos dos registros de un objeto, en diferentes estados de deformación, sobre la misma placa holográfica. Al iluminar con el frente de onda de reconstrucción los dos frentes de ondas registrados se reconstruían al mismo tiempo, interfiriendo tras el holograma. Podíamos ver la diferencia entre ambos campos luminosos tomando un registro del interferograma resultante, y partir de esta distribución de intensidades deducir la distribución de interferencia de fase. Esta era una manera de hacer interferir dos frentes de onda de un mismo objeto en dos estados de deformación distinta.

Ahora, con la interferometría holográfica digital haremos esencialmente lo mismo. El montaje es análogo, aunque el sensor que registra la interferencia de los frentes de onda objeto y de referencia es un CCD, en vez de ser una placa holográfica. Realizamos en primer lugar el registro del objeto en la situación indeformada. Este registro realizado por el CCD queda almacenado como un fichero que representa una imagen digital. Este será el holograma digital de la situación indeformada. A continuación procedemos a aplicar las cargas sobre el objeto. El objeto responde a la acción de las cargas deformándose. Suponemos que el objeto permanece en la situación deformada de forma estacionaria. Ahora, realizamos el segundo holograma, esta vez, sobre la nueva situación. Registramos sobre el CCD la interferencia de la misma onda de referencia con el nuevo frente de onda objeto de la situación deformada. Con esto finalizamos el proceso de registro de los hologramas. Para finalizar el experimento de interferometría no tendremos que volver más al laboratorio. Lo que queda por hacer es la reconstrucción de los campos luminosos registrados, y esto lo haremos de forma virtual con la ayuda de una computadora.

Tenemos los dos hologramas digitales registrados, uno por cada estado de deformación. Ahora procederemos a la reconstrucción de los campos luminosos almacenados en los hologramas digitales. En primer lugar procedemos a la reconstrucción del holograma correspondiente a la situación inicial, la situación indeformada. Esta reconstrucción virtual la hacemos simulando la iluminación de la transmitancia con la misma onda referencia con la que se hizo el registro holográfico. Con esta reconstrucción obtenemos el campo luminoso, tanto en fase como en amplitud, en el plano de observación. A continuación, procedemos a la reconstrucción virtual del holograma digital, correspondiente a la situación deformada. Del mismo modo, que en el caso anterior, esta reconstrucción virtual debe hacerse simulando la incidencia sobre la transmitancia de la misma onda de referencia que se empleó en el proceso de registro. Nótese que, aunque no es una práctica recomendable, podemos realizar cada registro holográfico con una onda de referencia distinta. Posteriormente, tendremos que reconstruir cada holograma con su onda de referencia correspondiente. Esto es posible, ya que, como hemos visto, cada campo luminoso se reconstruye por separado. En la interferometría holográfica física de doble exposición estábamos obligados a emplear la misma onda de referencia para los dos registros holográficos, ya que la reconstrucción de los campos luminosos se realizaba simultáneamente.

Tras estas operaciones, ya tenemos los dos campos reconstruidos de forma virtual. Llegado a este punto, si quisiésemos seguir reproduciendo el proceso físico de interferometría, deberíamos proceder a la superposición de los dos campos luminosos reconstruidos virtualmente en el plano de observación. Sin embargo, no calcularemos dicha superposición. Recordemos que el objetivo último de la interferometría holográfica es determinar la distribución de diferencia de fase para poder calcular los parámetros físicos bajo estudio. Por eso, calcular la superposición de los campos reconstruidos virtualmente es un paso atrás en la búsqueda de este objetivo. Si calculamos la superposición de los campos reconstruidos virtualmente obtendremos, al igual que en la interferometría holográfica física, el campo resultante, es decir, una distribución de amplitudes de la que obtenemos un interferograma. Del mismo modo que en la interferometría holográfica física, estamos obligados a procesar el

interferograma para poder determinar la distribución de interferencia de fase. Esto, aunque es una opción posible, carece de sentido en holografía digital. Si hacemos esto, desperdiciamos la mayor ventaja de la óptica digital, que es la de proporcionar la fase de los campos luminosos reconstruidos. Como hemos dicho, conocemos la fase y la amplitud de cada uno de los campos reconstruidos virtualmente. Con la interferometría holográfica física sólo conocíamos la amplitud del campo luminoso resultante de la superposición de los campos reconstruidos.

Por tanto, para la obtención de la distribución de interferencia de fase, no calcularemos la superposición de los dos campos luminosos reconstruidos. Lo que haremos será calcular la fase de cada campo luminoso por separado, y luego los compararemos para obtener la distribución de interferencia de fase. La forma en la que haremos esta comparación se explicará mas adelante. Como adelanto diremos, que es un cálculo inmediato, sin necesidad de realizar ninguna operación de procesado, y de gran precisión, ya que proporciona la interferencia de fase para cada uno de los píxeles correspondientes con el objeto.

Empleando la técnica de interferometría holográfica digital de doble exposición obtenemos multitud de ventajas con respecto a la física. La ventaja mas importante es la rapidez y precisión de la distribución de interferencia de fase que obtenemos. Pese a que un holograma digital tiene hoy en día menor resolución que un holograma físico, la distribución de interferencia de fase que obtenemos es de una mayor resolución cuando empleamos técnicas de interferometría holográfica digital. Esto es debido a que, lo que importa realmente, es la resolución de la distribución de interferencia de fase que se calcula, y la interferometría holográfica digital la calcula para cada uno de los píxeles del registro.

Otra ventaja, es la posibilidad de repetir el proceso de reconstrucción cuantas veces se quiera, allí donde haya una computadora, sin tener que efectuarlo en un laboratorio. En la holografía física cuando queríamos reconstruir el campo luminoso almacenado en un holograma teníamos que reemplazar el holograma revelado

exactamente en la misma posición en la que se hizo el registro, para que así la onda de referencia incidiera en la misma forma que antes. Esto suponía que el montaje holográfico debía permanecer instalado permanentemente. Con la interferometría holográfica digital, una vez realizado el proceso de registro, ya podemos desinstalar el montaje empleado, ya que no tendremos que volver al laboratorio para finalizar el experimento.

Otras ventajas las encontramos en el proceso de registro, como la eliminación del proceso de revelado, el bajo tiempo de exposición necesario con empleando un láser convencional o la posibilidad de repetir el proceso de registro cuantas veces se quiera en caso de error. Estas ventajas ya han sido comentadas anteriormente cuando explicamos la holografía digital.

3.3.2. Interferometría holográfica digital en tiempo real.

La interferometría holográfica de tiempo real tal y como estaba concebida en el modelo físico, no se puede llevar a cabo utilizando técnicas de óptica digital. La razón de que esta técnica no se pueda emplear mediante técnicas de interferometría holográfica digital es la imposibilidad de producir interferencia entre un campo luminoso físico y uno virtual.

En la interferometría holográfica física en tiempo real producíamos un interferograma a partir de la interferencia entre el campo reconstruido físicamente del objeto en la situación inicial y el campo luminoso proveniente directamente del objeto en la nueva situación deformada. Entonces, sólo teníamos un holograma registrado. Por eso, solo uno de los campos luminosos es reconstruido, y el otro es emitido por el objeto en tiempo real. De esta forma obteníamos interferogramas en tiempo real como

resultado de la interferencia entre el estado de deformación del objeto en cada instante y la situación inicial indeformada que emite el holograma. Con esta técnica podíamos visualizar los cambios en los parámetros físicos en tiempo real, apareciendo el objeto surcado por distintas franjas de interferencia según el estado de deformación.

No es posible producir interferencia entre un frente de onda virtual y uno real. Si de alguna manera, reproducimos físicamente la imagen del holograma digital, podemos realizar un montaje para iluminar el holograma y así si podemos hacer que interfiera con el frente de onda físico proveniente del objeto. Pero esto ya no sería interferometría digital, sería física. Y además, como dijimos anteriormente, los interferogramas que obtendríamos serían de muy baja calidad. Si, por el contrario, pretendemos simular virtualmente esta técnica, nos encontramos con el impedimento de que el frente de onda emitido por el objeto deformándose en cada instante no se puede modelar virtualmente, por lo que no podemos simular la interferencia con el frente de onda reconstruido virtualmente a partir del holograma digital.

Hemos visto la imposibilidad de simular de forma virtual la técnica de interferometría holográfica en tiempo real, tal y como la teníamos concebida en un principio. Sin embargo, si realizamos algunas modificaciones a la concepción del experimento, si podemos obtener la información que proporcionaba esta técnica, e incluso más.

Anteriormente vimos que la técnica de interferometría holográfica de doble exposición se podía simular virtualmente de forma óptima. En esta técnica, comparábamos dos estados del sólido estacionarios, uno deformado y el otro indeformado. La técnica de interferometría holográfica en tiempo real se empleaba cuando la respuesta del objeto a la acción de las cargas no era estacionaria, sino que el estado de deformación del objeto cambiaba continuamente en el tiempo. Supongamos que el tiempo de exposición necesario para realizar un holograma en un CCD, con un láser dado, es T . El tiempo característico de los cambios de los parámetros físicos del objeto lo denominaremos por t_0 . Si estos cambios de los parámetros físicos son de tal

forma que su tiempo característico es mucho mayor que el tiempo de exposición necesario para realizar un registro del holograma $t_0 \gg T$, entonces estamos en disposición de realizar una película de la deformada del objeto, en el que cada fotograma es un holograma del objeto en el estado de deformación en ese instante.

El experimento, por tanto, es análogo al de doble exposición, solo que en esta ocasión, los estados de deformación del sólido no son estacionarios. El montaje es el mismo, y el proceso de registro también, sólo que en esta ocasión haremos mas de un registro holográfico. Elegiremos un láser de una potencia tal, que permita hacer los registros de los estados de deformación del objeto con la suficiente rapidez para que se cumpla la condición $t_0 \gg T$. No sólo se debe cumplir esta condición, también se debe cumplir que los registros de los hologramas se hagan consecutivos, es decir, que no haya tiempos de espera entre el final de un registro holográfico y el inicio del siguiente registro holográfico. Bajo estas condiciones, estamos en disposición de, a partir de los datos obtenidos, calcular la evolución en el tiempo de los parámetros físicos bajo estudio.

Tenemos como datos de partida el holograma del objeto en la situación inicial indeformada y la película de hologramas de la deformación del objeto. Ahora procedemos a la reconstrucción virtual de los campos luminosos almacenados. Cada campo luminoso reconstruido virtualmente a partir de cada holograma de la película de la deformada se compara con el campo luminoso reconstruido a partir del holograma en la situación inicial indeformada. Es como realizar el proceso de comparación de campos luminosos de la técnica de doble exposición para cada uno de los fotogramas. De la comparación de cada holograma de la secuencia con el holograma de la situación inicial indeformada, obtenemos una distribución de interferencia de fase (por cada comparación) de la que podemos calcular el campo de desplazamientos que sufre el objeto en el instante en el que se realizó el holograma de la secuencia. Por tanto, podemos calcular el campo de desplazamientos en cada instante. Estos campos de desplazamientos calculados nos muestran la evolución en el tiempo del sólido en respuesta a las sollicitaciones aplicadas. Por lo tanto, no solo obtenemos la forma de las

deformaciones del objeto (que podíamos visualizar con la técnica de interferometría holográfica física de tiempo real), sino que además, conocemos cuantitativamente la cuantía de estos desplazamientos en cada instante.

Vemos que la interferometría holográfica digital nos ofrece la posibilidad de evaluar cuantitativamente, la evolución en el tiempo de los desplazamientos de un sólido. Con la interferometría holográfica física en tiempo real solo podíamos conocer la forma de los desplazamientos, es decir, solo teníamos información cualitativa. La interferometría holográfica digital en tiempo real es una técnica que consume mucho tiempo de cálculo, ya que es necesario realizar tantas reconstrucciones virtuales como hologramas hayan sido registrados en la secuencia de la deformación. Sin embargo, ofrece la posibilidad de evaluar cuantitativamente los desplazamientos por lo que, si estamos interesados en la cuantía de estos desplazamientos, y no solo en la forma, merece la pena aplicar esta técnica.

Esta técnica es posible gracias a las ventajas de utilizar un CCD como medio de registro. Gracias a que un CCD necesita un tiempo de exposición muy reducido y a que no hace falta reemplazarlo por uno nuevo, para realizar un nuevo registro holográfico de forma consecutiva sobre el objeto, esta técnica de interferometría en tiempo real se puede realizar. Con las placas holográficas no podíamos aspirar a más que a una información cuantitativa.

3.3.3. Interferometría holográfica digital de tiempo promedio.

La interferometría holográfica digital aplicada a técnicas de interferometría de tiempo promedio se presenta como una técnica muy potente. En la técnica de interferometría holográfica de tiempo promedio, se realizaban dos registros holográficos. Uno sobre el objeto en la situación inicial indeformada, y el otro sobre el objeto en estado de vibración armónica. En el segundo registro, como el objeto se encontraba en movimiento, lo que se hacía era aumentar considerablemente el tiempo de exposición, y así, en el registro quedaba almacenada una especie de promedio de los estados de elongación del sólido, a partir de la cual se podía deducir la amplitud de la vibración de los puntos del sólido.

Con la interferometría holográfica digital haremos esencialmente lo mismo. Realizamos un registro sobre la situación indeformada. A continuación aplicamos las cargas de carácter ondulatorio. Esperamos a que el sólido adopte la situación de oscilación en régimen permanente, es decir, esperamos a que pasen los efectos transitorios. Bajo estas condiciones, el tiempo característico de los cambios en el sólido es $t_0 = 2\pi/\omega$. Ahora realizamos un segundo holograma con el CCD sobre el sólido vibrando, de tal forma que el tiempo de exposición T sea mucho mayor que el tiempo característico de los cambios en el objeto $T \gg t_0$.

Procedemos a la reconstrucción virtual de los dos hologramas registrados. Los comparamos para obtener la distribución de interferencia de fase. A partir de la distribución de interferencia de fase podemos determinar la amplitud de vibración de cada uno de los puntos del objeto.

Vemos que esta técnica guarda mucha similitud con la técnica de doble exposición. El proceso de registro sólo difiere en que, en doble exposición, los estados

del objeto a comparar están en reposo, mientras que en tiempo promedio el objeto se encuentra vibrando armónicamente. La reconstrucción virtual se hace del mismo modo. Una vez que se obtiene la distribución de interferencia de fase a partir de la comparación de los campos luminosos reconstruidos, las operaciones a realizar son distintas en estas técnicas. En tiempo promedio procesamos la distribución de interferencia de fase para obtener las amplitudes de vibración de los puntos del objeto.

Con la interferometría holográfica física de tiempo promedio nos teníamos que conformar con obtener las líneas de igual amplitud de vibración, pero nada acerca de la cuantía de estas amplitudes. Con la interferometría holográfica digital de tiempo promedio podemos calcular la cuantía de estas amplitudes.

La utilización de esta técnica sólo es posible para estados de vibración periódica, es decir, que como lo que almacenamos es una situación promedio, esta vibración tiene que seguir un orden periódico en el tiempo, ya que sino, durante el periodo de exposición se superpondrán estados del objeto que no guardan relación, y del holograma registrado no se podrá obtener información alguna.

No podemos olvidarnos de las posibilidades que nos ofrece la interferometría holográfica en tiempo real. Si la el tiempo característico de los cambios en el objeto t_0 no es demasiado pequeño, se puede cumplir la condición de $t_0 \gg T$, de tal forma que podamos aplicar esta técnica. En tal caso, no sólo podremos obtener la amplitud máxima de vibración de cada punto, sino que obtendremos la amplitud de cada punto P en cada instante, aplicando interferometría en tiempo real.

Por esto, solo en el caso de estar solo interesado en al amplitud máxima de vibración o en el caso de que el tiempo de los cambios característicos de los cambios en el objeto sea del mismo orden, o de orden inferior, que el tiempo mínimo de exposición, la aplicación de la interferometría holográfica de tiempo promedio está justificada.

3.3.4. Obtención de la fase en interferometría digital.

Hasta ahora no hemos detallado cómo vamos a determinar la distribución de interferencia de fase, solamente hemos indicado que la obtenemos a partir de la comparación de dos campos luminosos reconstruidos virtualmente. Ahora vamos a explicar como obtenemos esta distribución de interferencia de forma automática y sin ambigüedad en el signo.

Partimos de los dos campos luminosos reconstruidos virtualmente a partir de los hologramas digitales. De cada uno de estos campos conocemos tanto la fase como la amplitud. Esto es posible, como vimos anteriormente, gracias a que la reconstrucción es virtual, y así tenemos acceso a la fase de los campos luminosos. Esta distribución de fase, de cada campo reconstruido, se presenta bajo una forma aparentemente aleatoria, ya que esta distribución esta gobernada por la microestructura del sólido. Nosotros no estamos interesados en la fase de cada campo luminoso, sino en la diferencia que hay entre ambas, ya que ahí es donde está almacenada la información de la variación del camino óptico.

Para obtener la distribución de interferencia de fase podemos realizar dos tipos diferentes de cálculos. Del mismo modo que hacíamos en la interferometría holográfica física, podemos calcular la transmitancia resultante de colocar los dos hologramas unidos y calcular virtualmente la difracción de dicha transmitancia sobre el plano de reconstrucción a la distancia de reconstrucción. Este proceso, reproduce la reconstrucción conjunta de los dos hologramas superpuestos en interferometría física de doble exposición. Con el campo calculado en el plano de reconstrucción, podemos calcular la distribución de intensidades, y partir de esta distribución podemos procesarla para determinar al distribución de interferencia de fase. Esta forma de cálculo reproduce, paso por paso, el modelo de obtención de la fase de la interferometría física. Esta forma de calculo de la distribución de interferencia de fase es válida, pero desaprovecha las posibilidades que ofrece la óptica digital.

La mayor de las virtudes de la óptica digital es la posibilidad de calcular la fase de los campos reconstruidos. Basándonos en este cálculo, tenemos otra vía, mucho más efectiva que la expuesta anteriormente, para la determinación de la distribución de diferencia de fase.

Esta vía de cálculo consiste en reconstruir virtualmente cada holograma digital por separado. Obtenemos la fase de los dos campos luminosos reconstruidos, $\phi_1(n, m)$ y $\phi_2(n, m)$, para cada píxel (n, m) del plano de reconstrucción. La interferencia de fase, que corresponde con la diferencia de fase entre el campo luminoso del objeto antes y después de la deformación, se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Si } \phi_2(n, m) \geq \phi_1(n, m) \quad \Delta\phi(n, m) = \phi_2(n, m) - \phi_1(n, m) \quad [86]$$

$$\text{Si } \phi_2(n, m) < \phi_1(n, m) \quad \Delta\phi(n, m) = \phi_2(n, m) - \phi_1(n, m) + 2\pi \quad [87]$$

Pese a que la distribuciones de fase, $\phi_1(n, m)$ y $\phi_2(n, m)$, depende de la microestructura del sólido y tiene, por tanto, una distribución aleatoria, la diferencia de fase que calculamos con la operaciones anteriores, está gobernada por la variación de los parámetros físicos del objeto.

Esta forma de calculo de la fase proporciona la interferencia de fase en cada píxel de objeto, por lo que la resolución de la distribución de interferencia de fase es la misma que la resolución del CCD con el que se han hecho los registros holográficos. Así, pese a que los hologramas digitales tienen una resolución más baja que los físicos, la distribución de fase que calculamos en interferometría digital es de mayor resolución que en interferometría física.

Este cálculo se hace de forma automática empleando una computadora, de tal forma que la determinación de la distribución de fase se convierte un cálculo rápido y sencillo, en contraposición a la interferometría física, en donde el procesado del

interferograma suponía un gran escollo. Con la interferometría digital ni siquiera calculamos el interferograma.

En el diagrama siguiente (Figura 3.5.) podemos ver la dos vías de cálculo de la distribución de la interferencia de fase explicadas anteriormente.

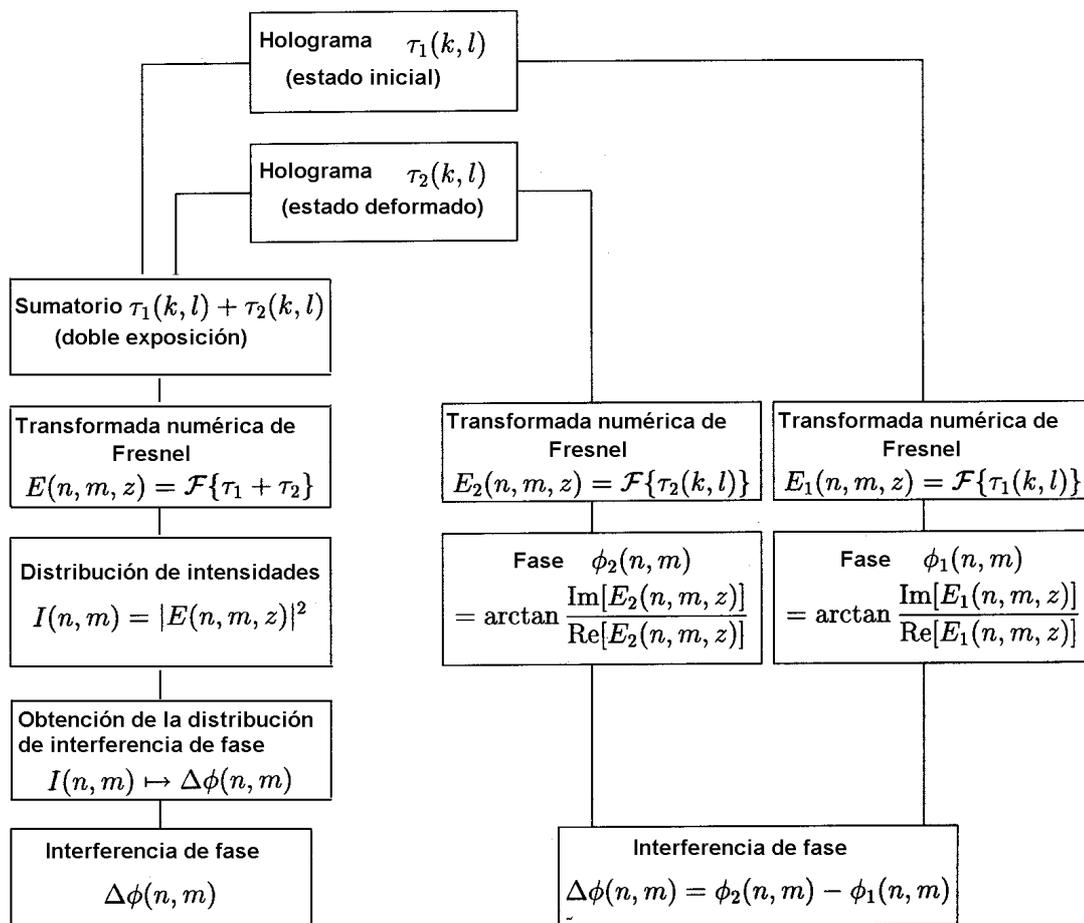


Figura 3.5 Esquema general de obtención de la distribución de interferencia de fase [4]

Los valores de la distribución de la interferencia de fase están comprendidos entre 0 y 2π . Estos valores los hemos obtenido de las operaciones de sustracción expuestas anteriormente. Al estar comprendidos entre estos valores tenemos que resolver el problema de la ambigüedad del signo cuando tratemos de calcular la distribución de fase relativa entre punto a punto del objeto.

Si visualizáramos la distribución de fase que tenemos calculada, asignando una escala de grises a estos valores comprendidos entre 0 y 2π , obtendríamos un interferograma análogo al que obteníamos en interferometría física. Por tanto, digamos que tenemos los mismos problemas para calcular la distribución de fase relativa sin ambigüedad en el signo que teníamos antes, con la salvedad de que ahora tenemos calculada la fase de cada píxel con total precisión, sin necesidad de procesar el interferograma en función de las intensidades.

Si, por ejemplo, nos fijamos solamente una fila de la matriz de píxeles en la que tenemos calculada la fase, mediante las operaciones anteriormente descritas, lo que obtenemos es una distribución que tiene la forma de la figura 3.6.:

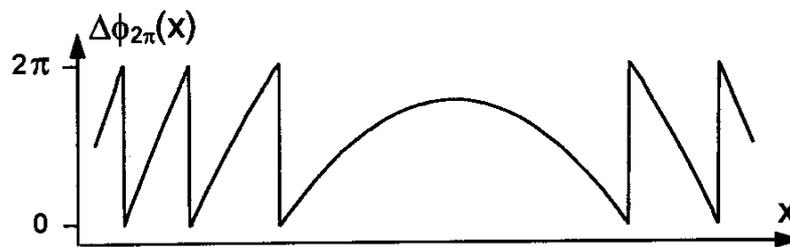


Figura 3. 6

Vemos que en esta distribución hay saltos entre valores de 2π y 0 . Estos saltos corresponden al paso a través de una franja del interferograma, es decir, que por cada salto hay un aumento en el orden de la franja de la interferencia (ver figura 3.7.).

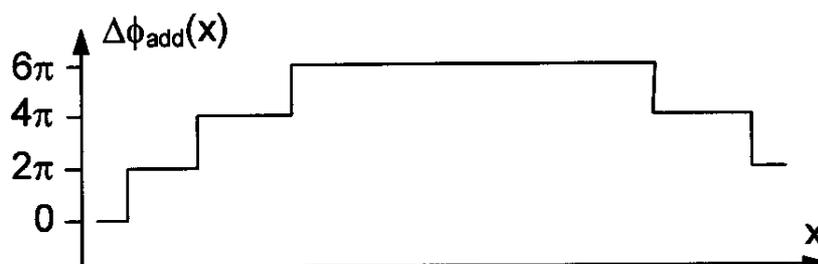


Figura 3. 7

Si eliminamos estos saltos, obtenemos una distribución continua de valores que se corresponde con la distribución de fase relativa que estamos buscando. Para eliminar estos saltos, y generar la distribución continua tenemos a nuestra disposición varios algoritmos que resuelven el problema eficientemente, obteniendo así la distribución de fase relativa sin ambigüedad en el signo en el pase entre franja y franja (ver figura 3.8.).

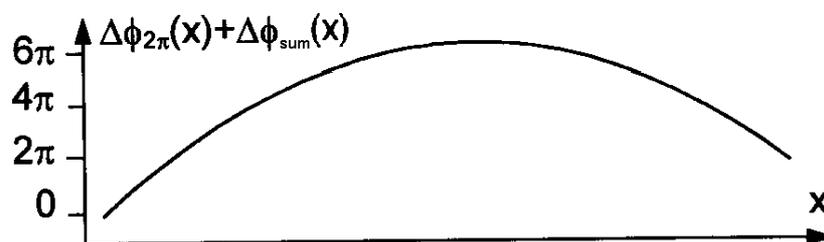


Figura 3. 8

Mediante estos algoritmos obtenemos la distribución de fase relativa entre punto y punto del objeto. Para obtener la distribución de fase absoluta necesitamos introducir un punto de referencia con desplazamiento conocido (desplazamiento o cualquier parámetro físico que queremos medir).

Con la aplicación de la óptica digital vemos que el cálculo de la fase en experimentos de interferometría se hace de forma automática empleando una computadora, dando como resultado una distribución de fase relativa entre puntos del sólido, sin ambigüedad en el signo y con una gran resolución (equivalente a la del CCD empleado en el experimento), con una precisión muy superior a los interferogramas físicos. Concluimos que la obtención de la fase usando óptica digital es más eficiente que empleando interferometría física y por esta razón, la interferometría digital ha desbancado a la interferometría física.