



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
ZACATECAS, MÉXICO.



UNIVERSITAT JAUME I
ESCUELA SUPERIOR DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS EXPERIMENTALES
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CASTELLÓN DE LA PLANA, ESPAÑA.

Determinación de distribuciones de fase mediante
luz estructurada y detección integrada

T E S I S
que para obtener el título de:
Doctor en Ciencias de la Ingeniería (UAZ)
y Doctor en Ciencias (UJI)

PRESENTA:
Humberto González Hernández

DIRECTORES
Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel (UAZ)
Dr. Lluís Martínez León (UJI)
Dr. Enrique A. Tajahuerce Romera (UJI)

Noviembre 2021

Determinación de distribuciones de fase mediante luz estructurada y detección integrada

Memoria presentada por Humberto González Hernández para optar por el grado de doctor en régimen de cotutela por la Universitat Jaume I y por la Universidad Autónoma de Zacatecas



**UNIVERSITAT
JAUME·I**

Programa de Doctorado en Ciencias
Escuela de Doctorado de la Universitat Jaume I



Programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica
Universidad Autónoma de Zacatecas

Doctorando:

Humberto González Hernández

Firma:

Directores:

Dra. Ma. Auxiliadora Araiza Esquivel

Firma:

Dr. Lluís Martínez León

Firma:

Dr. Enrique A. Tajahuerce Romera

Firma:

Financiación recibida

Agencias financiadoras del doctorando:

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, (CONACYT México), beca para doble titulación con número 573093, contribuyó a financiar gastos de formación.
- Consejo Zacatecano de Ciencia y Tecnología (COZCYT), en el Estado de Zacatecas, México, contribuyó a financiar gastos de transporte a la estancia de investigación en la Universitat Jaume I y a los congresos.
- Universidad Autónoma de Zacatecas, México, contribuyó a financiar parte de los gastos de transporte para realizar la estancia de investigación en la Universitat Jaume I.

Licencia CC Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (BY-NC-ND)



*Este trabajo es dedicado a la memoria de mi padre Félix
y a la de mi querido abuelo Agustín Hernández.*

Agradecimientos.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda y asistencia de mis maestros, asesores, compañeros, amigos y, sobre todo, mi familia. Mi gratitud hacia el programa de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (DOCII) de la Universidad Autónoma de Zacatecas y a la Escuela de Doctorado de la Universitat Jaume I (UJI) por brindarme la oportunidad de desarrollarme en el ámbito de la investigación científica. También agradecer a mis asesores Enrique, Lluís y Ma. Auxiliadora por su apoyo en el ámbito académico, administrativo así como material. Gracias por depositar su confianza en mí. Mi agradecimiento para ustedes.

A mis compañeros y amigos de la UJI que compartieron conmigo esta experiencia. Conversar con Fernando, Eva, Miguel, Ángel, Esther, Carlos, Omel, Merche, Gladys, Pedro, Vicente, Pere y Jesús siempre fue grato y me hicieron sentir como en casa. Los recuerdo con mucho cariño. También a Omar por compartir experiencias agradables durante mi estadía en Castellón. Un abrazo para ti *compa*. A Jesús Vega, uno de los primeros mexicanos que conocí en Castellón, y que siempre estaba disponible para unos carajillos. Especial mención para Araceli, conversar contigo y compartir tiempo juntos fue fantástico. Para ti un *saludo cordial*. A mis compañeras de piso en Castellón, Yessenia y Mariola. A mis amigos y compañeros de generación del DOCII, Gustavo y Aldonso.

A mi hermano José Antonio y su esposa Anabel por su apoyo, así como al señor Jesús Castañeda y su esposa Guadalupe Hernández. A mi hermana Yadira por su apoyo moral y material. A mi admirable madre Gaudencia.

A todos ustedes, gracias.

Resumen

La observación fue la primera herramienta del hombre para entender su entorno y comprender los fenómenos naturales que se presentaban a lo largo del tiempo. Algunas de las explicaciones a dichos fenómenos se pueden percibir en registros históricos, en forma de monumentos, escritura o pinturas. La curiosidad y el anhelo por dar una explicación a los fenómenos naturales más elementales conllevó también a desarrollar los medios y herramientas para facilitar su comprensión. Con el paso del tiempo y el gradual desarrollo del pensamiento deductivo, su objeto de estudio no solo se limitaba a su entorno cercano, sino también a su entorno más lejano, como son las planetas y las estrellas. Los primeros vestigios de tales estudios se reflejan en registros antiguos acerca del movimiento de la luna, el sol, la tierra y otros cuerpos celestes que permitían determinar el tiempo adecuado para sembrar y cosechar, así como para orientarse en desplazamientos y viajes. El refinamiento en sus observaciones provocaron la creación de los primeros calendarios y tablas que describen eclipses, fases lunares, cambios de estaciones, etc. Siglos más tarde, el telescopio revolucionó el estudio de los cuerpos celestes. Esto produjo el descubrimiento de los anillos de Saturno, las lunas de Júpiter, las millones de estrellas que componen la Vía Láctea, entre otros.

El interés por estudiar a los objetos enormes y distantes más allá del cielo, también generó el interés por observar y estudiar a los objetos diminutos. El microscopio cumplió con este cometido magnificando los microorganismos, células humanas y otros objetos minúsculos. Así, el mundo microscópico se hizo visible al ojo humano. Sin embargo, muy pronto los especialistas en este campo se dieron cuenta de los desafíos que debían resolver como, por ejemplo, mejorar la imagen, la calidad de las lentes, la capacidad del microscopio para aumentar la imagen, entre otros.

Un desafío en este campo es la obtención de imágenes de objetos delgados y transparentes, como puede ser una muestra biológica, un material, un gas, etc. Una imagen de esta clase de objetos carece de contraste, ya que la luz que incide sobre ellos interactúa muy débilmente. Así, con el fin de resolver este problema se desarrollaron una amplia gama de técnicas e instrumentos, y rápidamente condujo al desarrollo de dispositivos muy especializados con aplicaciones en medicina, biología, ciencia de materiales, entre otros campos. Aún así, la búsqueda de métodos más prácticos y simples continúa en desarrollo.

En esta tesis se desarrolla experimentalmente un arreglo óptico que reconstruye imágenes de objetos transparentes. El arreglo está basado en un interferómetro de Mach-Zehnder que tiene incorporado un modulador espacial de luz (SLM, spatial light modulator) basado en microespejos o DMD (digital micromirror device), y un detector de un solo píxel como dispositivo de detección. El sistema óptico reconstruye imágenes de fase y de amplitud de objetos transparentes y semitransparentes. El DMD permite la aplicación de la técnica holográfica de desplazamiento de fase (*phase-shifting*) sin la necesidad de utilizar láminas de retardo o actuadores piezoeléctricos. Por otro lado, los detectores de un solo píxel se pueden emplear en rangos espectrales fuera del visible o cuando existe un medio difusor situado enfrente del detector. Como resultado, el sistema óptico propuesto reconstruye imágenes a través de un medio difusor, una clara ventaja sobre detectores basados en arreglos matriciales de píxeles (CCD o CMOS). Para optimizar el

sistema se empleó un detector balanceado, permitiendo que el tiempo de muestreo, la cantidad de datos adquiridos y el número de hologramas utilizados se redujeran en un 50 % en comparación con un detector monopixel. Además, el sistema es adaptativo, ya que es posible compensar las distorsiones producidas por los dispositivos empleados.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema y justificación	9
1.3. Objetivo	10
2. Holografía	12
2.1. Holografía analógica	12
2.2. Holografía Digital (HD)	15
2.2.1. HD de desplazamiento de fase	16
2.3. Generación de CGH	18
2.3.1. Hogramas tipo Lee	19
2.3.2. Hogramas basados en superpíxeles	22
2.3.3. Algoritmo de Gerchberg-Saxton	25
2.4. Resultados simulados con CGH	26
2.4.1. Método de Lee	27
2.4.2. Método de Mosk	28
2.5. Implementación experimental	30
2.5.1. Método de Lee	30
2.5.2. Método de Mosk	31

2.6. Desplazamiento de fase con hologramas de Lee	33
3. Imágenes con un solo píxel y muestreo compresivo	34
3.1. Introducción	34
3.2. Patrones Walsh-Hadamard	36
3.3. Dispositivos digitales de microespejos	40
3.4. Técnica SPI con funciones de WH	41
3.5. Holografía con un detector de un solo píxel	45
3.6. Muestreo Compresivo	47
4. Registro de fase con SPI	50
4.1. Sistema óptico	51
4.1.1. Patrones Walsh-Hadamard-Lee	52
4.1.2. Muestreo con WHL y PS	53
4.2. Resultados	57
4.2.1. Caracterización de aberraciones	57
4.2.2. Recuperación de la fase con un detector de un solo píxel	65
5. Método SPI-WHL-PS con un detector balanceado	74
5.1. Sistema holográfico experimental	77
5.2. Resultados	79
6. Conclusiones	84
6.1. Conclusiones	84
6.2. Perspectivas futuras	86
Bibliografía	88

A. Artículo y resúmenes de congresos

100

Índice de figuras

1.1.	Esquema de dos celdas de un SLM del tipo TNLC cuando no existe un campo eléctrico aplicado (izquierda) y cuando sí existe (derecha).	5
1.2.	Esquema de un píxel de un DMD. Un solo microespejo tiene por debajo una serie de capas que permiten su manipulación electromecánica. Esquema extraído de la Ref. [47].	6
2.1.	Arreglo óptico para el registro de objetos 3D en holografía analógica.	13
2.2.	Reconstrucción de la imagen del objeto iluminando el holograma.	15
2.3.	Esquema básico de un arreglo óptico en holografía digital.	16
2.4.	Arreglo óptico de un interferómetro que utiliza un actuador piezoeléctrico que permite cambiar la fase del haz de referencia.	17
2.5.	CGH con valores continuos (a) y su versión binarizada (b). En un recuadro se muestra una ampliación de la esquina superior derecha en ambos casos.	20
2.6.	Patrón de Walsh-Hadamard.	20
2.7.	Holograma \mathbb{H} generado por computadora que contiene la Figura 2.6, en su versión continua (a) y binarizada (b).	21
2.8.	Ejemplo de método del superpixel. Se consideran arreglos cuadrados de 4×4 píxeles (superpixel) del DMD. Esquema extraído de Ref. [60].	22
2.9.	Ejemplo de los valores de fase representados en el plano complejo para el superpixel representado en la Figura 2.8. Esquema extraído de Ref. [60].	23
2.10.	Combinaciones posibles de la amplitud compleja generada mediante un superpixel de 3×3 (a) y 4×4 (b) píxeles. Esquema extraído de Ref. [60].	23

2.11. Imágenes empleadas como información de amplitud (a) y fase (b) para codificar un CGH con el método de superpixel.	24
2.12. Holograma generado con el método del superpixel.	24
2.13. Diagrama del algoritmo de Gerchberg-Saxton.	26
2.14. Órdenes de difracción de la transformada de Fourier del CGH.	27
2.15. Amplitud (a) y fase (b) recuperada con la simulación numérica del método de Lee.	28
2.16. Transformada de Fourier del holograma generado con el método del superpixel. Órdenes de difracción (a). De manera numérica se elige el orden de difracción de interés (b).	29
2.17. Amplitud (a) y fase (b) recuperada del holograma en la Figura 2.12	30
2.18. Sistema óptico para recuperar la información de fase codificada en un holograma generado con el método de Lee.	31
2.19. Esquema óptico empleado para reconstruir la amplitud y la fase de un holograma generado con el método del superpixel.	32
2.20. La apertura es colocada tal que la fase de los 16 pixeles del DMD de un superpixel de 4×4 sean uniformemente distribuidos entre 0 y 2π	32
2.21. Hologramas tipo Lee calculados numéricamente con una diferencia de $\pi/2$ entre ellos, para posteriormente aplicar la técnica de desplazamiento de fase.	33
3.1. Esquema simplificado de registro de una imagen 2D con una matriz de pixeles.	35
3.2. Esquema del sistema óptico empleado para registrar imágenes de un objeto 2D con luz estructurada y un detector de un solo píxel.	36
3.3. El muestro de un objeto con patrones luminosos se puede considerar como la proyección, o producto escalar, del objeto sobre las funciones de la base.	37
3.4. Representación de la matriz de Hadamard $\mathbf{H}(2^4)$ (a) y el conjunto de patrones WH 2D construidos a partir de dicha matriz (b). Por cada fila de la matriz $\mathbf{H}(2^4)$ se construye un patrón WH.	39
3.5. Patrones de Walsh-Hadamard que se utilizan para obtener una imagen con una resolución de 8×8 píxels.	40
3.6. Esquema de un modulador DMD. Estos dispositivos constan de un arreglo bidimensional de pequeños microespejos (a), que pueden adoptar dos orientaciones distintas, ON u OFF (b).	41

3.7.	(a) Esquema de la técnica SPI considerando luz incoherente. Se proyecta un conjunto de patrones de muestreo sobre un objeto. (b) Lecturas de fotocorriente registrados por el detector monopíxel por cada patrón.	42
3.8.	Arreglo óptico con luz coherente que permite la recuperación de la fase de un objeto con la técnica de SPI.	46
4.1.	Arreglo óptico implementado para determinar distribuciones de fase de un objeto con un detector de un solo píxel.	51
4.2.	(a) Imagen de uno de los patrones WH utilizado en el proceso de registro de la imagen. El color blanco indica un valor +1 y el negro -1. (b) Holograma desplegado en el DMD para codificar el patrón de fase mostrado en (a).	53
4.3.	(a) Imagen de uno de los patrones WH utilizado en el proceso de muestreo. Hologramas con desplazamientos de fase de 0 (b), $\pi/2$ (c), π (d) y $3\pi/2$ (e). Para permitir una mejor visualización de las franjas en los hologramas, se ha realizado una ampliación.	54
4.4.	Sistema $4f$ implementado para reconstruir la información de fase codificada en cada holograma.	55
4.5.	Fotodiodo PDA36A-EC empleado en el dispositivo interferométrico como detector de un solo píxel.	56
4.6.	(a) Ejemplo de lectura de intensidad en función del tiempo proporcionada por el sistema de detección. Cada lóbulo corresponde a un holograma de muestreo desplegado en el DMD. (b) Se eligen 25 puntos centrales para promediar su valor y procesar la información.	57
4.7.	Esquema del sistema de calibración del dispositivo holográfico. La distribución de intensidad I_0 (flecha 1) sobre la cámara es producida por el despliegue del patrón de franjas que codifica una fase 0; la distribución de intensidad $I_{\pi/2}$ (flecha 2) es producido por el patrón de franjas que codifica la fase $\pi/2$; y así sucesivamente.	58
4.8.	Distribuciones de intensidades sobre el sensor CCD producidas por los patrones de franjas que codifican los valores de fase de 0, $\pi/2$, π y $3\pi/2$ en el plano del objeto.	59
4.9.	Fase de las aberraciones medidas experimentalmente con el sistema óptico esquematizado en la Figura 4.7.	60
4.10.	Patrón de franjas corregido con la información de fase de las aberraciones del sistema óptico. Al codificarlo en el DMD, genera una fase uniforme en el plano del objeto.	61
4.11.	(a) Holograma que codifica un patrón WH en fase sin compensación de aberraciones y (b) la imagen registrada en la cámara. (c) El mismo holograma con la compensación y (d) la imagen capturada por la cámara.	62

4.12. Resina.	63
4.13. La resina se sitúa en el plano imagen.	64
4.14. Distribución de fase medida con el sistema holográfico de la Figura 4.13.	64
4.15. Esquema del método holográfico de adquisición de imágenes complejas SPI-WHL-PS. Las figuras a la izquierda muestran un ejemplo de los cuatro hologramas que son desplegados en el DMD, por cada uno de los patrones de muestreo WH ($N = 4096$). La gráfica a la derecha muestra la señal de fotocorriente para los patrones de muestreo generados por los cuatro hologramas. El holograma con valor de fase de 0, produce una intensidad I_0 (línea 1); otro holograma con valor de fase de $\pi/2$, produce una intensidad $I_{\pi/2}$ (línea 2); lo mismo ocurre para los hologramas de valor de fase π y $3\pi/2$ que producen las intensidades I_π (línea 3) y $I_{3\pi/2}$ (línea 4). Este procedimiento se repite para cada uno de los patrones de luz estructurada que muestrean el objeto.	66
4.16. Imagen de las distorsiones de fase inducidas por el sistema óptico medida experimentalmente con el sistema óptico de la Figura 4.15 en ausencia de objeto. Los niveles de gris indican fase de 0 (negro) a 2π (blanco).	67
4.17. Distribución de fase de la fotorresina mostrada en la Figura 4.12 obtenida experimentalmente con el sistema óptico de la Figura 4.15 empleando luz estructurada y el detector de un solo píxel.	68
4.18. Difusor holográfico empleado en el experimento de imagen holográfica a través de un medio turbio. No es posible observar un objeto a través del difusor con métodos convencionales.	69
4.19. Esquema del método holográfico de adquisición de imágenes complejas con luz estructurada y detección de un solo píxel con un difusor enfrente del del fotodiodo.	70
4.20. Distribución de fase de la fotorresina mostrada en la Figura 4.12 obtenida experimentalmente con el sistema óptico de la Figura 4.19, que incluye un difusor enfrente del fotodiodo.	71
4.21. Ala de libélula empleada como objeto en el experimento de imagen holográfica.	72
4.22. Imágenes de la amplitud y fase de un ala de libélula obtenidas con métodos holográficos. En (a) y (d) se muestra la amplitud y la fase, respectivamente, registrados con un sistema holográfico convencional con un sensor CCD. En (b) y (e) se muestra la distribución de amplitud y la fase, respectivamente, usando el sistema holográfico con luz estructurada y detección mediante un simple un fotodiodo. En (c) y (f) se muestra la distribución de amplitud y la fase, respectivamente, usando el sistema óptico holográfico con luz estructurada y un fotodiodo con un difusor entre el objeto y el detector.	72

5.1.	(a) Esquema del sistema de holografía digital con detección de un solo píxel en el que se realizan medidas en los dos haces complementarios a la salida del último divisor de haz. (b) Imágenes de los interferogramas obtenidos a la salida del sistema con una cámara digital. Se aprecia que ambos patrones están generados por la interferencia entre haces de luz que tienen una diferencia de fase complementaria de π radianes, esto es, las franjas claras del patrón de interferencia de la izquierda son oscuras en el patrón de interferencia de la derecha.	76
5.2.	Esquema del detector balanceado. Registra la diferencia de intensidad de la luz (canal RF) que incide en cada uno de los fotodiodos. Los canales positivo “+” y negativo “-” permiten monitorear los niveles de intensidad de manera individual.	77
5.3.	Esquema del sistema de holografía digital con luz estructurada y detección de un solo píxel con detección balanceada.	78
5.4.	(a) Imagen de un patrón WH. Hologramas generados en el DMD para producir el patrón de fase de la figura (a) con desplazamientos de fase de 0 (b) y $\pi/2$ (c). Para lograr una mejor visualización de las franjas en los hologramas, se muestra una sección ampliada de la región central del holograma.	79
5.5.	Distribución de fase de las distorsiones del frente de onda producidas por el sistema óptico de la Figura 5.3 en ausencia de objeto empleando un detector balanceado.	80
5.6.	Distribución de fase de la fotorresina mostrada en la Figura 4.12 obtenida experimentalmente con el sistema óptico de la Figura 5.3 empleando luz estructurada y el detector balanceado.	81
5.7.	Amplitud (a) y fase (b) de un segmento del ala de libélula mostrada en la Figura 4.21, empleando el sistema óptico holográfico con luz estructurada y detector balanceado.	81
5.8.	Esquema del sistema holográfico digital con luz estructurada y detección de un solo píxel con un material difusor antes del detector balanceado.	82
5.9.	Amplitud (a) y fase (b) de un segmento del ala de libélula mostrada en la Figura 4.21, empleando el sistema óptico holográfico con luz estructurada y un material difusor situado antes del detector balanceado.	83

Lista de acrónimos

(En orden alfabético)

CCD	Charge-coupled device
CGH	Computer generated hologram
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
CS	Compressive sensing
DAQ	Data acquisition
DH	Divisor de haz
DMD	Digital micromirror device
E	Espejo
GI	Ghost imaging
HD	Holografía digital
L	Láser
LC	Lente colimadora
LCOS	Liquid crystal on silicon
OM	Objetivo de microscopio
PI	Polarimetric imaging

PS	Phase shifting
PS-DH	Phase-shifting digital holography
SLM	Spatial light modulators
SPI	Single pixel imaging
SPI-WHL-PS	Single pixel image walsh-hadamard-lee phase shifting
WH	Walsh-hadamard
WHL	Walsh-hadamard-lee

Nomenclatura

(En orden alfabético)

1D, 2D, 3D	Un, dos y tres dimensiones, respectivamente
α	Coefficiente del patrón WH
α^+	Coefficiente del patrón WH ⁺
α^-	Coefficiente del patrón WH ⁻
α_0	Frecuencia portadora
α_i	Coefficiente del i -ésimo patrón de muestreo
δ	Desplazamiento de fase
θ_{ab}	Fase de las aberraciones
θ_{ab}^*	Conjugado de θ_{ab}
$\mu(\Phi, \Psi)$	Coherencia entre Φ y Ψ
ϕ_O	Fase del haz objeto
ϕ_R	Fase del haz de referencia
ψ_i	Conjunto de funciones base
Φ	Matriz de funciones base de muestreo

Ψ	Matriz de funciones base ψ_i
C_i	Coefficiente complejo del i -ésimo patrón
E_O	Amplitud compleja del haz objeto
E_R	Amplitud compleja del haz de referencia
$\mathbb{H}(x, y)$	Holograma de Lee
H_N	Matriz de Hadamard de orden N
$\mathbf{H}(2^k)$	Matriz de Hadamard de orden 2^k
H_N^T	Transpuesta de la matriz de Hadamard de orden N
I_N	Matriz identidad de orden N
I_i	Intensidad del i -ésimo patrón
$I(x, y)$	Distribución de intensidad
$I_0, I_{\pi/2}, I_{\pi}, I_{3\pi/2}$	Distribuciones de intensidad con fase $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, respectivamente
$I_{i,0}, I_{i,\pi/2}, I_{i,\pi}, I_{i,3\pi/2}$	Intensidad del i -ésimo patrón con fase $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$, respectivamente
M	Número de medidas
M_a	Número de máscaras
O	Objeto muestreado
R_{SLM}	Velocidad de proyección de patrones en un SLM
T_a	Tiempo de adquisición

WH^+	Patrón WH con 1's y 0's
WH^-	Patrón complementario de WH^+
WH_i	i -ésimo patrón WH
\mathbf{x}	Vector columna asociado al objeto
\mathbf{y}	Vector columna de medidas
a_O	Amplitud del haz objeto
a_R	Amplitud del haz de referencia
$h(x,y)$	Holograma binario
f_1, f_2	Longitudes focales de la primera y segunda lente
j	Unidad imaginaria $\sqrt{-1}$
p_i	i -ésimo patrón
t_{int}	Tiempo de integración del fotodetector
$\ \cdot\ _{l_1}$	Norma l_1

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

Diseñar configuraciones ópticas simples, de bajo costo y que no altere la integridad del objeto que se está analizando es de gran utilidad en el campo de la medicina, biología, ciencia de los materiales, etc. Así, las investigaciones en el área de las técnicas de imagen óptica se han orientado hacia las mejoras en la calidad de la imagen, desarrollo de sistemas ópticos mas simples, diseño de algoritmos con menor tiempo de procesamiento, adquisición de los datos con mayor velocidad y diseño de procedimientos ópticos con la menor pérdida de información relevante, entre otros.

Imagen de fase

Un proceso no invasivo para conocer la fase es vital en áreas de investigación como la medicina o biología para el estudio de tejidos biológicos o células vivas. Tradicionalmente se emplean indicadores químicos y fluoróforos para producir contraste, y hasta el día de hoy las biopsias teñidas siguen siendo un procedimiento estándar en patología. Añadir productos químicos externos a las células vivas puede afectar su función y limita el intervalo de imágenes continuas a solo unos pocos minutos [1]. Una alternativa es explotar las propiedades físicas de la luz, particularmente la fase.

El registro de la fase nos brinda información acerca de la estructura o morfología de la muestra bajo estudio. Existen varias técnicas para obtener, no solo la fase, sino también la amplitud de un frente de onda. Podemos clasificarlos en métodos interferométricos y no interferométricos. Los interferométricos se describen en el siguiente apartado bajo el epígrafe de holografía digital. Entre los métodos no interferométricos destacan los sensores de frente de onda (*wavefront sensor*) [2]. Esta clase de sensores son capaces de medir los gradientes de fase de un frente de onda generado por un objeto sin la necesidad de un haz de referencia. Un ejemplo de esta clase dispositivos es el sensor Shack-Hartmann, que no requiere el empleo de luz totalmente coherente [3]. Otra forma de obtener la amplitud y fase es iluminar a la escena u objeto con luz coherente y registrar la luz transmitida o reflejada por la escena, en un determinado plano. A partir de esta distribución de amplitud compleja puede reconstruirse la distribución de intensidades en cualquier otro plano de la escena mediante técnicas numéricas de simulación de propagación de la luz. Para ello existen diversos métodos. Un ejemplo es la técnica de obtención de imágenes mediante difracción coherente (*coherent diffraction imaging*) [4]. Es una técnica que no usa lentes, y consiste en proyectar iluminación coherente sobre la muestra y registrar el patrón de intensidades de la luz difractada a cierta distancia con un sensor. Luego, la fase del patrón de difracción es recuperada de manera numérica, generalmente empleando algoritmos iterativos. La técnica de ptycografía (*ptychography*) [5] es otra opción para la reconstrucción de imágenes de amplitud y fase. En esta técnica se iluminan distintas zonas del objeto secuencialmente y se registra la intensidad del haz difractado en un plano con un sensor CCD. A partir de esta información se calcula la amplitud y fase del objeto por medio de cálculos numéricos.

Holografía digital (HD)

Uno de los métodos más efectivos para registrar distribuciones de amplitud y fase es la holografía. Esta técnica aprovecha la naturaleza ondulatoria de la luz y el fenómeno de interferencias para la recuperación de la amplitud y fase. También, es capaz de proveer información de la morfología, índice de refracción, espesor, entre otros, del objeto que está bajo estudio. Las bases teóricas de la holografía fueron introducidas por primera vez por Dennis Gabor en 1948 [6–8]. Esta técnica registra las franjas de interferencia, o interferograma, que son producidas por la superposición de un haz de luz que atraviesa la muestra y un haz plano o de fase constante coherente con el anterior. Por lo general, estos interferogramas se registran en una superficie plana (holograma), pero la información que contiene permite reconstruir la amplitud en todo el

campo tridimensional de luz difractada por el objeto. La onda objeto se reconstruye iluminando el holograma con el haz de referencia. De este modo, observador es capaz de reconocer una imagen tridimensional con todos los efectos de perspectiva y de profundidad, una característica que las imágenes de solo amplitud no poseen [9, 10]. A lo largo de los últimos años la holografía ha tenido un enorme avance, de tal modo que en la actualidad esta presente en aplicaciones que abarcan desde el entretenimiento hasta la codificación y almacenamiento seguro de datos. En esta tesis se utilizan técnicas holográficas para obtener imágenes de amplitud y fase de objetos mediante detectores de un solo píxel.

La HD ha sido aplicada en microscopía [11, 12], compensación de aberraciones [13], imágenes a través de medios turbios [14], imágenes de polarización [15], e imágenes biomédicas [16, 17], entre otras. Algunas investigaciones en HD utilizan la técnica de desplazamiento de fase, también conocida como phase shifting (PS), la cual registra varios interferogramas (usualmente tres o cuatro) sobre el sensor de la cámara. Cada uno de estos interferogramas tienen una fase global distinta y son procesados a través de un algoritmo para generar la amplitud compleja del objeto o muestra, y obtener la imagen de fase. En una de las posibilidades de implementación práctica, se utiliza una rejilla de difracción en el plano de Fourier para para generar multiples interferogramas al mismo tiempo, posibilitando la aplicacion de PS con un solo disparo [18]. Otras de las ideas para aplicar la técnica de desplazamiento de fase en un solo registro incluyen las técnicas polarimétricas [19] y el efecto Talbot [20].

Los hologramas pueden ser grabados sobre películas fotosensibles, como por ejemplo emulsiones fotográficas basadas en haluros de plata, gelatinas dicromadas, fotoresinas, fotopolímeros y fototermoplásticos, entre otros [21]. El desarrollo de la tecnología informática permitió el proceso de grabación y de reconstrucción en la computadora. Un gran paso fue la digitalización o registro del patrón de interferencia directamente en un dispositivo electrónico, como una cámara CCD o CMOS [22, 23]. Este método ahora permite la completa grabación y procesamiento digital de hologramas, sin ningún proceso de registro en película fotográfica. En consecuencia, el desarrollo de nuevos dispositivos opto-electrónicos y las mejoras en el procesamiento de información permitieron aplicar de forma más intensiva los métodos de la HD.

Un nuevo enfoque de la holografía se produce con el desarrollo de los hologramas generados por computadora (CGH, computer generated holograms). En este caso, ya no es necesario un dispositivo interferométrico para registrar los hologramas sino que estos se generan directamente en la computadora, y la etapa de reconstrucción puede ser llevada a cabo de manera simulada en una computadora o experimentalmente en el laboratorio. Estos procedimientos fueron desarrollados por Lohmann (1967) [24], Lee (1978) [25], Schreier (1984) [26] y Bryngdahl y Wyrowsky

(1990) [27].

Podemos considerar los CGHs como elementos ópticos difractivos programables que ofrecen la posibilidad de añadir un mayor control de los sistemas ópticos con una computadora, ya que con esta clase de hologramas se puede modular la amplitud y la fase de un frente de onda. De este modo, se pueden desplegar imágenes 3D dinámicas [28]. Los CGHs son ahora comunes en una amplia variedad de aplicaciones y son componentes vitales en algunos productos electrónicos de consumo [29]. Para su reconstrucción óptica, los CGHs pueden ser grabados sobre placas o películas fotosensibles. En cualquier caso, la principal característica de estos hologramas es la capacidad de reconstruir campos ópticos complejos arbitrarios.

Moduladores espaciales de luz

Otra alternativa en la reconstrucción óptica de CGH's es emplear moduladores espaciales de luz (SLM, spatial light modulator). Los SLM pueden modular la amplitud, la fase y la polarización de un frente de onda, tanto espacial como temporalmente [30].

Un tipo de SLM comúnmente usado son los SLM de pantallas de cristal líquido sobre silicio. La capacidad de estos SLM para modular la fase de la luz de debe a las propiedades de las moléculas de cristal líquido. Las moléculas tienen una estructura en forma de barra, tienen rigidez a lo largo del eje mayor y son fácilmente polarizables. La orientación de las moléculas puede controlarse mediante fuerzas magnéticas o eléctricas. Estas características convierten a las pantallas de cristal líquido en un material birrefringente, es decir, que posee dos índices de refracción, ordinario y extraordinario.

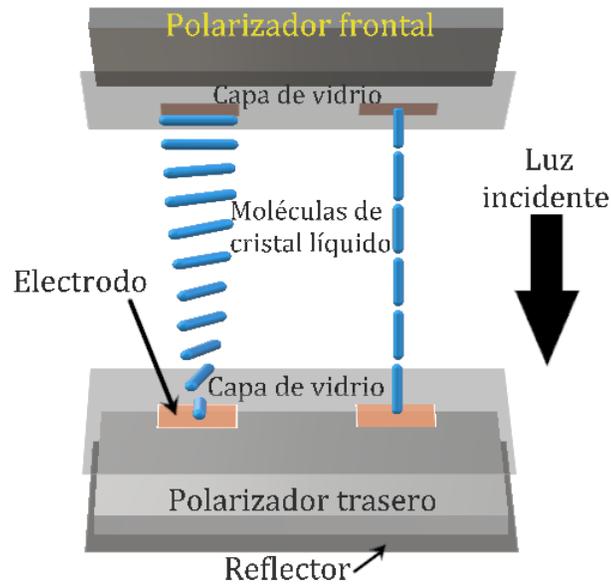


Figura 1.1: Esquema de dos celdas de un SLM del tipo TNLC cuando no existe un campo eléctrico aplicado (izquierda) y cuando sí existe (derecha).

Los moduladores son construidos de distintas maneras, esto resulta en diferentes tipos de pantallas. Los más comunes son los PNLC (parallel nematic liquid crystal), TNLC (twisted nematic liquid crystal) y los FCL (ferroelectric liquid crystal). Los moduladores tipo PNLC y TNLC poseen una velocidad de refresco por debajo de los 180 Hz, mientras que el modulador tipo FLC posee una alta reflectividad y una velocidad de refresco de alrededor de 1 kHz, funcionando como un modulador de amplitud o de fase. En la Figura 1.1 se muestran dos celdas de un modulador del tipo TNLC en dos situaciones distintas: el primero, cuando no existe un campo eléctrico aplicado sobre las moléculas de cristal líquido, estas toman una configuración en forma helicoidal (lado izquierdo); el segundo, cuando un campo eléctrico es aplicado perpendicularmente a las capas de vidrio, las moléculas se alinean en la misma dirección del campo aplicado (lado derecho). Este mecanismo permite controlar la birrefringencia del material mediante la aplicación de un campo eléctrico externo y, por tanto, controlar la fase de la luz que viaja a través de las moléculas de cristal líquido.

Estos SLM han sido empleados en aplicaciones como codificación de elementos ópticos difractivos para el procesamiento de señales y pinzas ópticas [31–34], microscopía óptica [35], holografía digital [36], formación de pulsos [37, 38], generación de patrones polarizados [39, 40], óptica adaptativa para enfocar radiación a través de un medio dispersivo [41–43], entre otras.

En la Ref. [44] se pueden hallar avances acerca de la tecnología desarrollada con ayuda de los SLM de cristal líquido y de sus aplicaciones. Cabe mencionar que, para usar un SLM de pantalla de cristal líquido para modular fase o amplitud, es necesario emplear polarizadores lineales, y en algunos casos láminas retardadoras. Esta situación conlleva una notable pérdida de eficiencia, especialmente cuando la fuente de iluminación no es naturalmente polarizada.

Además, aún cuando se puede modular el frente de onda de manera directa con SLM de pantalla de cristal líquido, su velocidad de refresco está muy por debajo de otra clase de moduladores, como por ejemplo, los moduladores basados en microespejos [45].

Un modulador espacial de luz basado en microespejos o dispositivo digital de microespejos (DMD, digital micromirror device) es un SLM reflectivo. Son empleados en proyectores de video y también están presentes en otros productos electrónicos de consumo. Inventados en 1987 por Texas Instruments, pueden alcanzar velocidades de refresco de hasta 50 kHz [46–49]. Es un dispositivo con millones de microespejos que pueden girar adoptando dos posiciones distintas mediante un dispositivo microelectromecánico. Para ello, cada microespejo está situado sobre una tarjeta CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor). Debajo de cada microespejo se encuentran varias capas que proporcionan el movimiento mecánico y la manipulación de la señal eléctrica (ver Figura 1.2). La alta velocidad de estos dispositivos es una característica que los SLM basados en cristal líquido no poseen [47].

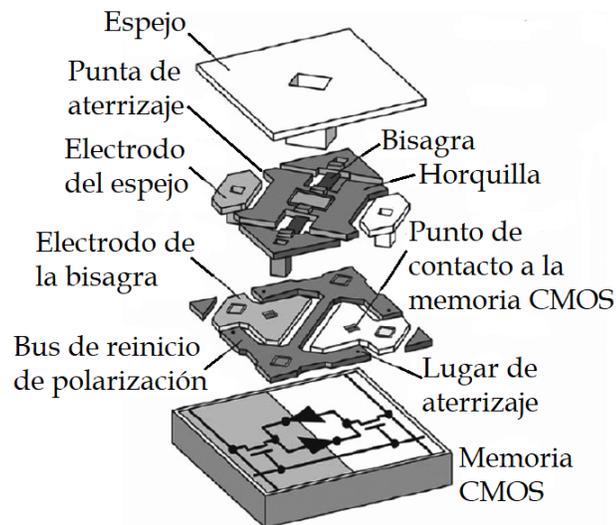


Figura 1.2: Esquema de un píxel de un DMD. Un solo microespejo tiene por debajo una serie de capas que permiten su manipulación electromecánica. Esquema extraído de la Ref. [47].

Aunque el DMD es un dispositivo binario de amplitud, se ha convertido en una opción práctica en la formación de frentes de ondas [50–57], para la medida cuantitativa de la fase de objetos transparentes [58], en la caracterización de materiales a través de medios turbios [59] y la modulación de amplitud y fase por medio de hologramas generados por computadora [60].

W. Zhou *et al.* [61] han reportado un arreglo óptico holográfico en línea sin lentes usando un DMD. Codificando hologramas generados por computadora se puede modular la fase de un haz de luz coherente con solo modular la intensidad con el DMD. También, S. A. Gordon *et al.* han propuesto un método que modula la fase y la amplitud de un haz de luz usando un DMD. Se configuran regiones cuadradas de microespejos los cuales son llamados superpíxeles. Cada superpíxel es capaz de modular de manera independientemente la amplitud y la fase [60]. Además, se ha investigado en técnicas de reconstrucción a color de hologramas usando un modulador espacial de luz basado en microespejos y una fuente de iluminación LED. La reconstrucción se lleva a cabo con ayuda de un sistema 4f [62, 63]. Por otro lado, se han creado algoritmos más rápidos para producir arreglos de pinzas ópticas empleados para atrapar partículas usando un DMD y hologramas generados por computadora. Estos hologramas son usados también para la corrección de las aberraciones ópticas inducidas por el sistema [64].

Los moduladores de amplitud reflectivos de alta velocidad, como lo es el DMD, han demostrado ser de gran utilidad en las técnicas de imagen con un solo píxel.

Técnicas de imagen con un solo píxel

Las técnicas de imagen con un solo píxel se basan en proyectar y superponer una serie de funciones de muestreo sobre una escena, y registrar por medio de un detector sin resolución espacial, las fluctuaciones de intensidad transmitida o reflejada por la escena. La imagen del objeto es calculada por medio de un algoritmo computacional que procesa las intensidades registradas por el detector. Una manera de implementar dichos patrones de muestreo es desplegándolos en la pantalla del DMD [65].

Las técnicas de imagen basadas en luz estructurada y detección con un solo píxel han tenido un amplio desarrollo en los últimos años debido a sus numerosas ventajas [65, 66]. Por ejemplo, pueden ser de gran utilidad en aplicaciones en las que el nivel de iluminación es muy débil. Así, se ha demostrado que la técnica es capaz de formar imágenes mediante el muestreo con proyecciones de luz incoherente sobre la escena de interés con una potencia del orden de picowatts [67].

Recientemente, se ha demostrado que la técnica permite la adquisición de imágenes a través de un medio difusor [68,69]. Además, la técnica es útil en rangos espectrales en donde los detectores tradicionales basados en arreglos matriciales 2D de píxeles se les dificulta trabajar [70,71].

En la Ref. [72] se ha reportado una cámara de imagen polarimétrica (PI, polarimetric imaging) empleando la técnica de imágenes con un solo píxel y muestreo compresivo. Con ello, se abre un amplio campo de posibles aplicaciones y se elimina la demanda de métodos sofisticados para optimizar el diseño de las actuales cámaras polarimétricas basadas en arreglos matriciales de píxeles.

La técnica de imágenes con un solo píxel ha sido aplicada en diferentes procedimientos de imagen óptica, incluyendo, la microscopía [73], imagen polarimétrica [74,75], imagen hiperespectral [76], imagen ultrasónica [77], imagen 3D [78], imagen de rayos X [79], entre otras.

Recientemente, L. Martínez-León *et al.* han reportado un sistema holográfico que recupera la imagen de fase de un objeto por medio de la técnica de imágenes con un solo píxel y la utilización de iluminación microestructurada en fase. Un objeto es muestreado por un conjunto de patrones microestructurados en fase implementados en un modulador espacial de luz de cristal líquido mientras un detector sin resolución espacial registra secuencialmente las fluctuaciones de irradiancia correspondiente a la interferencia entre el haz dispersado por un objeto y el haz de referencia. Luego, un algoritmo de reconstrucción recupera la información de fase desconocida a partir del conjunto completo de mediciones de fotocorriente [80].

Un técnica que posibilita la recuperación de información con menos mediciones es la técnica de muestreo compresivo o sensado compresivo (compressive sensing). El muestreo compresivo posibilita la reconstrucción de señales usando menos mediciones por cada señal reconstruida. Las mediciones comprimidas son particularmente útiles en la generación de imágenes multidimensionales a partir de información de menos dimensionalidad [81].

Clemente *et al.* han desarrollado algunas propuestas interesantes fusionando las técnicas de desplazamiento de fase, obtención imágenes con un solo píxel y muestreo compresivo [82]. El campo difractado por un objeto de entrada es muestreado por patrones de Walsh-Hadamard con un SLM de cristal líquido. Luego, se implementa una cámara de un solo píxel para realizar imágenes interferométricas de los patrones de difracción de la muestra con el uso de un interferómetro de Mach-Zehnder. La técnica de desplazamiento de fase junto con la aplicación de un algoritmo de propagación de luz permite que la amplitud compleja del objeto que está bajo escrutinio sea resuelta.

K. Ota *et al.* han reportado un sistema óptico holográfico en línea que reconstruye la amplitud compleja de un objeto empleando un detector de un solo píxel. La luz dispersada por el objeto

incide sobre un SLM de cristal líquido el cual despliega patrones de Hadamard codificados en fase y al mismo tiempo es utilizado para formar el haz de referencia con la luz residual de un área periférica de la pantalla del modulador, lo que provoca que el haz objeto y de referencia se desplacen en la misma dirección. Las fluctuaciones de intensidades debido a los patrones proyectados son registradas por un fotodiodo, y posteriormente procesadas para reconstruir la imagen compleja del objeto [86].

También, S. Shin *et al.* han reportado un arreglo óptico holográfico que reconstruye imágenes de fase y amplitud sin la necesidad de un haz de referencia. La luz difractada por un objeto incide sobre un modulador DMD el cual despliega múltiples patrones binarios. Una lente focalizadora dirige la luz hacia un detector de un solo píxel y registra las fotocorrientes debido a cada patrón [87].

Además, se ha empleado detección balanceada para la adquisición de imágenes computacionales. La técnica se aplica en combinación con iluminación complementaria simultánea en una cámara de un solo píxel. Este enfoque permite adquirir información incluso cuando incide sobre el detector luz parásita con una potencia mayor que la propia señal de interés. [88].

1.2. Planteamiento del problema y justificación

Instrumentalmente, la medición de la fase de un frente de onda actualmente se realiza con métodos y dispositivos muy sofisticados. Además, si consideramos que algunas aplicaciones están en la escala nanométrica, la medición de la fase se vuelve más compleja. En este sentido, áreas como la biología, metrología, biomedicina, óptica, etc. se ven inmersas en este escenario. Aún más, algunas técnicas de medición de fase son muy sensibles a cambios ambientales (por ejemplo, a las vibraciones mecánicas y fluctuaciones del aire), por lo que su medición se vuelve más complicada [83].

Por otro lado, los objetos de fase no absorben o dispersan la luz de manera significativa, por lo que registrar una imagen que brinde información de la estructura o morfología de tales objetos con sensores basados en matrices de píxeles, como por ejemplo los sensores CCD (charged coupled devices) o CMOS (complementary metal oxide semiconductor) puede ser complicado [1, 29]. Además, con el avance tecnológico de las últimas décadas, se requiere que estos dispositivos incrementen su velocidad de captura, aumenten la capacidad de memoria y proporcionen una resolución elevada, lo que conlleva que, en áreas específicas, la fabricación de

estos dispositivos sea difícil [21]. Así, es necesario desarrollar otras alternativas de detección más versátiles y que al mismo tiempo ofrezcan mayores ventajas que los dispositivos de detección comúnmente usados.

En el ámbito de procesamiento de imágenes, hay investigaciones actuales que combinan CS con otras técnicas de recuperación de imágenes como la holografía [81, 82], encriptación [84], y ghost imaging [84, 85], entre otras. Sin embargo, en la literatura científica actual no se ha reportado un método para la determinación de distribuciones de fase de un frente de onda dispersada por un objeto usando la técnica de imágenes con un solo píxel utilizando luz microestructurada generada por un DMD y detección integrada.

El sistema óptico propuesto en este trabajo utiliza un detector con un único píxel con el cual es posible obtener la distribución de fase de un objeto transparente o semitransparente. Tal detector es más simple que los sensores comúnmente usados en holografía, es decir, los sensores CCD o CMOS. Este tipo de detectores pueden ser empleados para determinar otras características distintas a la intensidad de la luz, como por ejemplo, la longitud de onda o la polarización. La técnica empleada permite modular fase empleando un modulador de amplitud binario de tipo DMD, sin la necesidad de emplear láminas de retardo o transductores piezoeléctricos, permitiendo que el sistema sea más sencillo. También, es posible obtener imágenes de fase con poca distorsión, lo que hace posible que el sistema posea el menor ruido posible. Además, la presencia de un medio difusor entre el objeto y el detector no impide la recuperación de la de fase del objeto, convirtiendo a nuestro arreglo óptico en un sistema robusto ante la presencia de medios difusores en el espacio entre el objeto y el sistema de detección.

1.3. Objetivo

Diseñar e implementar una técnica que permite determinar la distribución de amplitud y fase de un objeto empleando técnicas de imagen de un solo píxel. La idea se basa en la generación de luz estructurada mediante CGHs implementados en moduladores de amplitud rápidos de tipo DMD y la detección integrada por medio de fotodiodos sin estructura espacial.

Estructura de esta tesis

Esta tesis esta dividida en seis capítulos. El Capítulo 2 esta dedicado a comentar las bases de la holografía analógica y digital. También se describe un método holográfico digital de interés, el método de desplazamiento de fase (PS-DH, phase-shifting digital holography). Luego, se describen las técnicas holográficas que utilizan detectores con un solo píxel. Posteriormente, se comentan algunos aspectos básicos de los hologramas generados por computadora, y se describen dos métodos para generar y reconstruir este tipo de hologramas. Se presentan también resultados de las simulaciones de estos métodos. En el Capítulo 3, se describe la técnica de registro de imágenes con un solo píxel. Además, se describen brevemente los moduladores espaciales de luz de tipo DMD. Luego, se presentan algunas propiedades de los patrones de Walsh-Hadamard, dichos patrones son los que se utilizan en esta tesis para muestrear el objeto. En el Capítulo 4 se presenta el sistema optico desarrollado en este trabajo de tesis y el mecanismo para determinar distribuciones de fase con un detector de un solo píxel. Posteriormente, se presentan los resultados experimentales obtenidos. En el Capítulo 5 se determinan distribuciones de fase con un detector balanceado y se presentan los resultados obtenidos experimentalmente. Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y perspectivas futuras.

Capítulo 2

Holografía

Cuando se desea conocer la morfología o relieve de un objeto, el estudio de su fase juega un papel importante [1]. Un desafío en la actualidad es obtener la imagen de objetos que son transparentes o semi-transparentes, es decir, son objetos de fase. Esta clase de objetos están compuestos por ciertos materiales que no alteran la intensidad de la luz de manera significativa. La holografía es una alternativa para conocer la fase de estos objetos.

La holografía es una técnica óptica interferométrica que es capaz de registrar la información de amplitud y fase de un frente de onda. En este capítulo se aborda un estudio de los principios y aplicaciones de la holografía analógica y digital.

Posteriormente, se discuten métodos de imagen basados en la combinación de la holografía digital con la técnica de imagen con un solo píxel (SPI, Single-Pixel Imaging). Además, se describen dos métodos para diseñar e implementar de hologramas generados por computadora, los cuales permitirán codificar los patrones de muestreo que se utilizarán en el método de holografía con un solo píxel desarrollado en esta tesis. Finalmente, se presentan algunos resultados de simulación.

2.1. Holografía analógica

En la holografía analógica el patrón de interferencia, resultado de superponer el frente de onda difractado por el objeto y la onda de referencia, es registrado en un medio fotosensible

analógico [89, 90]. La Figura 2.1 muestra un sistema óptico, basado en un interferómetro de Mach-Zehnder, que puede ser utilizado para la holografía analógica en donde, como medio de registro, se utiliza una película fotosensible, como se indica en la figura. Un haz láser se expande con un objetivo de microscopio (OM) y se producen rayos paralelos con una lente colimadora (LC). Un divisor de haz (DH) divide el frente de onda en dos haces. Uno de ellos, el haz objeto, ilumina el objeto por medio de espejos (E); el otro, el haz de referencia, es dirigido hacia la película fotosensible sin ser difractado. Ambos haces interfieren a su paso por un segundo divisor de haz. Al final, el patrón de interferencia es registrado en la película fotosensible. El medio fotosensible puede ser una película de haluro de plata o películas de fotopolímero de alta resolución. Una vez revelada, esta película reproduce la distribución de intensidad del patrón de interferencias, y constituye lo que se denomina comúnmente como holograma. La reconstrucción del objeto, en este caso un objeto 3D, se logra iluminando el holograma.

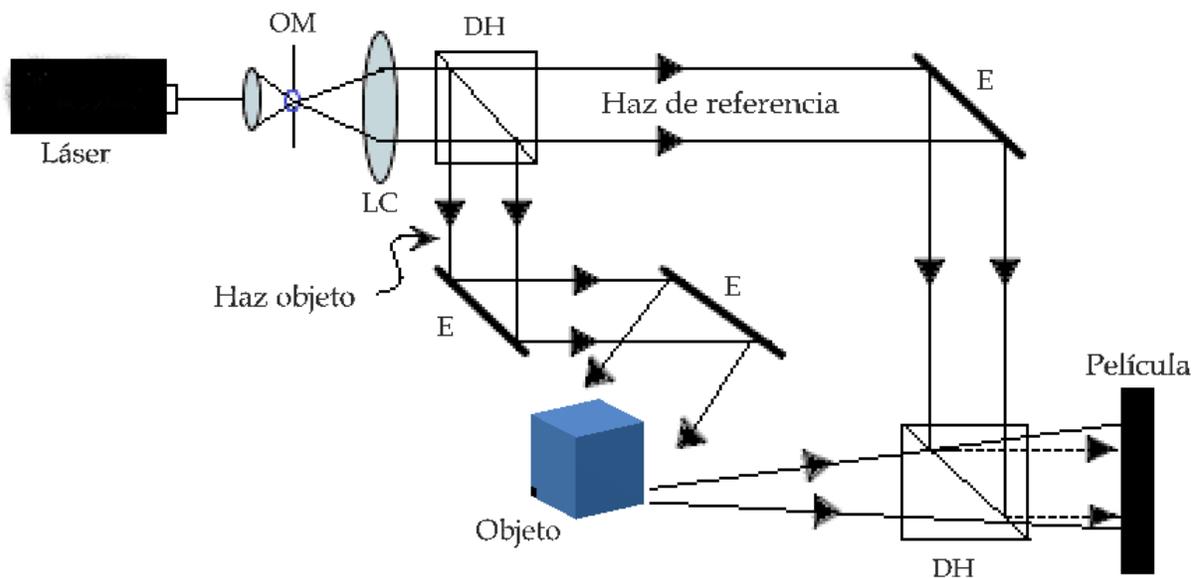


Figura 2.1: Arreglo óptico para el registro de objetos 3D en holografía analógica.

El sistema óptico para registrar un holograma puede ser descrito matemáticamente como sigue. La amplitud compleja generada por el haz objeto en el plano del holograma es [89]

$$E_O(x, y) = a_O(x, y) \exp[-j\phi_O(x, y)], \quad (2.1)$$

donde $a_O(x, y)$ y $\phi_O(x, y)$ son la amplitud y la fase del haz objeto, respectivamente. También, el frente de onda del haz de referencia sobre el plano del holograma puede ser expresado como

$$E_R(x, y) = a_R(x, y) \exp[-j\phi_R(x, y)], \quad (2.2)$$

donde $a_R(x, y)$ y $\phi_R(x, y)$ son la amplitud y la fase de la onda de referencia, respectivamente. Cuando ambas ondas interfieren en el medio de registro, la intensidad esta dada como

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |E_O(x, y) + E_R(x, y)|^2, \\ &= (E_O(x, y) + E_R(x, y))(E_O(x, y) + E_R(x, y))^*, \\ &= E_O(x, y)E_O^*(x, y) + E_R(x, y)E_R^*(x, y) + E_O(x, y)E_R^*(x, y) + E_R(x, y)E_O^*(x, y). \end{aligned} \quad (2.3)$$

El patrón de interferencia es registrado en la película holográfica que, tras el proceso de revelado, reproduce la distribución de intensidad incidente. La imagen real del objeto original puede ser recuperada del holograma haciendo incidir en el mismo un frente de onda con las mismas características del haz de referencia $E_R(x, y)$, también llamado haz de reconstrucción. Matemáticamente esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} I(x, y)E_R(x, y) &= |E_O(x, y) + E_R(x, y)|^2 E_R(x, y) \\ &= [E_O(x, y)E_O^*(x, y) + E_R(x, y)E_R^*(x, y) \\ &\quad + E_O(x, y)E_R^*(x, y) + E_O^*(x, y)E_R(x, y)] E_R(x, y) \\ &= |E_O(x, y)|^2 E_R(x, y) + |E_R(x, y)|^2 E_R(x, y) \\ &\quad + |E_R(x, y)|^2 E_O(x, y) + E_R^2(x, y)E_O^*(x, y). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Los dos primeros términos representan a la onda de referencia $E_R(x, y)$ modulada por la suma $|E_O(x, y)|^2 + |E_R(x, y)|^2$. El tercer término de la Ecuación (2.4) contiene información sobre la amplitud compleja del haz objeto en el plano del holograma. Es decir, reproduce el mismo frente de onda que el propio objeto. Por lo tanto, permite observar una imagen virtual del objeto a través del holograma. La Figura 2.2 muestra la reconstrucción de la imagen real y la virtual recuperadas de un holograma.

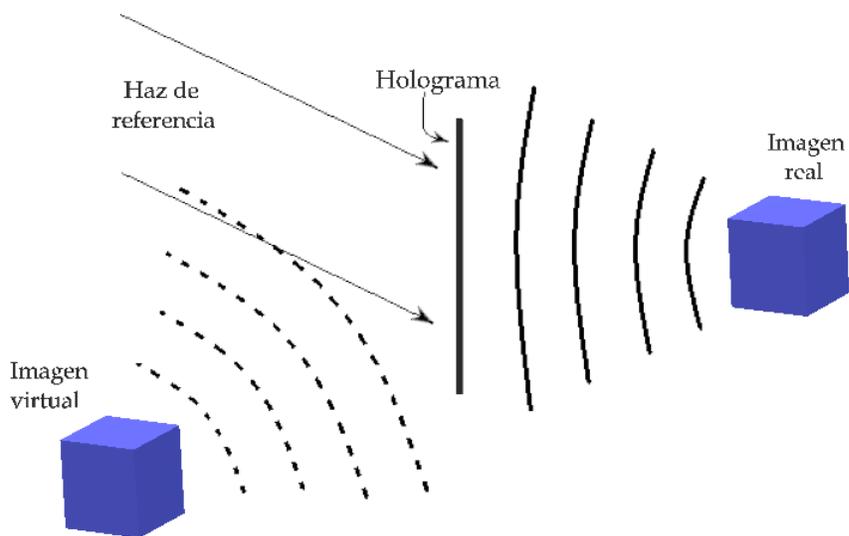


Figura 2.2: Reconstrucción de la imagen del objeto iluminando el holograma.

2.2. Holografía Digital (HD)

En el caso de la HD, los sistemas ópticos empleados son los mismos que los de la holografía analógica, tal como el empleado en la Figura 2.1, pero el registro del patrón de interferencia que constituye el holograma se realiza con sensores digitales, tales como CCD, CMOS o fotosensores como se muestra en la Figura 2.3. El holograma se almacena digitalmente en la computadora y puede ser transmitido o procesado para su reconstrucción. En la etapa de reconstrucción, se calcula numéricamente la amplitud compleja generada por el objeto en el plano del holograma. Esto permite posteriormente generar la amplitud compleja en cualquier otro plano simulando la propagación de la luz bien hacia adelante, reconstruyendo de este modo patrones reales, o bien hacia atrás, generando patrones virtuales del objeto, entre ellos, la propia imagen del objeto. El objeto puede ser, en general, un objeto 3D, 2D, o una superficie reflectiva difusa o especular situado a una distancia d del sensor CCD [23, 89–92], como se muestra en la Figura 2.3. En el caso de una configuración en transmisión, el frente de onda pasa a través del objeto y es superpuesta con el haz de referencia. Luego, el sensor CCD registra el patrón de interferencia entre ambos haces.

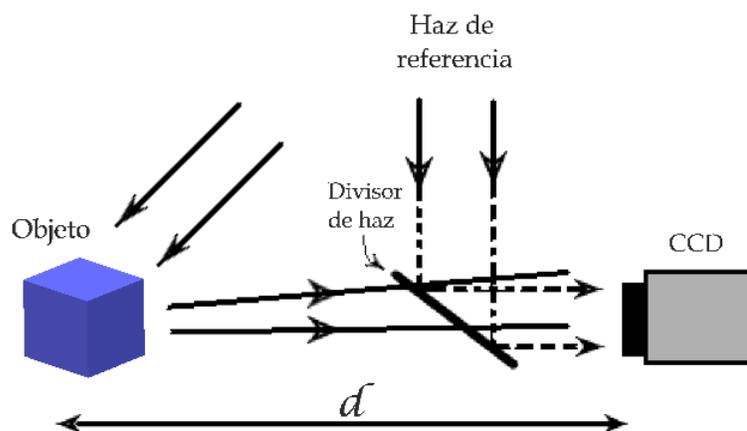


Figura 2.3: Esquema básico de un arreglo óptico en holografía digital.

2.2.1. HD de desplazamiento de fase

Como se observa en la Ecuación (2.4), la reconstrucción directa de un holograma genera simultáneamente patrones de difracción reales y virtuales, que pueden corresponder a imágenes reales o virtuales del objeto, tal como se muestra en la Figura 2.2. Para evitar que estas imágenes salgan superpuestas durante la reconstrucción, pueden emplearse ángulos de incidencia distintos para el haz objeto y el haz de referencia sobre el plano de la cámara en la etapa de registro del holograma, empleando interferometría fuera de eje. De este modo, en la reconstrucción posterior, los patrones de difracción reales y virtuales aparecen también separados. Sin embargo, esta técnica reduce la anchura de banda del dispositivo [93].

Una alternativa consiste en emplear interferómetros en eje, para aprovechar al máximo la anchura de banda del sistema, y una técnica de desplazamiento de fase que permita separar los diferentes términos con información sobre el haz objeto en la Ecuación (2.4). A esta técnica se le denomina HD de desplazamiento de fase. Consiste en registrar un número discreto de interferogramas (al menos 3, aunque es habitual emplear 4) con un desplazamiento de fase global diferente del haz de referencia respecto al haz objeto. Se pueden utilizar diferentes dispositivos ópticos para cambiar la fase del haz de referencia, como puede ser un par de láminas de retardo, un actuador piezoeléctrico o un SLM de fase. En la Figura 2.4 se muestra un arreglo óptico con un actuador piezoeléctrico para desplazar la fase del haz de referencia. El número mínimo de patrones de interferencia para aplicar la técnica de desplazamiento de fase es tres, aunque la relación matemática para cuatro patrones de interferencia es más directa.

La distribución de amplitud compleja registrada por el sensor de imagen (CCD) se expresa

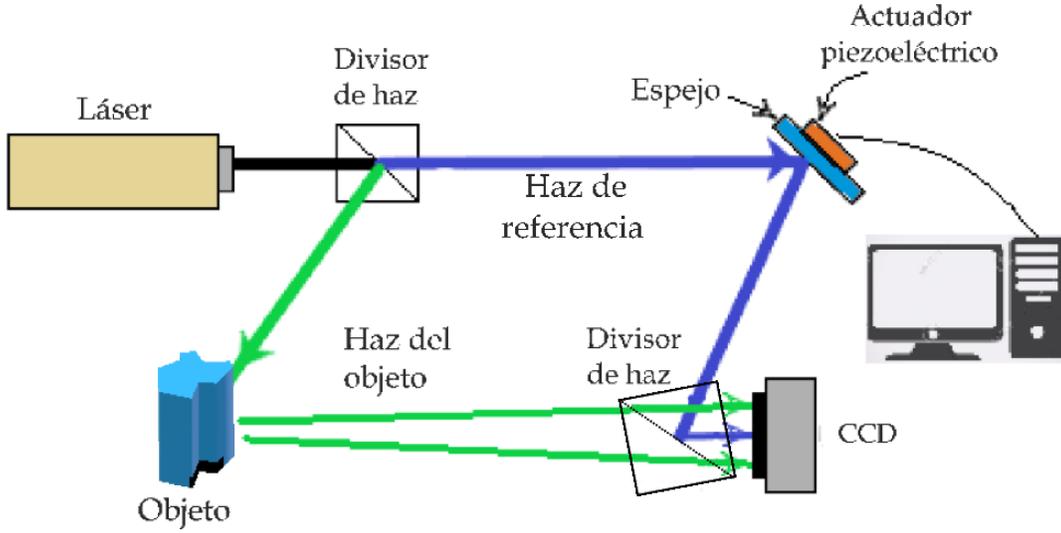


Figura 2.4: Arreglo óptico de un interferómetro que utiliza un actuador piezoeléctrico que permite cambiar la fase del haz de referencia.

en la Ecuación (2.3), que puede ser reescrita como

$$I(x, y) = a_R^2 + a_O^2 + 2a_R a_O \cos[\phi_R + \phi_O], \quad (2.5)$$

donde, para simplificar la notación, en los términos de la derecha de la igualdad se ha omitido la dependencia de los parámetros con las coordenadas (x, y) . Para aplicar el método de desplazamiento de fase con cuatro patrones de interferencia por medio de la Ecuación (2.5), consideraremos que el haz de referencia tiene una fase uniforme que puede tomar cuatro valores diferentes distribuidos uniformemente entre 0 y 2π , es decir, $\phi_R = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. Esto produce que los patrones de interferencia posean una diferencia de fase de $\pi/2$ entre ellos. Así, tenemos

$$\begin{aligned} I_1(x, y; 0) &= a_R^2 + a_O^2 + 2a_R a_O \cos[\phi_O], \\ I_2(x, y; \pi/2) &= a_R^2 + a_O^2 + 2a_R a_O \text{sen}[\phi_O], \\ I_3(x, y; \pi) &= a_R^2 + a_O^2 - 2a_R a_O \cos[\phi_O], \\ I_4(x, y; 3\pi/2) &= a_R^2 + a_O^2 - 2a_R a_O \text{sen}[\phi_O]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

A partir de los interferogramas es fácil demostrar que es posible obtener la fase del objeto ϕ_O usando la siguiente relación [21, 23, 92]

$$\phi_O(x, y) = \arctan \left(\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right), \quad (2.7)$$

y la amplitud del haz objeto a_O como

$$a_O(x, y) = \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2}. \quad (2.8)$$

Aunque existen otras técnicas de desplazamiento de fase [89], en los experimentos desarrollados en esta tesis emplearemos siempre la descrita por las Ecuaciones (2.7) y (2.8).

2.3. Generación de CGH

Los hologramas generados por computadora (CGH, computer generated hologram) son una alternativa para modular la amplitud y la fase de un haz objeto y, de este modo, emular la distribución compleja generada por la difracción de la luz en objetos bidimensionales o tridimensionales por métodos digitales. Para diseñar un CGH basta simular la interferencia entre la distribución de amplitud compleja que se pretende reconstruir y un haz de referencia (normalmente un haz de amplitud y fase constante). Esta distribución compleja puede corresponder a un patrón de difracción de Fresnel o Fraunhofer de un objeto o incluso a la imagen del objeto. Por supuesto, el objeto puede proceder de una imagen real o diseñada en el ordenador [94].

Una vez generado el CGH en el ordenador, el patrón de difracción correspondiente, o la imagen del objeto si se trata de un holograma imagen, se puede reconstruir numéricamente en el propio ordenador. Reproduciendo el CGH en un medio físico, puede reconstruirse el holograma experimentalmente en el laboratorio. Los hologramas son impresos en materiales especiales, como lo son las películas fotorefractivas, o pueden ser transferidos a dispositivos optoelectrónicos avanzados como son los SLM. Para reconstruir el holograma experimentalmente, se hace incidir sobre el holograma el mismo haz de referencia que se empleó durante el diseño y generación numérica. De este modo, el haz difractado reproduce el patrón de difracción complejo, o la imagen del objeto en el caso de un holograma imagen.

El material o dispositivo para grabar el holograma es determinante en la calidad de la imagen

que se recupera en la reconstrucción óptica. Recientemente, por sus propiedades ópticas ideales y su alta velocidad de refresco, los SLM se han convertido gradualmente en una opción atractiva en sistemas que requieren la reconstrucción óptica de CGH's, ya que pueden programarse por computadora, codificando directamente el CGH en tiempo real, y existen versiones que permiten modular tanto la fase como la amplitud de la luz. De esta forma, se evita el proceso de revelado y gastos en material que ya no puede ser reutilizable, como películas fotográficas, y pueden modularse CGH dinámicos.

Para codificar los CGHs diseñados se pueden emplear tanto SLM de modulación de fase como de amplitud. Además, algunos dispositivos funcionan exclusivamente en modo binario. En particular, los dispositivos de microespejos de tipo DMD son binarios de amplitud. Tienen la gran ventaja de que son muy eficientes y pueden modular la luz a velocidades de refresco que llegan hasta los 50 kHz. Por este motivo, son los dispositivos de modulación escogidos en los desarrollos de esta tesis. En las siguientes secciones revisaremos solo algunos de los métodos de generación de hologramas binarios de amplitud, para ser desplegados en un modulador DMD.

2.3.1. Hologramas tipo Lee

Los hologramas binarios de amplitud son una opción para modular la fase de un frente de onda [24]. Una manera de producir esta clase de hologramas es por medio del método de Lee [25]. Reescribiendo la Ecuación (2.5), considerando un holograma \mathbb{H} que codifica una fase ϕ y una frecuencia portadora α_0 generada por un haz de referencia plano que incide fuera de eje, queda como

$$\mathbb{H}(x, y) = \frac{1}{2}[1 + \cos((x - y)\alpha_0 - \phi(x, y))]. \quad (2.9)$$

Con la Ecuación (2.9) es posible generar un holograma \mathbb{H} con la información de fase ϕ que se requiera. Con el fin de modular la fase con el DMD, los hologramas se binarizan con la expresión

$$h(x, y) = \begin{cases} 1; & \mathbb{H}(x, y) > 0,5 \\ 0; & \text{otros casos.} \end{cases} \quad (2.10)$$

Por ejemplo, si ϕ es una constante, el holograma se representa como se observa en la Figura 2.5(a). La versión binarizada se presenta en la Figura 2.5(b).

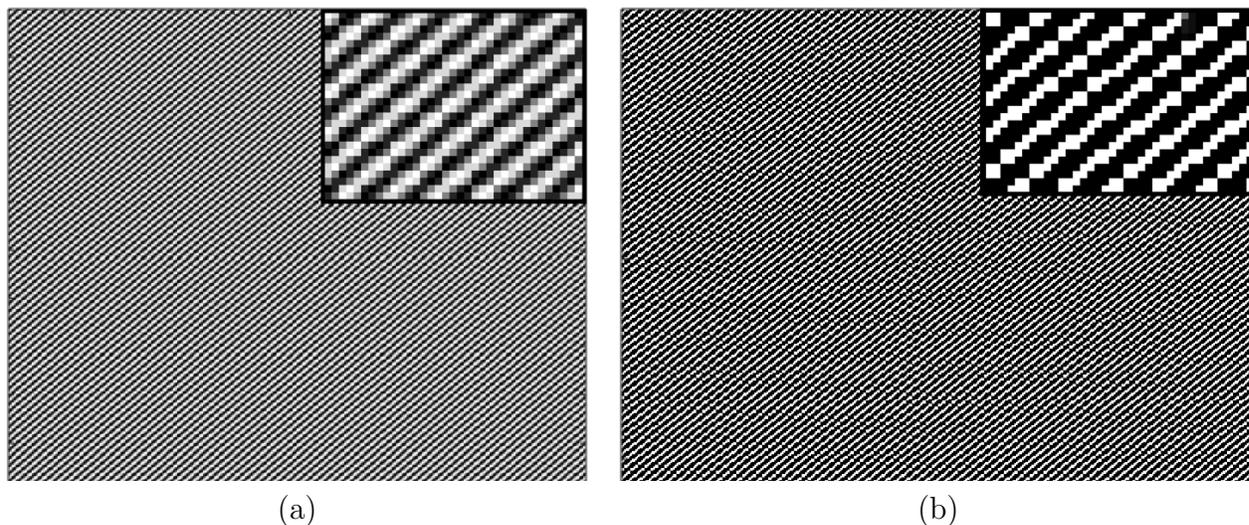


Figura 2.5: CGH con valores continuos (a) y su versión binarizada (b). En un recuadro se muestra una ampliación de la esquina superior derecha en ambos casos.

La Figura 2.6 muestra la imagen de uno de los patrones de Walsh-Hadamard que se pretende codificar en el modulador DMD con la técnica CGH. En la figura se representa el valor $+1$ en blanco y -1 en negro. La Figura 2.7(a) muestra el holograma de Lee que codifica el patrón de Walsh-Hadamard de la Figura 2.6 con valores continuos y la Figura 2.7(b) muestra el holograma binarizado.

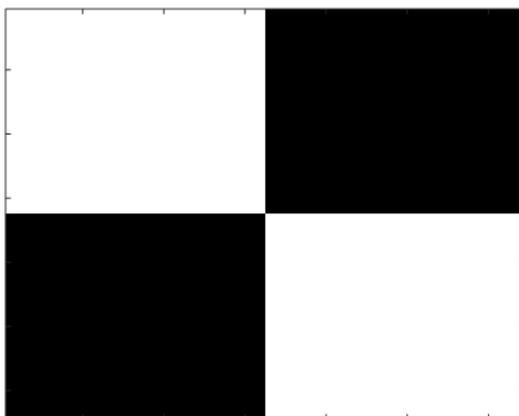


Figura 2.6: Patrón de Walsh-Hadamard.

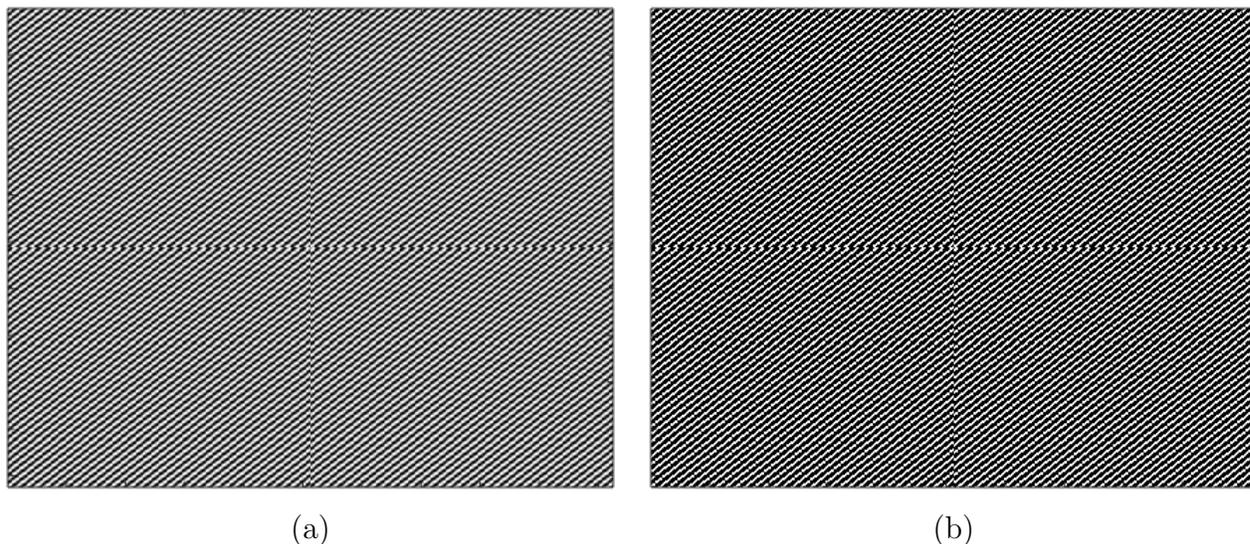


Figura 2.7: Holograma \mathbb{H} generado por computadora que contiene la Figura 2.6, en su versión continua (a) y binarizada (b).

Los hologramas presentados en la Figura 2.7 solo poseen información de fase codificada, la amplitud es unitaria.

De esta forma es posible codificar cualquier otra información de fase en el holograma \mathbb{H} , con la ayuda de la Ecuación (2.9). En este trabajo utilizaremos esta técnica para generar hologramas que proyecten patrones luminosos de muestreo codificados en fase para el registro de imágenes con un solo píxel.

Aunque los hologramas de Lee han dado buenos resultados en diversas aplicaciones [95], continua abierta la investigación para crear nuevos algoritmos que mejoren la eficiencia de los CGHs. Uno de los inconvenientes de los CGH generados por el método de Lee es la pérdida de información en el proceso de binarización de los hologramas (Ecuación (2.10)). En este proceso, a cada punto del holograma generado con la Ecuación (2.9) se le asignan dos valores, cero o uno y no es posible generar valores intermedios. Aunque esto no impide codificar múltiples valores de la fase, sí reduce la eficiencia del holograma.

2.3.2. Hogramas basados en superpíxeles

Un método alternativo para el control de la amplitud y la fase de un frente de onda utilizando un DMD fue propuesto por Goorden *et al* [60]. Este enfoque considera un grupo cuadrado de $n \times n$ píxeles del modulador para codificar cada valor del CGH. Este grupo de pequeños píxeles o microespejos se le denomina *superpixel*. A cada uno de estos píxeles se le asignan valores de fase entre 0 y 2π de manera uniforme. Luego, el valor de fase será la suma de los píxeles activos o en estados ON. Por ejemplo, tomemos un superpixel de 4×4 microespejos, con esto, se tiene un total de 16 píxeles en cada superpixel, por lo que se le otorgan valores de fase en intervalos de $\frac{\pi}{8}$. Supongamos que tres píxeles están en estado activo o en estado ON, denotados en color azul, como se observa en la Figura 2.8. La fase del superpixel será la suma de los tres píxeles activos, esto es, $\frac{5\pi}{4}$. Con este procedimiento es posible generar más valores de fase en comparación con el método de Lee y con una eficiencia ligeramente mayor.

En la Figura 2.9 se representa en el plano complejo los valores de fase codificados en el

0	$\frac{\pi}{8}$	$2\frac{\pi}{8}$	$3\frac{\pi}{8}$
$4\frac{\pi}{8}$	$5\frac{\pi}{8}$	$6\frac{\pi}{8}$	$7\frac{\pi}{8}$
$8\frac{\pi}{8}$	$9\frac{\pi}{8}$	$10\frac{\pi}{8}$	$11\frac{\pi}{8}$
$12\frac{\pi}{8}$	$13\frac{\pi}{8}$	$14\frac{\pi}{8}$	$15\frac{\pi}{8}$

Figura 2.8: Ejemplo de método del superpixel. Se consideran arreglos cuadrados de 4×4 píxeles (superpixel) del DMD. Esquema extraído de Ref. [60].

superpixel de la Figura 2.8. Cada uno de los valores de fase de cada píxel dentro del superpixel se representan en color negro. Los valores de fase que están activos se visualizan con un círculo verde, y la suma de estos, es decir, el valor de la amplitud compleja codificada por este superpixel, en color azul.

La elección del tamaño del superpixel determina la cantidad de valores posibles de fase del superpixel. En el caso de un superpixel de tamaño de 3×3 píxeles es posible crear 343 combinaciones de píxeles. En el caso de un superpixel de 4×4 píxeles, las combinaciones incrementan considerablemente a 6561. Ver Figura 2.10.

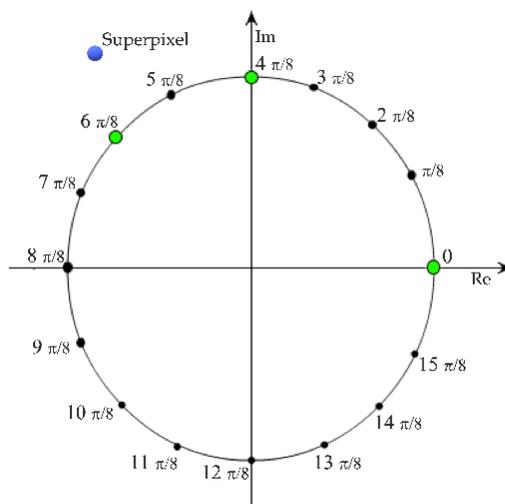


Figura 2.9: Ejemplo de los valores de fase representados en el plano complejo para el superpixel representado en la Figura 2.8. Esquema extraído de Ref. [60].

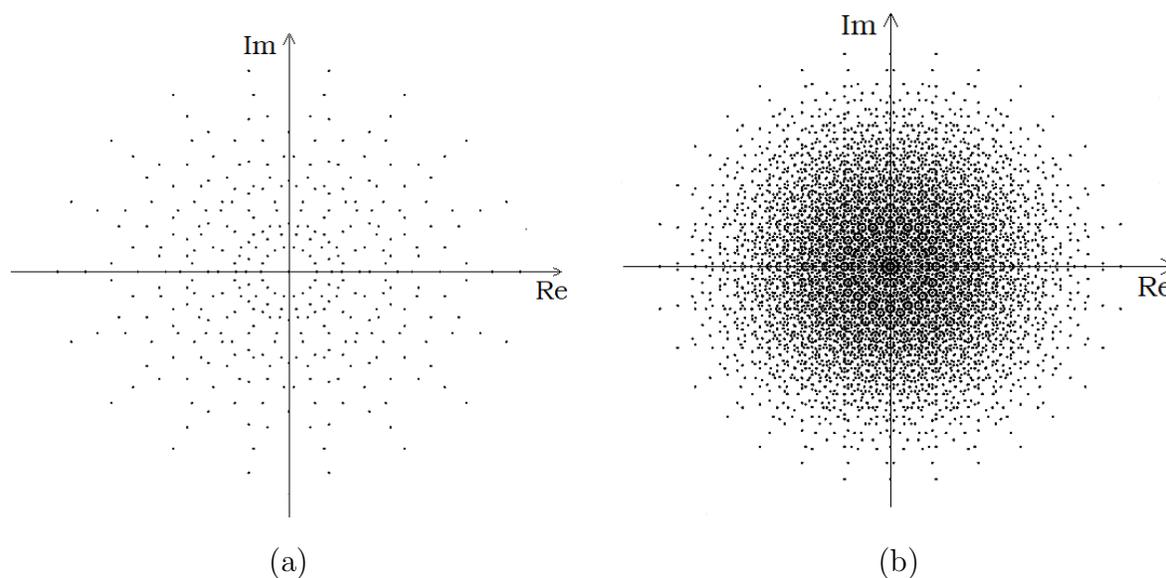


Figura 2.10: Combinaciones posibles de la amplitud compleja generada mediante un superpixel de 3×3 (a) y 4×4 (b) píxeles. Esquema extraído de Ref. [60].

Con esta técnica podemos crear fácilmente un holograma que module la amplitud y la fase de la luz de manera independiente. Por ejemplo, consideremos como distribución de amplitud $A(x, y)$ a la imagen de la Figura 2.11(a) y la imagen de la Figura 2.11(b) como distribución de fase $\theta(x, y)$, es decir, una amplitud compleja $E = Ae^{i\theta}$.



Figura 2.11: Imágenes empleadas como información de amplitud (a) y fase (b) para codificar un CGH con el método de superpixel.

Para generar el holograma, se utiliza una tabla de búsqueda para establecer la conexión entre cada uno de los píxeles del campo E en un superpíxel, Figura 2.8. Además, asigna la combinación de píxeles dentro del superpíxel que deben activarse para crear el campo E . Así, el holograma generado empleando superpíxeles de 4×4 píxeles para generar las distribuciones de amplitud y fase en la figura 2.11, se muestra en la Figura 2.12.

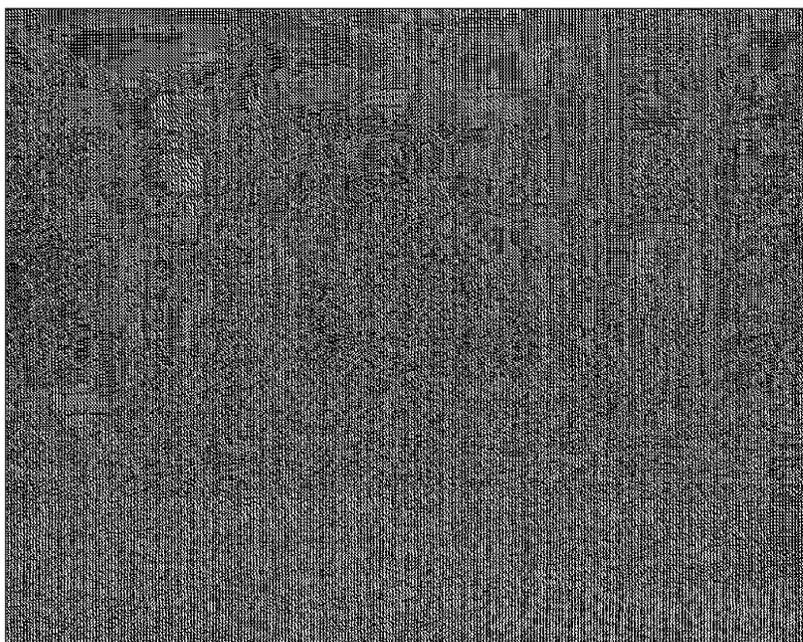


Figura 2.12: Holograma generado con el método del superpíxel.

Con la generación de hologramas binarios por el método del superpixel es posible modular la amplitud y fase del haz incidente, tanto de manera dependiente como independiente uno de otro.

2.3.3. Algoritmo de Gerchberg-Saxton

Otra clase de técnicas para generar hologramas por computadora son las que están basadas en métodos iterativos. La mayoría de las técnicas de diseño iterativo se basan en el algoritmo de recuperación de fase sugerido por Gerchberg y Saxton [96]. El algoritmo original Gerchberg-Saxton (GS) tiene como objetivo encontrar la distribución de fase capaz de generar una determinada distribución de intensidad en el plano de difracción de Fraunhofer. Se trata de un proceso iterativo en el cual se aplican sucesivamente transformaciones de Fourier y su inversa, y la amplitud deseada está restringida en la salida, mientras que la fase evoluciona libremente. Este algoritmo es especialmente útil para calcular hologramas de Fourier generados por computadora de solo fase, que proporcionan una determinada distribución de intensidad por difracción, aunque también existen variantes que permiten controlar la amplitud compleja en el plano de salida.

El algoritmo Gerchberg-Saxton, para generar un holograma de Fourier de fase, supone aplicar los siguientes pasos:

- 1 Se elige una amplitud compleja de entrada con amplitud A_0 y fase aleatoria inicial φ_0 .
- 2 Se aplica la transformada de Fourier (TF) de la amplitud compleja inicial.
- 3 En el espacio de Fourier, se reemplaza la amplitud por una distribución de amplitud que deseamos, por ejemplo, unitaria.
- 4 Aplicamos la transformada inversa de Fourier de la nueva amplitud compleja.
- 5 Se descarta la amplitud y se impone la amplitud inicial A_0 y se repite el paso 2. El cálculo del holograma continúa de forma iterativa hasta cumplir un criterio de convergencia.

En la Figura 2.13 se muestra de manera esquemática el proceso de generación de hologramas con el algoritmo de Gerchberg-Saxton.

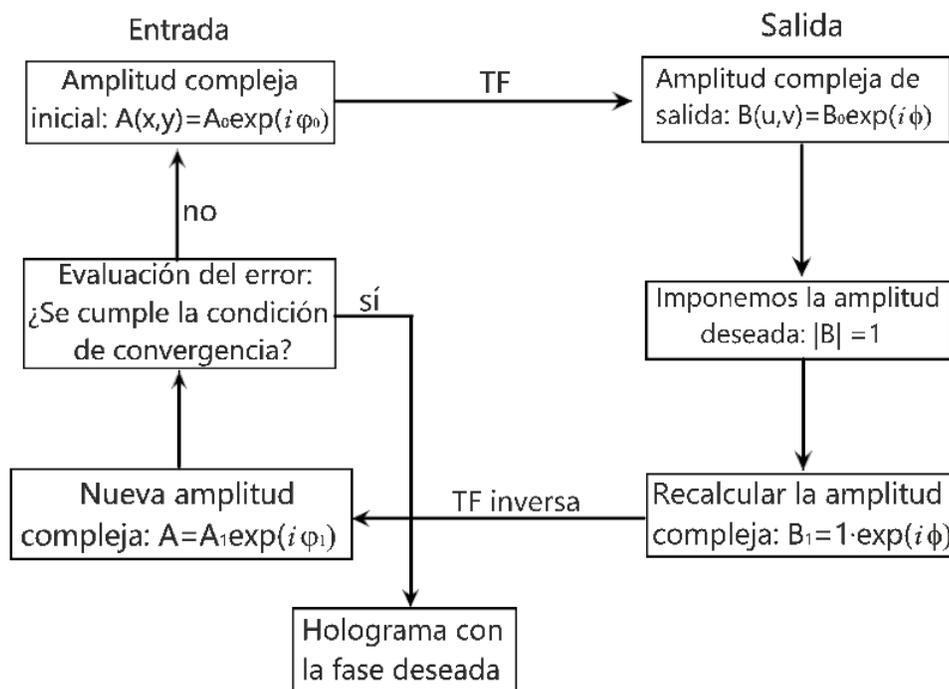


Figura 2.13: Diagrama del algoritmo de Gerchberg-Saxton.

Aunque usualmente la transformada de Fourier es considerada en el algoritmo GS, también se pueden emplear otro tipo de operaciones como la evaluación numérica de la integral de la difracción de Fresnel.

2.4. Resultados simulados con CGH

En esta sección se presentan los resultados de la simulación de la etapa de reconstrucción de los CGH tipo Lee y superpixel, también conocido como método de Mosk. Se describe cómo calcular numéricamente la recuperación de la información de amplitud y fase codificados en los hologramas binarios generados por el método de Lee y los basados en el método del superpixel.

2.4.1. Método de Lee

Para reconstruir numéricamente la amplitud compleja codificada en el holograma de Lee descrito en la Figura 2.7(b) hay que realizar los siguientes pasos:

- a) Se aplica la transformada de Fourier.
- b) Se elige uno de los órdenes de difracción, en este caso, el primer orden de difracción.
- c) Se aplica la transformada de Fourier inversa al orden de difracción elegido previamente.
- d) Se recupera la fase ϕ .

Una imagen de la distribución de intensidad de la transformada de Fourier del holograma se visualiza en la Figura 2.14. En este espacio, se puede visualizar los órdenes de difracción cero, +1 y -1.

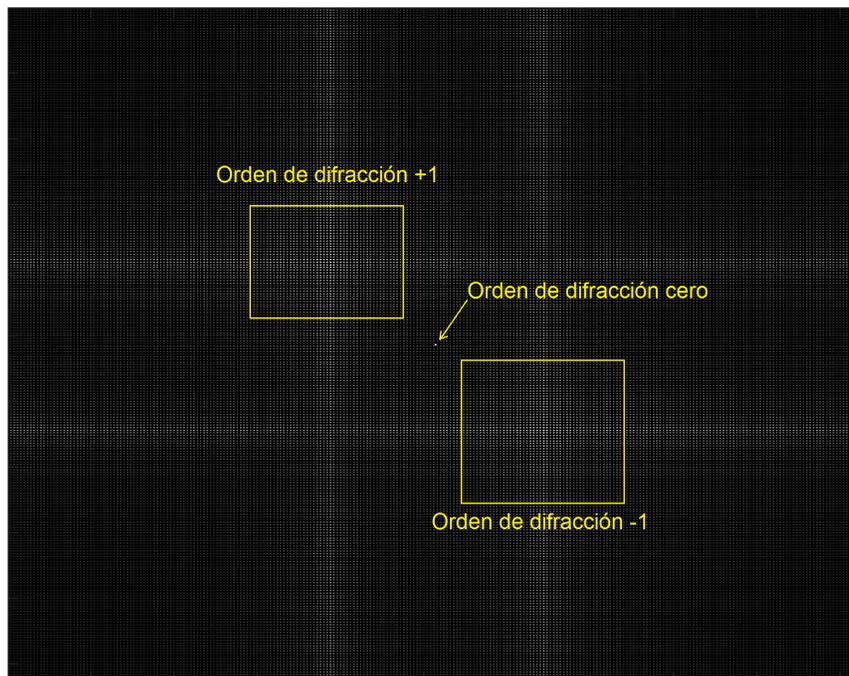


Figura 2.14: Órdenes de difracción de la transformada de Fourier del CGH.

Para recuperar la información de fase de interés, se filtra el orden de difracción +1. Otra elección es filtrar el orden -1, que contiene exactamente la misma información de fase, ya que se

trata de la parte simétrica del orden +1. Posteriormente, realizando la transformada de Fourier inversa, se recupera la información de fase codificada en el holograma \mathbb{H} . En la Figura 2.15 se presenta la amplitud y la fase que se recupera de manera numérica.

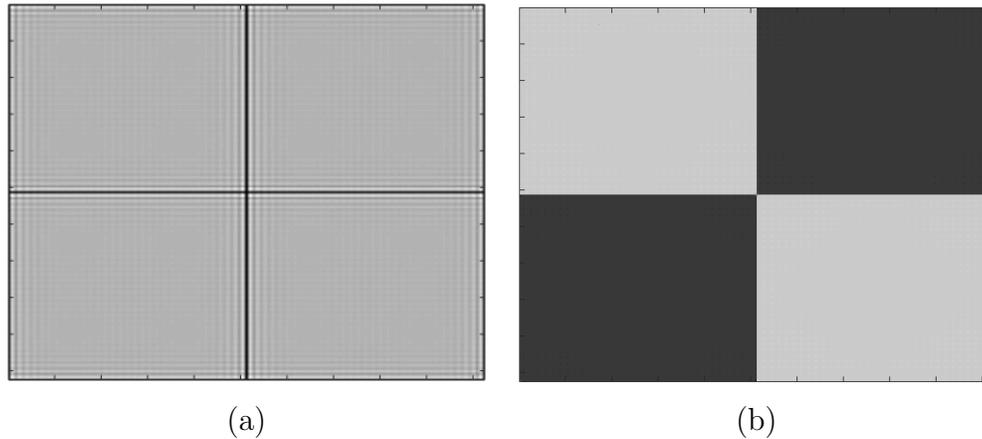


Figura 2.15: Amplitud (a) y fase (b) recuperada con la simulación numérica del método de Lee.

A través de este ejemplo concluimos que es posible codificar la información de fase contenida en un patrón de Walsh-Hadamard con ayuda de la Ecuación (2.9) y reconstruir la información codificada en el holograma imagen. Aunque el método de Lee también permite modular y reconstruir la distribución de amplitud, nuestro interés es la modulación de la fase.

2.4.2. Método de Mosk

Para reconstruir numéricamente la amplitud compleja codificada en el holograma de Mosk descrito en la Figura 2.12 hay que realizar los siguientes pasos:

- a) Se aplica la transformada de Fourier al holograma generado con el método del superpixel.
- b) Se elige un orden de difracción adecuado y se filtra el resto de la información.
- c) Se aplica la transformada de Fourier inversa orden de difracción elegido en el paso previo.
- d) Se recupera la amplitud A y la fase θ .

El resultado de aplicar el método al holograma presentado en la Figura 2.12 se muestra en la Figura 2.16(a). En este caso, elegimos el orden de difracción cero, como se muestra en la Figura 2.16(b), para filtrar la información, ya que los valores de la fase de cada píxel se han especificado numéricamente. Sin embargo, en la práctica hay que escoger una abertura fuera de eje para filtrar, ya que es la posición de la abertura en el plano de Fourier la que asigna los distintos valores de la fase a los píxeles del superpíxel.

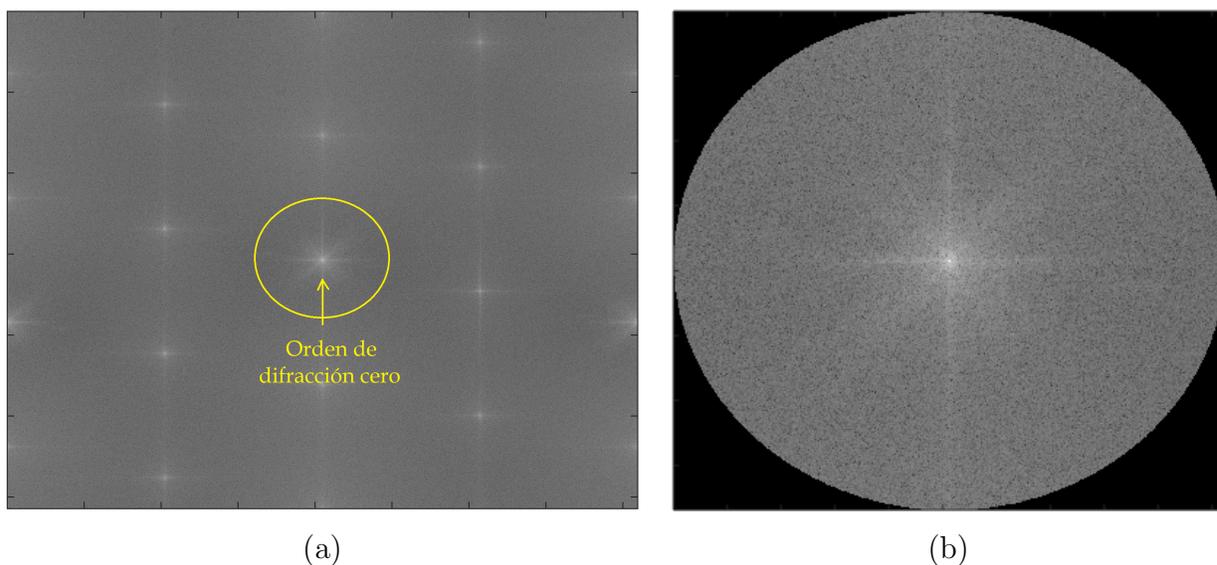


Figura 2.16: Transformada de Fourier del holograma generado con el método del superpíxel. Órdenes de difracción (a). De manera numérica se elige el orden de difracción de interés (b).

Se aplica la transformada de Fourier inversa al orden de difracción elegido. Con esto, se recupera la información de amplitud y fase codificados, los cuales se muestran en la Figura 2.17(a) y 2.17(b), respectivamente.



Figura 2.17: Amplitud (a) y fase (b) recuperada del holograma en la Figura 2.12

2.5. Implementación experimental

En esta sección se describe brevemente el sistema óptico y el procedimiento que permite la reconstrucción experimental de los hologramas generados mediante los métodos de Lee y de Mosk, respectivamente.

2.5.1. Método de Lee

Experimentalmente, el montaje óptico para reconstruir la información de fase, se puede visualizar en la Figura 2.18. Se basa en un sistema formador de imágenes $4f$, que consta de dos lentes, ambas con una longitud focal f_1 . El holograma \mathbb{H} que codifica un objeto de fase (en este caso particular, la imagen de la Figura 2.6) se coloca en el plano de entrada. Como iluminación se utiliza un haz colimado de luz coherente. La luz difractada incide en la primera lente, que forma el patrón de difracción del holograma en el plano focal, constituido por una serie de órdenes de difracción debido a la red periódica binaria desplegada en el DMD. Un diafragma localizado en la posición adecuada filtra todo el patrón salvo el orden de difracción 1. De este modo, la segunda lente reconstruye la amplitud compleja en el plano de salida del sistema $4f$.

En el plano de entrada se puede colocar un holograma analógico o un holograma digital des-

plegado en un modulador espacial de luz (SLM). En este trabajo, el holograma es codificado en un modulador DMD. El empleo de este tipo de dispositivo permite modular un gran número de hologramas a una alta velocidad de refresco.

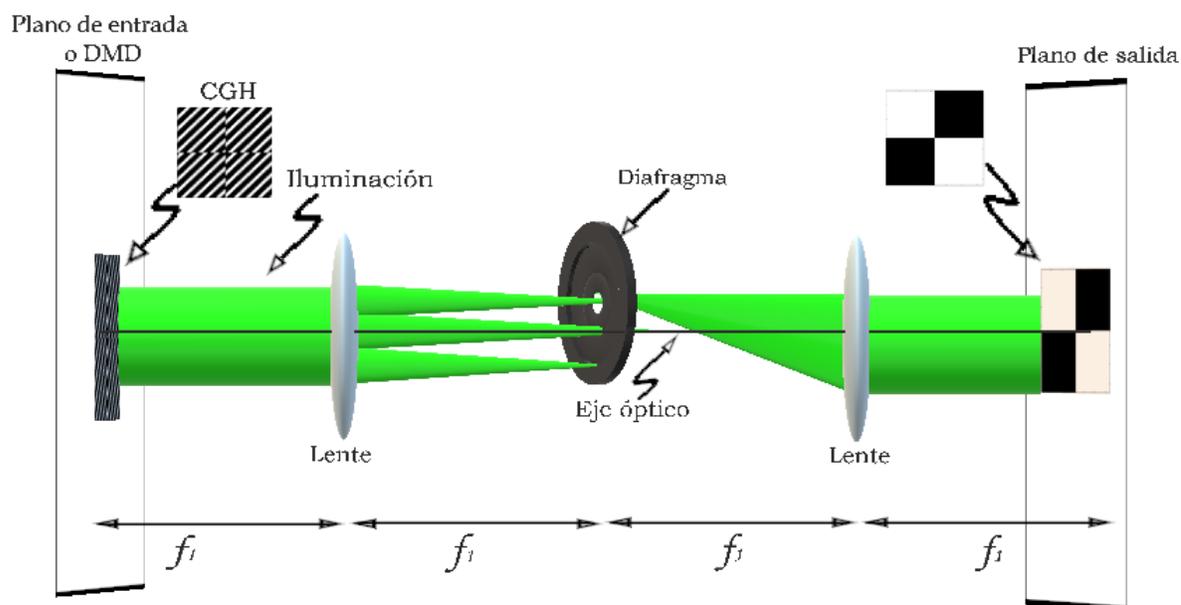


Figura 2.18: Sistema óptico para recuperar la información de fase codificada en un holograma generado con el método de Lee.

2.5.2. Método de Mosk

La Figura 2.19 muestra un sistema óptico para la reconstrucción experimental de la amplitud y fase codificados en un holograma generado por el método del superpixel. Se emplea un sistema $4f$ constituido por dos lentes iguales. Puesto que se trata de un holograma binario de amplitud, al igual que en el caso anterior, se puede desplegar el holograma en un modulador basado en microespejos o DMD. A diferencia del sistema óptico del método de Lee, en este sistema las dos lentes se colocan ligeramente fuera de eje una respecto a la otra. La fase de cada microespejo en el superpixel depende de la posición de pixel en el DMD. La respuesta en el plano de salida de un superpixel es la suma de las respuestas individuales de los píxeles activos.

Para superpíxeles de tamaño de $n \times n$, la posición del primer orden es elegido en las coordenadas $(x, y) = (-a, na)$, donde $a = -\lambda f/n^2 d$, λ es la longitud de onda, f es la longitud focal de la primera lente y d es el tamaño del píxel del DMD. En el plano de salida, las respuestas de los

píxeles vecinos dentro del superpixel están fuera de fase una cantidad de $2\pi/n^2$ en la dirección x y $2\pi/n$ en la dirección y . En la Figura 2.20 se muestra la posición y tamaño de la apertura en el espacio de Fourier para un superpixel de tamaño de 4×4 .

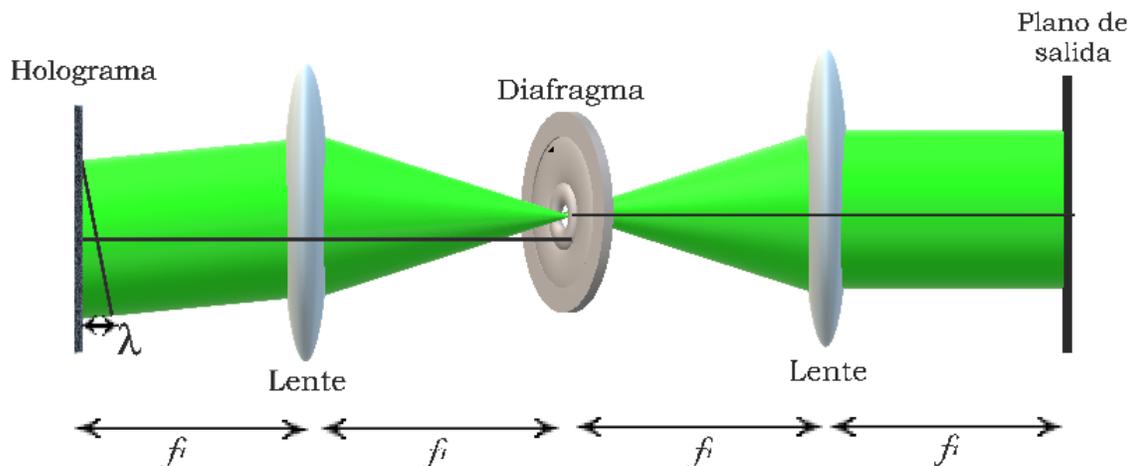


Figura 2.19: Esquema óptico empleado para reconstruir la amplitud y la fase de un holograma generado con el método del superpixel.

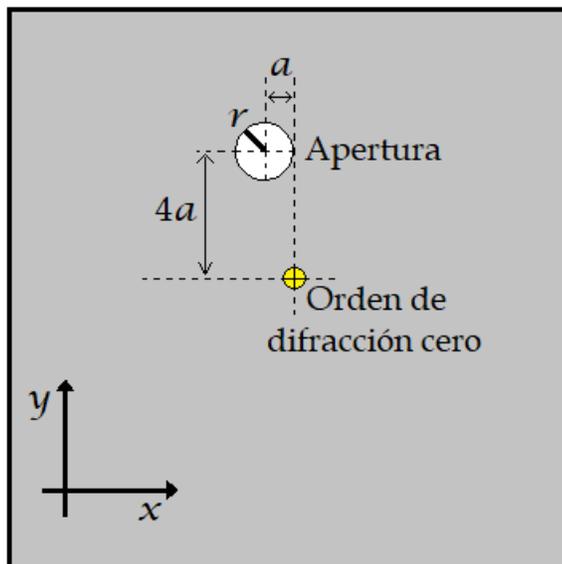


Figura 2.20: La apertura es colocada tal que la fase de los 16 píxeles del DMD de un superpixel de 4×4 sean uniformemente distribuidos entre 0 y 2π .

El método de superpixel se ha aplicado para dar forma a campos de luz con fase y amplitud arbitrarias. El holograma producido es capaz de codificar dos imágenes independientes como la fase y la amplitud en un campo de luz, como se ha demostrado en la simulación. Por ejemplo, este método ha sido usado para producir hologramas para generar un haz asimétrico de Bessel [51].

2.6. Desplazamiento de fase con hologramas de Lee

Con los hologramas tipo Lee es muy sencillo aplicar la técnica de desplazamiento de fase, incluyendo una variación de fase en el haz de referencia que se utiliza para simular el patrón interferencial. Esto se logra reescribiendo la Ecuación (2.9) del siguiente modo

$$\mathbb{H}(x, y) = \frac{1}{2}[1 + \cos((x - y)\alpha_0 - \delta)], \quad (2.11)$$

donde $\delta = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. La Ecuación (2.11) genera cuatro hologramas con franjas desplazadas entre sí. La Figura 2.21 muestra los hologramas tipo Lee, resultado de aplicar la técnica de desplazamiento de fase.

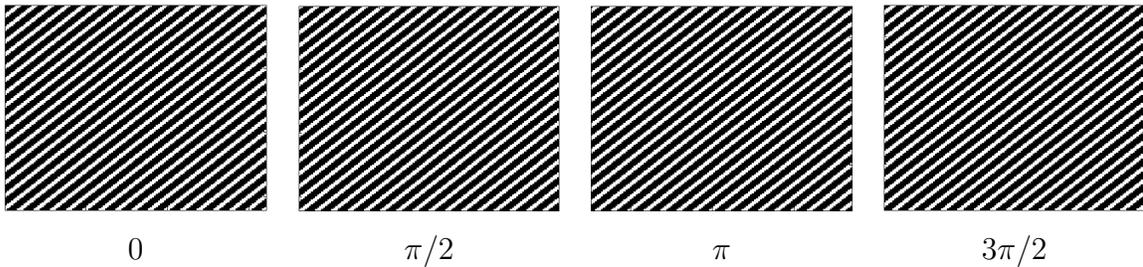


Figura 2.21: Hologramas tipo Lee calculados numéricamente con una diferencia de $\pi/2$ entre ellos, para posteriormente aplicar la técnica de desplazamiento de fase.

Capítulo 3

Imágenes con un solo píxel y muestreo compresivo

3.1. Introducción

En este capítulo se revisa de manera cualitativa y analítica la técnica de formación de imágenes con un solo píxel, (SPI, single-pixel imaging), junto con la descripción de elementos básicos de dicha teoría, como los moduladores espaciales de luz o los patrones de muestreo basados en funciones de Walsh-Hadamard, así como de su implementación práctica. También, se da una breve introducción a la teoría del muestreo compresivo (CS, compressive sensing).

En las técnicas de formación de imágenes 2D, tradicionalmente se utilizan sensores basados en arreglos matriciales de píxeles, tales como los sensores CCD o CMOS. En esta clase de sensores, cada píxel registra información de un solo punto de la escena. Como se puede ver en la Figura 3.1, el sistema óptico, representado en la imagen por una sola lente, permite registrar simultáneamente punto a punto toda la imagen en una sola adquisición.

Una alternativa en el campo de la imagen óptica es la técnica de formación (o adquisición) de imágenes con un solo píxel [65,66]. El proceso de adquisición de imágenes de una cámara con un solo píxel consiste proyectar secuencialmente un conjunto de patrones luminosos directamente sobre el objeto mientras un fotodetector registra la intensidad reflejada, transmitida o difundida por el objeto. En este caso, cada patrón muestrea información de varios puntos del objeto o escena (ver Figura 3.2). En general, los patrones están relacionados con una base de funciones,

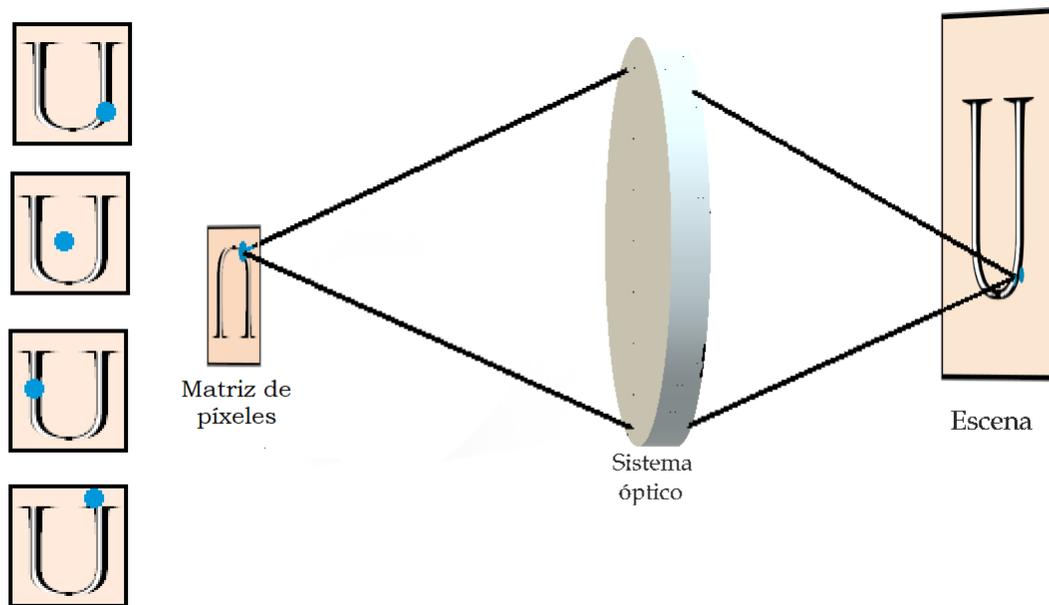


Figura 3.1: Esquema simplificado de registro de una imagen 2D con una matriz de píxeles.

de manera que lo que mide el fotodetector son las proyecciones del objeto en esa base. La imagen del objeto se obtiene computacionalmente a partir de las funciones de la base empleadas para codificar los patrones de muestreo y las intensidades medidas en el proceso de muestreo.

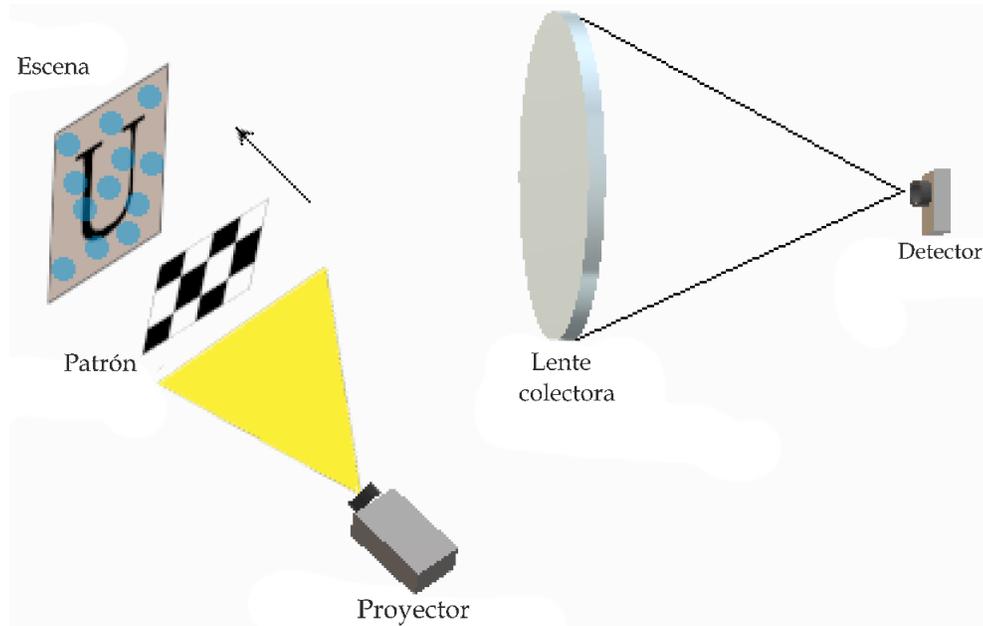


Figura 3.2: Esquema del sistema óptico empleado para registrar imágenes de un objeto 2D con luz estructurada y un detector de un solo píxel.

La técnica de formación de imágenes SPI se puede interpretar como un cambio de base. Ya que la medida de la intensidad luminosa generada por la proyección de los patrones luminosos sobre el objeto es equivalente a la proyección matemática del objeto sobre las funciones de la base que se emplean para codificar los patrones [65] (ver Figura 3.3). Es decir, las intensidades medidas no son más que los coeficientes del objeto asociados a las funciones de la nueva base.

Así pues, el mecanismo fundamental de la técnica de SPI consiste en superponer un conjunto de máscaras sobre una escena y recuperar la intensidad total de luz transmitida o reflejada para cada una de las máscaras desplegadas.

3.2. Patrones Walsh-Hadamard

En nuestro caso, los patrones de muestreo utilizados son los patrones de Walsh-Hadamard. Una matriz de Hadamard de orden N , denotada como H_N , es una matriz que esta formada por

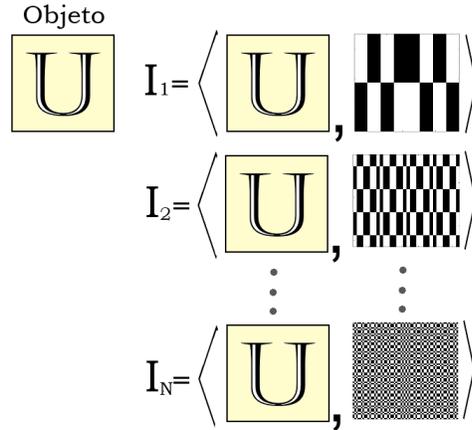


Figura 3.3: El muestro de un objeto con patrones luminosos se puede considerar como la proyección, o producto escalar, del objeto sobre las funciones de la base.

elementos de valor +1 y -1, que satisfacen la relación

$$H_N H_N^T = N I_N, \tag{3.1}$$

donde T denota la transpuesta e I_N es la matriz identidad de dimensión $N \times N$. La Ecuación (3.1) significa que todas las filas son linealmente independientes entre si, es decir, el producto interno de dos filas arbitrarias es cero.

Una de las formas de crear la matrices de Hadamard es por medio de la construcción de Sylvester, mediante la cual se obtienen las matrices de Hadamard de orden 1, 2, 4, 8, ... 2^n de manera recursiva [97,98]

$$\mathbf{H}(1) = (1), \tag{3.2}$$

$$\mathbf{H}(2^1) = \begin{pmatrix} +1 & +1 \\ +1 & -1 \end{pmatrix}, \tag{3.3}$$

$$\mathbf{H}(2^2) = \begin{pmatrix} +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 \end{pmatrix}, \tag{3.4}$$

de manera general

$$\mathbf{H}(2^k) = \begin{pmatrix} \mathbf{H}(2^{k-1}) & \mathbf{H}(2^{k-1}) \\ \mathbf{H}(2^{k-1}) & -\mathbf{H}(2^{k-1}) \end{pmatrix} = \mathbf{H}(2) \otimes \mathbf{H}(2^{k-1}). \quad (3.5)$$

Se puede dar una interpretación de frecuencia (f) a las filas de la matriz de Hadamard. Llamamos frecuencia al número de cambios de signo que existen a lo largo de cada fila. Por ejemplo, para la matriz de Hadamard en la Ecuación (3.4), las frecuencias de los renglones son $f_1 = 0$, $f_2 = 3$, $f_3 = 1$ y $f_4 = 2$, respectivamente, donde el subíndice denota el número de renglón de la matriz de Hadamard $\mathbf{H}(2^2)$.

Además, el conjunto de filas se puede considerar como una base de funciones 1D rectangulares, llamadas funciones de Walsh (W). En este contexto, la matriz de Hadamard $\mathbf{H}(2^n)$ simplemente realiza la descomposición de una función en un conjunto de funciones rectangulares.

En las técnicas de procesamiento de imágenes digitales, es habitual considerar una imagen 2D como un vector 1D, que expresa el conjunto de filas de la imagen concatenadas en un solo vector. Esta correspondencia se puede aplicar entre las funciones rectangulares de Walsh y las funciones 2D, llamadas funciones o patrones Walsh-Hadamard (WH). De este modo, por ejemplo, si consideramos la matriz Hadamard $\mathbf{H}(2^2)$ de la Ecuación (3.4), tenemos

$$\begin{aligned} W_1 &= (+1 \quad +1 \quad +1 \quad +1) \Rightarrow \text{WH}_1 = \begin{pmatrix} +1 & +1 \\ +1 & +1 \end{pmatrix}, \\ W_2 &= (+1 \quad -1 \quad +1 \quad -1) \Rightarrow \text{WH}_2 = \begin{pmatrix} +1 & -1 \\ +1 & -1 \end{pmatrix}, \\ W_3 &= (+1 \quad +1 \quad -1 \quad -1) \Rightarrow \text{WH}_3 = \begin{pmatrix} +1 & +1 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}, \\ W_4 &= (+1 \quad -1 \quad -1 \quad +1) \Rightarrow \text{WH}_4 = \begin{pmatrix} +1 & -1 \\ -1 & +1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

donde W_1 , W_2 , W_3 y W_4 son las funciones rectangulares de Walsh de la matriz de Hadamard $\mathbf{H}(2^2)$ y WH_1 , WH_2 , WH_3 y WH_4 son sus respectivas funciones o patrones de Walsh-Hadamard. En la Figura 3.4 se muestra este mismo mecanismo para una matriz de Hadamard de $\mathbf{H}(2^4)$. Los valores 1's son representados en color blanco y los valores -1's son representados en negro. En esta figura se muestra también el orden en el que se envían estos patrones a la escena u objeto en nuestra cámara de un solo píxel con luz estructurada. El orden se representa etiquetando los patrones de Walsh-Hadamard con números de color rojo. Puede observarse cómo el envío

de tales patrones se realiza en orden creciente de frecuencia, primero proyectando los patrones de frecuencias mas bajas y finalmente los de más alta frecuencia. Aunque, en el caso de utilizar todos los patrones, se obtiene la misma reconstrucción independientemente del orden en se envían. Como se observa en la Figura 3.4, la matriz de Hadamard \mathbf{H} de dimensión $N \times N$ contiene la base de funciones 2D WH, cuya dimensión es $n \times n = \sqrt{N} \times \sqrt{N}$.

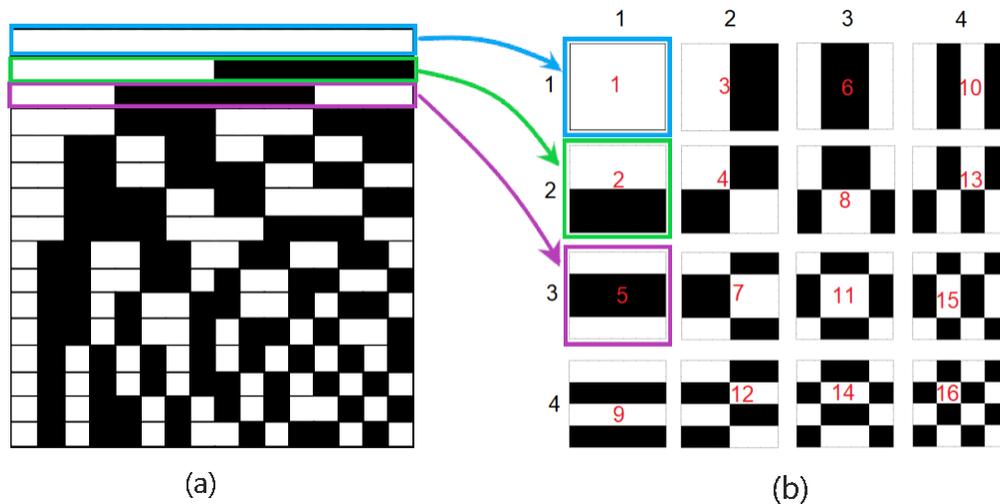


Figura 3.4: Representación de la matriz de Hadamard $\mathbf{H}(2^4)$ (a) y el conjunto de patrones WH 2D construidos a partir de dicha matriz (b). Por cada fila de la matriz $\mathbf{H}(2^4)$ se construye un patrón WH.

Por lo tanto, el número de patrones que deben ser proyectados depende de la resolución que deseamos alcanzar para la imagen. Por ejemplo, para obtener una imagen con una resolución de 64×64 píxeles es necesario proyectar 64^2 patrones. En general, se utilizan n^2 patrones para obtener una imagen con una resolución de $n \times n$. En la Figura 3.5 se muestra un conjunto de patrones de WH que se utilizan para reconstruir una imagen con una resolución de 8×8 píxeles.

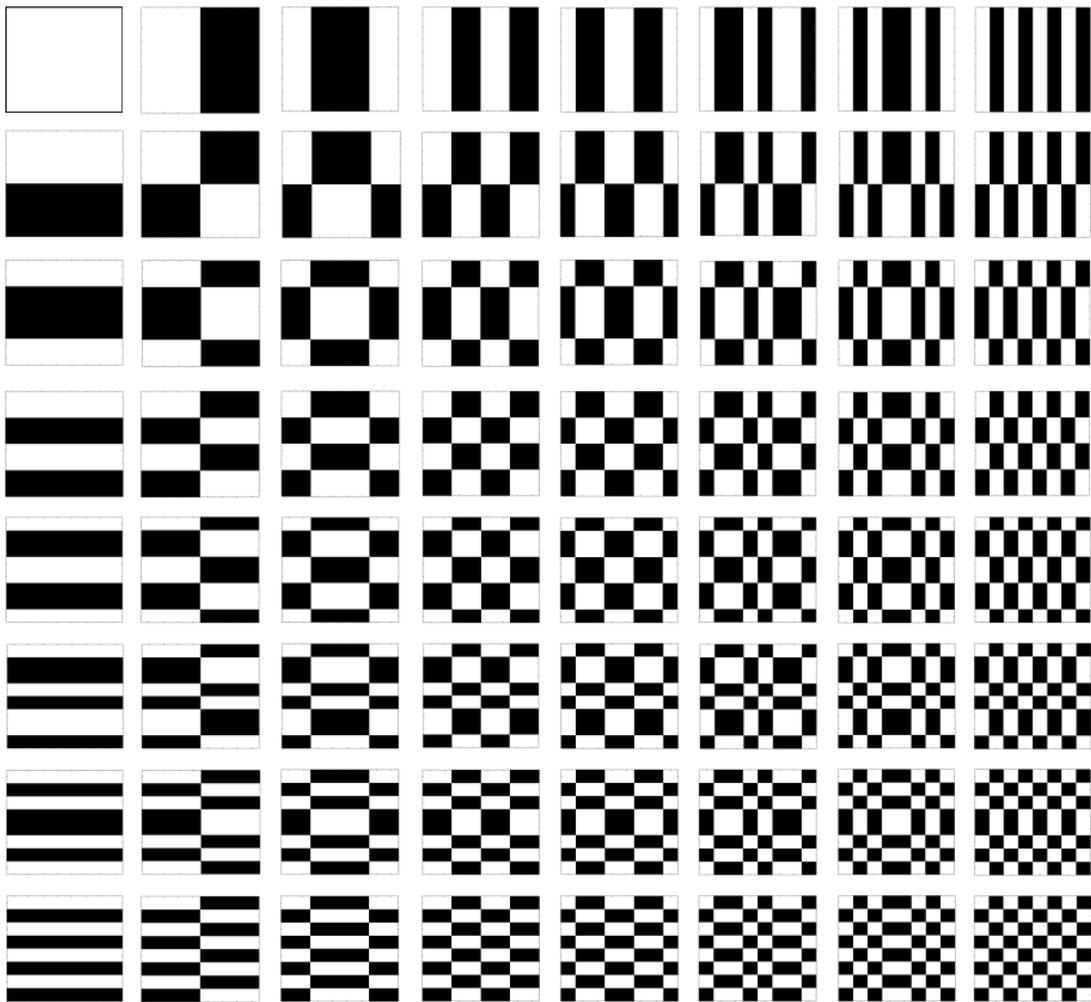


Figura 3.5: Patrones de Walsh-Hadamard que se utilizan para obtener una imagen con una resolución de 8×8 píxels.

3.3. Dispositivos digitales de microespejos

La técnica de SPI, requiere la proyección de patrones luminosos de muestreo sobre el objeto. Una opción para la proyección de dichos patrones es emplear moduladores espaciales de luz basados en pantallas de cristal líquido. Sin embargo, aunque estos dispositivos son muy versátiles, no permiten la proyección de patrones a alta velocidad.

Una alternativa es utilizar moduladores basados en microespejos o DMD. Estos moduladores

constan de una pantalla conformada de muchos microespejos. Cada microespejo del dispositivo puede cambiar de posición tanto a $+12^\circ$ o -12° con respecto a la normal, los cuales corresponden a los estados prendido (ON) o apagado (OFF), respectivamente (ver Figura 3.6). Teniendo en cuenta los estados ON y OFF, la fuente de iluminación se sitúa de tal manera que el DMD proyecte hacia el objeto únicamente la luz reflejada por los espejos en estado ON, tal como se muestra en la Figura 3.6(b). Los microespejos, con recubrimiento metálico, son altamente reflectantes con una amplia respuesta espectral.

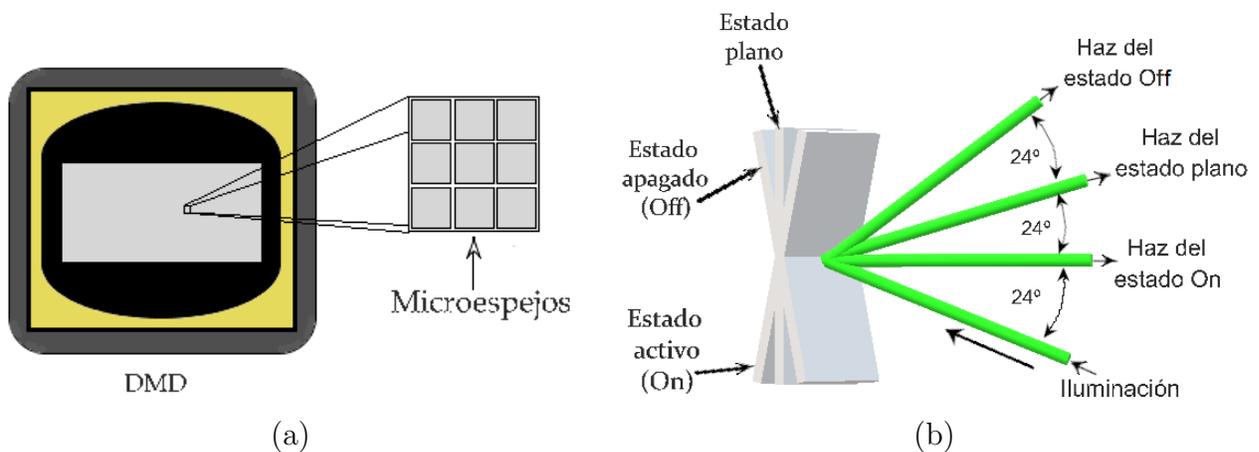
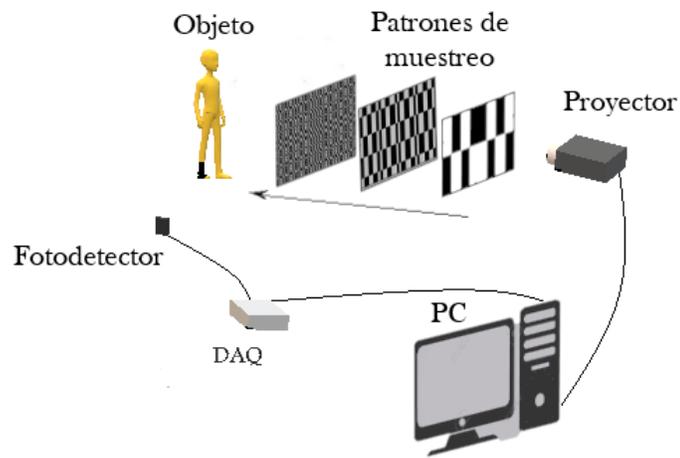


Figura 3.6: Esquema de un modulador DMD. Estos dispositivos constan de un arreglo bidimensional de pequeños microespejos (a), que pueden adoptar dos orientaciones distintas, ON u OFF (b).

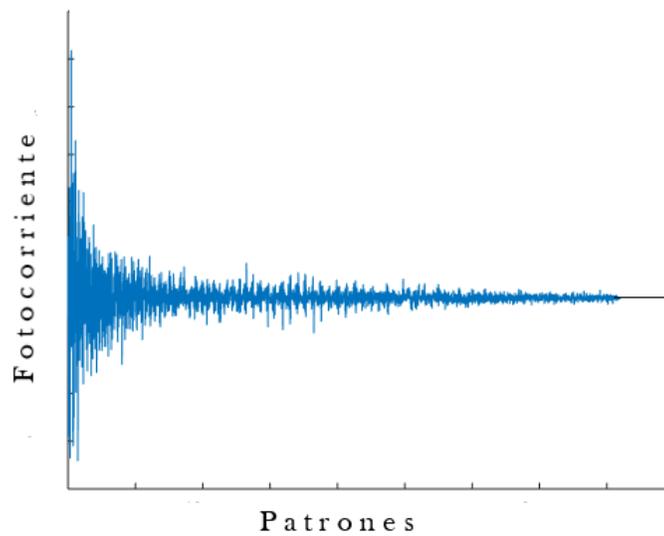
3.4. Técnica SPI con funciones de WH

Como se ha mostrado en la Sección 3.1, la técnica SPI consiste en la proyección de un conjunto de patrones de luz estructurada sobre el objeto. En la Figura 3.7(a) se muestra un esquema de un dispositivo experimental que emplea un proyector de luz basado en un DMD. Un detector de un solo píxel registra las fluctuaciones de fotocorriente. La señal es digitalizada con la ayuda de una tarjeta DAQ y se almacena en una computadora para procesarla y reconstruir la imagen del objeto. La Figura 3.7(b) muestra los valores de fotocorriente digitalizados registrados por el fotosensor.

Consideremos un objeto $O(\vec{r})$ muestreado por un conjunto de patrones (o funciones) base $p_i(\vec{r})$ con $i = 1, 2, \dots, N$. La irradiancia I_k generada por la muestra debido al k -ésimo patrón



(a)



(b)

Figura 3.7: (a) Esquema de la técnica SPI considerando luz incoherente. Se proyecta un conjunto de patrones de muestreo sobre un objeto. (b) Lecturas de fotocorriente registrados por el detector monopíxel por cada patrón.

de muestreo (registrada por un detector sin resolución espacial) es proporcional a la expresión integral [80]

$$I_k \propto \int \int |O(\vec{r})p_k(\vec{r})|^2 d^2\vec{r}. \quad (3.7)$$

Posteriormente, la imagen del objeto puede ser reconstruida por medio de una superposición lineal de las funciones de muestreo ponderadas con los respectivos valores de intensidad registrados por el detector. Este proceso podemos escribirlo analíticamente como

$$|O(\vec{r})|^2 = \sum_i I_i p_i(\vec{r}). \quad (3.8)$$

A partir de la Ecuación (3.7), se puede observar que la resolución espacial de esta técnica viene determinada por el número de patrones que se proyectan sobre el objeto. Se pueden emplear distintas funciones de muestreo como, por ejemplo, patrones de muestreo aleatorios, que son los patrones utilizados en la técnica de Ghost Imaging (GI) computacional [99]. Por otro lado, se pueden elegir patrones de muestreo deterministas, es decir, patrones que pertenecen a un conjunto de funciones base, tales como Fourier, Haar o Walsh-Hadamard [97, 98, 100].

En esta tesis empleamos funciones de Walsh-Hadamard (WH) para codificar los patrones de muestreo, que tienen la ventaja de ser funciones binarias. Sin embargo, tienen valores negativos (-1) y positivos ($+1$). La implementación de los patrones WH puede ser realizada con un SLM que modula solamente la fase, asignándole la fase cero a los valores 1 y fase π a los valores -1 . Por otro lado, puede utilizarse un modulador de amplitud, pero en ese caso la implementación de dichos patrones no es directa. Este tipo de moduladores, tal como los DMD, solo alteran la radiación en intensidades, proporcionando valores positivos, por lo que es necesario descomponer a las funciones WH en otras funciones que sí se pueden codificar. Para ello, un patrón WH puede ser expresado como la resta de dos patrones complementarios, esto es

$$\text{WH} = \text{WH}^+ - \text{WH}^-, \quad (3.9)$$

donde WH^+ se construye con la matriz WH sustituyendo los valores -1 por 0 , y WH^- es la complementaria de WH^+ . Por ejemplo, consideremos la segunda matriz WH_2 en la Ecuación (3.6)

$$\text{WH}_2 = \begin{pmatrix} +1 & -1 \\ +1 & -1 \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

que puede ser descompuesto como

$$\begin{aligned}
 \text{WH}_2 &= \begin{pmatrix} +1 & -1 \\ +1 & -1 \end{pmatrix}, \\
 &= \begin{pmatrix} +1 & 0 \\ +1 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & +1 \\ 0 & +1 \end{pmatrix}, \\
 &= \text{WH}_2^+ - \text{WH}_2^-.
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

Los patrones WH_2^+ y WH_2^- en la Ecuación (3.11) pueden implementarse con un SLM que modula la intensidad, ya que solamente contiene píxeles de transmitancia +1 o 0. Aunque para ello, experimentalmente, se requiere proyectar el doble de patrones sobre el objeto. Además, con la proyección del patrón WH_2^+ y WH_2^- se registran valores de intensidad α^+ y α^- , respectivamente. Así, la intensidad α asociada al patrón WH_2 es calculada como

$$\alpha = \alpha^+ - \alpha^-. \tag{3.12}$$

La elección de esta base proporciona varias ventajas. En primer lugar, como los patrones son funciones de una base ortogonal, la intensidad medida, I_i , proporciona directamente la proyección del objeto sobre esa base. Esto también significa que, en principio, al utilizar todas las funciones de la base, el objeto puede ser perfectamente recuperado para una frecuencia de muestreo dada. En segundo lugar, las imágenes naturales tienden a ser dispersas (*sparse*) en la base de WH, siendo por lo tanto esta base muy útil para aplicar técnicas de muestreo compresivo, como se explicará más adelante. Finalmente, al tratarse de patrones binarios, la codificación implementada en moduladores espaciales de luz es muy sencilla.

Utilizando una secuencia de N patrones WH, la imagen del objeto puede ser obtenida como una combinación lineal de patrones base de la siguiente manera

$$O = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \text{WH}_i. \tag{3.13}$$

Es importante tener en cuenta que en ausencia de ruido, utilizando una secuencia de N patrones de WH, la Ecuación (3.13) proporciona una réplica exacta del objeto con una resolución de muestreo de N píxeles. Este enfoque es muy similar a las técnicas de GI computacional [99], solo que en ese caso se utilizan patrones de muestreo aleatorios o *speckle*.

Con las cámaras single-pixel se realiza un muestreo secuencialmente en el tiempo, mediante la

proyección de una serie de patrones binarios sobre la escena. El tiempo de adquisición depende del número M_a de patrones proyectados, la frecuencia de proyección de patrones R_{SLM} y el tiempo de integración t_{int} del detector de luz, a través de la ecuación:

$$T_a = M_a \left(\frac{1}{R_{SLM}} + t_{int} \right). \quad (3.14)$$

Idealmente, el tiempo de integración debería ser lo más corto posible y la frecuencia tan alta como lo permita el proyector digital de luz. Por lo tanto, una forma de disminuir el tiempo de adquisición consiste en reducir el número de patrones que se envían. Sin embargo, hay que tener en cuenta que al reducir este número, en principio se reduce también la resolución.

3.5. Holografía con un detector de un solo píxel

El tipo de iluminación que se utiliza usualmente en la técnica de formación de imágenes con un solo píxel es incoherente, ya que suelen emplearse fuentes de luz blanca. En el caso de trabajar con luz coherente, además de modular patrones en amplitud, se pueden modular también en fase. Dichos patrones son proyectados sobre el objeto con ayuda de un SLM. En la Figura 3.8 se muestra un sistema óptico para muestrear un objeto con patrones modulados en fase. El sistema tiene una configuración similar a la del sistema óptico presentado en la Figura 2.4. Pero en esta ocasión, se emplea un SLM que proyecta los patrones de muestreo sobre el objeto y se utilizan láminas de retardo para aplicar la técnica de desplazamiento de fase en el brazo de referencia, lo que genera que cada patrón de muestreo posea una fase global distinta entre el frente de onda dispersado por el objeto y el frente de onda plano. Luego, ambos frentes de onda interfieren y una lente focaliza la luz en el detector de un solo píxel.

Si el objeto $O(\vec{r})$ es muestreado con los patrones complejos $p(\vec{r})$ y una fase ϕ es introducida en el brazo de referencia, con una distribución de amplitud $R(\vec{r})$, entonces las mediciones de irradiancia I_i correspondiente a cada patrón de interferencia puede ser expresado como [80]

$$I_{i,\phi} \propto \int \int |O(\vec{r})p_i(\vec{r}) + e^{j\phi}R(\vec{r})|^2 d^2r. \quad (3.15)$$

Por cada patrón de muestreo se registran cuatro fotocorrientes, una por cada valor de fase ($\phi=0, \pi/2, \pi$ y $3\pi/2$). Este proceso de obtención de estas mediciones de fotocorrientes es el análogo del método holográfico de desplazamiento de fase. Con la obtención de las cuatro foto-

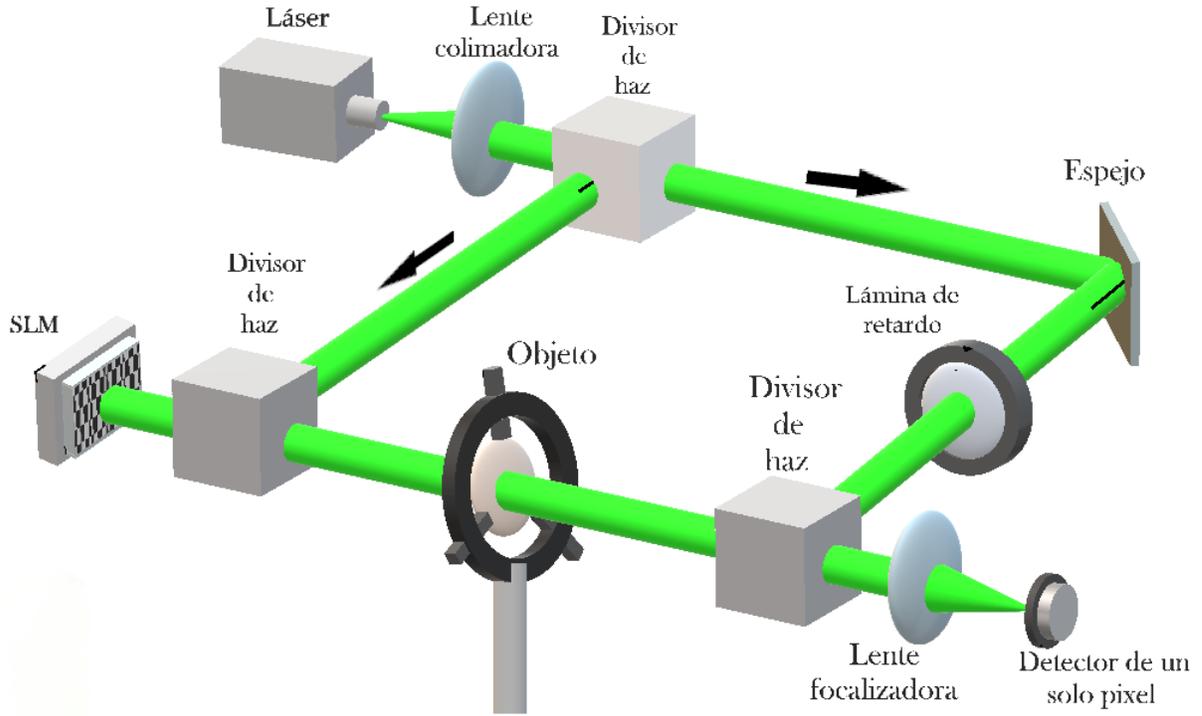


Figura 3.8: Arreglo óptico con luz coherente que permite la recuperación de la fase de un objeto con la técnica de SPI.

corrientes, se construye un coeficiente complejo C_i asociado al i -ésimo patrón de muestreo, que tiene la forma

$$C_i = \frac{1}{4|R|} [(I_{i,0} - I_{i,\pi}) + j(I_{i,3\pi/2} - I_{i,\pi/2})], \quad (3.16)$$

donde la amplitud del haz de referencia ha sido considerada como una constante. La Ecuación (3.16) es la extensión del enfoque de SPI pero añadiendo la técnica de desplazamiento de fase de la holografía digital convencional.

La distribución de amplitud compleja del objeto se recupera con la expresión

$$O(\vec{r}) = \sum_i C_i p_i(\vec{r}). \quad (3.17)$$

La reconstrucción del objeto puede ser entendida como una superposición de funciones bases ponderadas por sus correspondientes coeficientes complejos, los cuales son calculados con la Ecuación (3.16) derivados de la técnica de desplazamiento de fase. En el caso de la reconstrucción

con la técnica de SPI convencional (ver Ecuación (3.8)), los coeficientes son escalares.

3.6. Muestreo Compresivo

La teoría del muestreo compresivo (CS, Compressive Sensing) afirma que es posible reconstruir ciertas señales e imágenes a partir de un número de medidas mucho menor que el requerido por los criterios del teorema del muestreo de Shannon-Nyquist. Este teorema establece que, para la reconstrucción de una señal, la frecuencia de muestreo debe ser al menos dos veces mayor que la frecuencia más alta de la señal que se requiere reconstruir [101]. En particular, la teoría de CS establece la posibilidad de reconstruir una imagen de N píxeles con un número $M \ll N$ de medidas. La compresión de la imagen se realiza durante el proceso mismo de medida, en vez de mediante un post-procesamiento.

Matemáticamente, se puede identificar la imagen obtenida como un vector del espacio real que consta de N elementos (tantos como el número de píxeles tenga el sensor) y contiene toda la información recogida. Por otra parte, es posible expresar este vector como una combinación lineal de elementos de una base ortonormal, obteniendo

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \psi_i, \quad (3.18)$$

donde α_i son los coeficientes de la serie y $\{\psi_i\}_{i=1}^N$ son los vectores de la base (de dimensión N). Expresando la Ecuación (3.18) con notación matricial se puede trabajar de forma sencilla y útil agrupando los vectores de la base por columnas (formando una matriz de dimensión $N \times N$) y los coeficientes en un vector columna de longitud N . Los vectores columna ψ_1 son las funciones de la base ortonormal $\Psi = [\psi_1 | \psi_2 | \dots | \psi_N]$. Con esta notación la imagen se expresa como el producto entre la matriz Ψ y el vector α ,

$$\mathbf{x} = \Psi \alpha. \quad (3.19)$$

Si bien existe un gran número de bases ortonormales distintas, no todas son adecuadas para usar CS. Para que esta técnica pueda aplicarse la señal tratada debe ser *sparse*, es decir, debe admitir una representación concisa en una base adecuada de funciones, de forma que sólo un número reducido de coeficientes de la expansión es significativamente distinto de cero. Cuando una señal cumple esta condición, podemos descartar los coeficientes más pequeños sin tener una

pérdida relevante de información.

De acuerdo con lo anterior, para reconstruir la imagen de un objeto con menos medidas que las requeridas por los métodos tradicionales, bastaría con medir solo los coeficientes significativos de la imagen cuando ésta se expresa en una base adecuada. Sin embargo, se desconoce a priori cuáles son esos coeficientes. La teoría de CS afirma que si se efectúa un submuestreo aleatorio es posible recuperar la imagen con un alto grado de fiabilidad. Este submuestreo aleatorio puede realizarse de distintas maneras, según las bases de funciones que se elijan.

Proyectando un conjunto de funciones de prueba sobre el objeto podremos definir el vector \mathbf{y} , que es el parámetro que se mide experimentalmente para obtener posteriormente una imagen comprimida. Este proceso se puede escribir en forma matricial como

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x}, \quad (3.20)$$

donde \mathbf{y} es un vector columna de M elementos, \mathbf{x} es un vector columna de N elementos, y se define una nueva matriz Φ , que llamaremos matriz de muestreo. Esta matriz consta de M filas de funciones ϕ_m por N columnas. Cada medida que realizamos corresponde a la superposición de una de las funciones fila de la matriz de muestreo con el objeto bajo estudio \mathbf{x} . La intensidad detectada con el sensor de un solo píxel es proporcional al elemento correspondiente del vector \mathbf{y} . Si expresamos el objeto \mathbf{x} como en la Ecuación (3.19), podemos reescribir la Ecuación (3.20) de la forma [102]

$$\mathbf{y} = \Phi \Psi \alpha. \quad (3.21)$$

La Ecuación (3.21) nos indica que nuestro conjunto de medidas solo captura una fracción de la información total para reconstruir la imagen. Sin embargo, para que la reconstrucción de la imagen sea fiel a la original debe capturarse la suficiente información, por ello el número de medidas M no puede ser arbitrariamente pequeño, sino que presenta un límite inferior que viene dado por [102–105],

$$M > S \log N, \quad (3.22)$$

donde S es el número de coeficientes de la expansión que son significativamente distintos de cero. Puesto que el número de píxeles de la imagen es superior al número de medidas realizadas, es necesario resolver un sistema de Ecuaciones indeterminado. En consecuencia, CS exige emplear un algoritmo de optimización para elegir la mejor solución de todas las que en principio son

posibles. El algoritmo empleado se expresa de la siguiente forma:

$$\min = (\|\alpha'\|_{l_1}), \quad \text{tal que} \quad \Phi\Psi\alpha' = \mathbf{y}. \quad (3.23)$$

Es decir, se busca el vector α' de norma l_1 mínima que satisface la restricción impuesta por el conjunto de medidas experimentales. La norma l_1 de un vector es el resultado de sumar todas sus componentes en valor absoluto,

$$\|\alpha\|_{l_1} = \sum_{i=1}^N |\alpha_i|. \quad (3.24)$$

Un requisito fundamental considerado por la teoría de CS, es el grado de incoherencia de las bases Φ y Ψ . La coherencia entre dos bases $\mu(\Phi, \Psi)$ cuantifica la correlación que existe entre dos elementos cualquiera de Φ y Ψ . El rango de posibles valores es $\mu(\Phi, \Psi) \in [1, \sqrt{N}]$. Cuando la coherencia es mínima, se dice que las bases Φ y Ψ son incoherentes [106].

El rango de aplicaciones de CS es muy amplio, cubriendo áreas tales como imágenes de resonancia magnética [107], holografía [82], caracterización de moléculas, tejidos y moléculas [108–111], geofísica y sismología [112–114], reconocimiento facial [115, 116], estudios estructurales de edificaciones [117], navegación celeste [118], entre otros.

Además, las técnicas de imagen basadas en detección con un solo píxel están muy bien adaptadas para la aplicación de CS. Esta técnica permite reducir el tiempo de medida proyectando menos patrones de los que en principio serían necesarios para obtener la imagen del objeto. Basta elegir estos patrones de forma aleatoria entre el conjunto de funciones de una base de medida y, posteriormente, aplicar algoritmos iterativos de optimización, para obtener imágenes con una calidad comparable a la de las técnicas convencionales.

Capítulo 4

Registro de fase con SPI

Como se ha revisado en las anteriores secciones, las técnicas de formación de imágenes con detectores con un solo píxel pueden reconstruir la distribución de intensidades de un objeto a través de la proyección de un conjunto de patrones de muestreo. En este capítulo se se presenta el diseño de una nueva arquitectura óptica basada en las técnicas de SPI para medir la distribución de fase de un objeto. (transparente o semitransparente) empleando patrones microestructurados de fase.

Para ello, se integra un modulador de tipo DMD en un interferómetro tipo Mach-Zehnder y se utiliza para modular un frente de onda y muestrear el objeto con patrones de fase. Los patrones de muestreo son codificados en el DMD, a pesar de que se trata de un modulador binario de intensidad, mediante hologramas generados con el método de Lee, como se ha descrito en la Sección 2.3.1. Un fotodetector registra la intensidad de la luz proveniente de la superposición del haz difractado por el objeto y un haz de referencia. Una tarjeta digitalizadora DAQ A/D convierte la señal analógica en una señal digital y la fotocorriente registrada se almacena en la computadora. La imagen del objeto se calcula por medio de un algoritmo desarrollado en MatLab, que procesa los datos almacenados en la computadora y calcula la imagen de amplitud y fase del objeto.

4.1. Sistema óptico

La Figura 4.1 muestra el esquema del sistema óptico basado en un interferómetro de Mach-Zehnder modificado, diseñado para muestrear un objeto transparente con patrones codificados en fase. Un divisor de haz separa el frente de onda en dos brazos, el del haz objeto y el de referencia. La fuente de iluminación es un láser (Oxxius-532-50-COL-SLM) con una longitud de onda de 532 nm. Se emplea un DMD (DLP Discovery 4200 Texas Instruments) como modulador espacial de luz con un tamaño de píxel de $13.7 \mu\text{m}$. Además, con dos lentes, de longitudes focales de 250 y 120 mm, se implementa un sistema $4f$ en el brazo del haz objeto, con el fin de muestrear el objeto de fase con patrones Walsh Hadamard codificados en fase en los hologramas tipo Lee, como se vio en la Sección 2.3.1. El modulador DMD se sitúa a la distancia focal f_1 de la primera lente, y el objeto se coloca a la distancia focal f_2 de la segunda lente, es decir, en el plano de salida del sistema $4f$, que es el plano donde se reconstruyen los patrones de Walsh-Hadamard en fase.

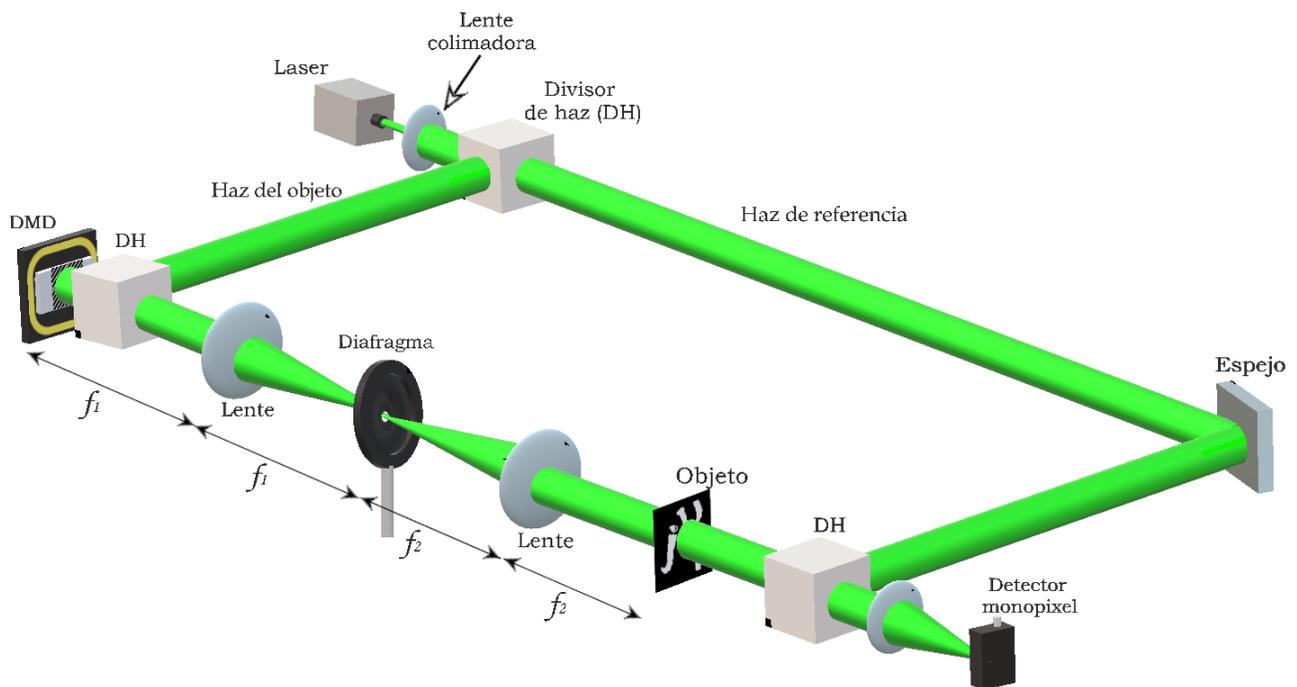


Figura 4.1: Arreglo óptico implementado para determinar distribuciones de fase de un objeto con un detector de un solo píxel.

El haz objeto ilumina la pantalla del modulador DMD, donde se despliega una secuencia de

hologramas que codifican los patrones de muestreo de fase. Los patrones de muestreo utilizados son los pertenecientes a la base de funciones de WH. El frente de onda modulado incide sobre la primera lente y despliega el espectro en frecuencia del frente de onda a la distancia focal. Un diafragma, con el tamaño adecuado, filtra el espectro dejando pasar solo el primer orden de difracción. Una segunda lente aplica una transformación de Fourier inversa, recuperando al final del sistema $4f$ la información de fase codificada previamente en el holograma. Es justamente en este plano donde se coloca el objeto para ser muestreado por los patrones de WH en fase. El frente de onda difractado por el objeto interfiere con el haz de referencia. El patrón de interferencia generado es integrado espacialmente, focalizando la intensidad del patrón de interferencia en el detector de un solo pixel. Finalmente, una tarjeta DAQ A/D convierte la señal de analógica en digital para ser procesada en la computadora.

4.1.1. Patrones Walsh-Hadamard-Lee

Los patrones de muestreo implementados son los pertenecientes a la base de patrones de WH codificados en fase en los hologramas tipo Lee (WHL). La cantidad de patrones utilizados es de 4096, que son los necesarios para reconstruir una imagen de 64×64 pixeles.

Para generar los hologramas WHL en nuestro algoritmo, reescribimos la Ecuación (2.9) del siguiente modo:

$$\mathbb{H}_i(x, y) = \frac{1}{2} [1 + \cos((x - y)\alpha_0 - \frac{\pi}{2} \text{WH}_i)], \quad (4.1)$$

donde WH_i denota los diferentes patrones de la base WH con $i = 1, 2, \dots, 4096$. Por lo tanto, el número de hologramas WHL generados es el mismo que el de patrones escogidos para la proyección. Un ejemplo de un holograma WHL se muestra en la Figura 4.2

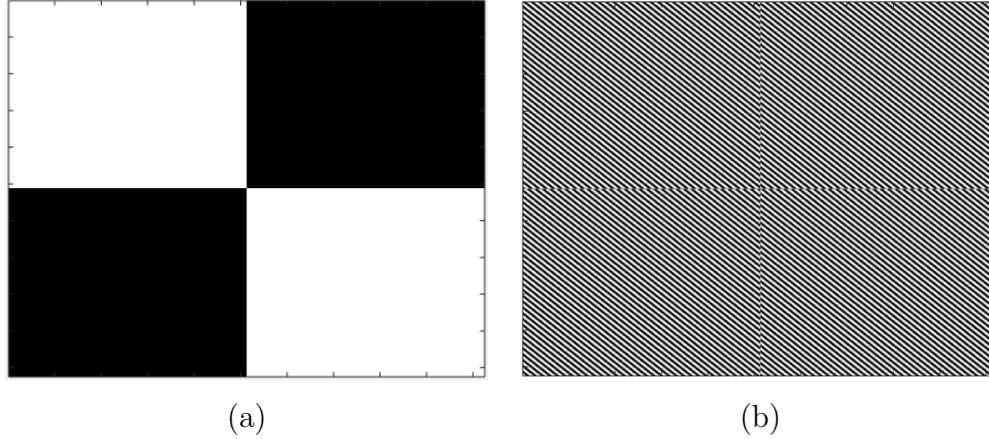


Figura 4.2: (a) Imagen de uno de los patrones WH utilizado en el proceso de registro de la imagen. El color blanco indica un valor $+1$ y el negro -1 . (b) Holograma desplegado en el DMD para codificar el patrón de fase mostrado en (a).

En el holograma que se muestra en la Figura 4.2 se puede visualizar que hay un desplazamiento en las franjas de las distintas regiones. Es este desplazamiento lo que permite la modulación de la fase del frente de onda. Este desplazamiento de las franjas se produce al sumar los distintos valores de la fase proporcionada por las funciones WH_i en el argumento de la función coseno de la Ecuación (4.1).

Por supuesto, aunque en nuestra aplicación solo vamos a generar patrones de Walsh-Hadamard, este tipo de algoritmos permite crear hologramas en los cuales podemos codificar cualquier información de fase. Igualmente, los algoritmos son fácilmente adaptables para generar cualquier distribución de amplitud compleja.

4.1.2. Muestreo con WHL y PS

Con el fin de muestrear un objeto aplicando la técnica holográfica de desplazamiento de fase (PS), para cada función de WH de muestreo de índice i se generan cuatro hologramas con una diferencia de fase de $\pi/2$ entre estos. Para ello se emplea la siguiente expresión

$$\mathbb{H}_i(x, y) = \frac{1}{2} [1 + \cos((x - y)\alpha_0 - \frac{\pi}{2} WH_i + \delta_i)], \quad (4.2)$$

donde $\delta_i = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ para el i -ésimo patrón de muestreo. En la Figura 4.3 muestra un ejemplo de cuatro hologramas WHL con distintos valores de fase. Así, para aplicar la técnica

de desplazamiento de fase, se generan cuatro hologramas WHL por cada patrón. Por tanto, el número total de hologramas utilizados para obtener una imagen de 64×64 píxeles es de 16384.

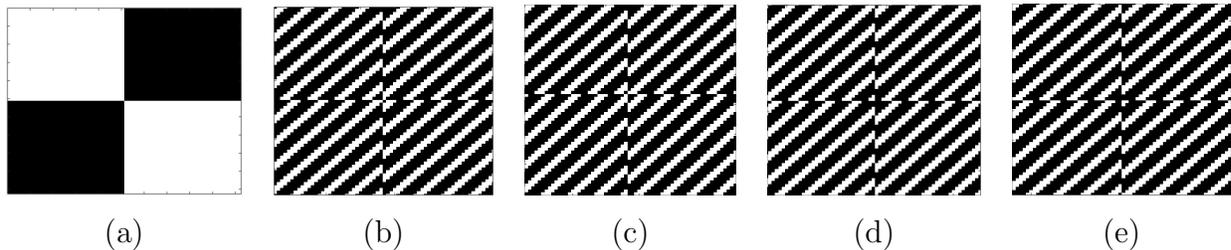


Figura 4.3: (a) Imagen de uno de los patrones WH utilizado en el proceso de muestreo. Hologramas con desplazamientos de fase de 0 (b), $\pi/2$ (c), π (d) y $3\pi/2$ (e). Para permitir una mejor visualización de las franjas en los hologramas, se ha realizado una ampliación.

La Figura 4.4 muestra como al desplegar los hologramas en la pantalla del modulador DMD, situado en el plano de entrada de un sistema $4f$, en el plano imagen o de salida se reconstruye la información de fase contenida en el holograma. Para muestrear un objeto, debemos situarlo justo en el plano imagen del sistema $4f$, donde se reconstruye la información de fase. Por cada patrón de muestreo se despliegan cuatro hologramas WHL en el DMD y se realizan cuatro mediciones de intensidad $I_{i,0}$, $I_{i,\pi/2}$, $I_{i,\pi}$, $I_{i,3\pi/2}$. Finalmente, con las Ecuaciones (3.16) y (3.17) es posible recuperar la información de amplitud y fase del objeto.

Aún cuando el número de hologramas es de 16384, para el caso de una resolución de 64×64 píxeles, la velocidad de refresco de nuestro modulador DMD (~ 22 kHz) es capaz de desplegar la totalidad de los hologramas en un tiempo del orden de segundos, una característica que los moduladores basados en cristal líquido no poseen.

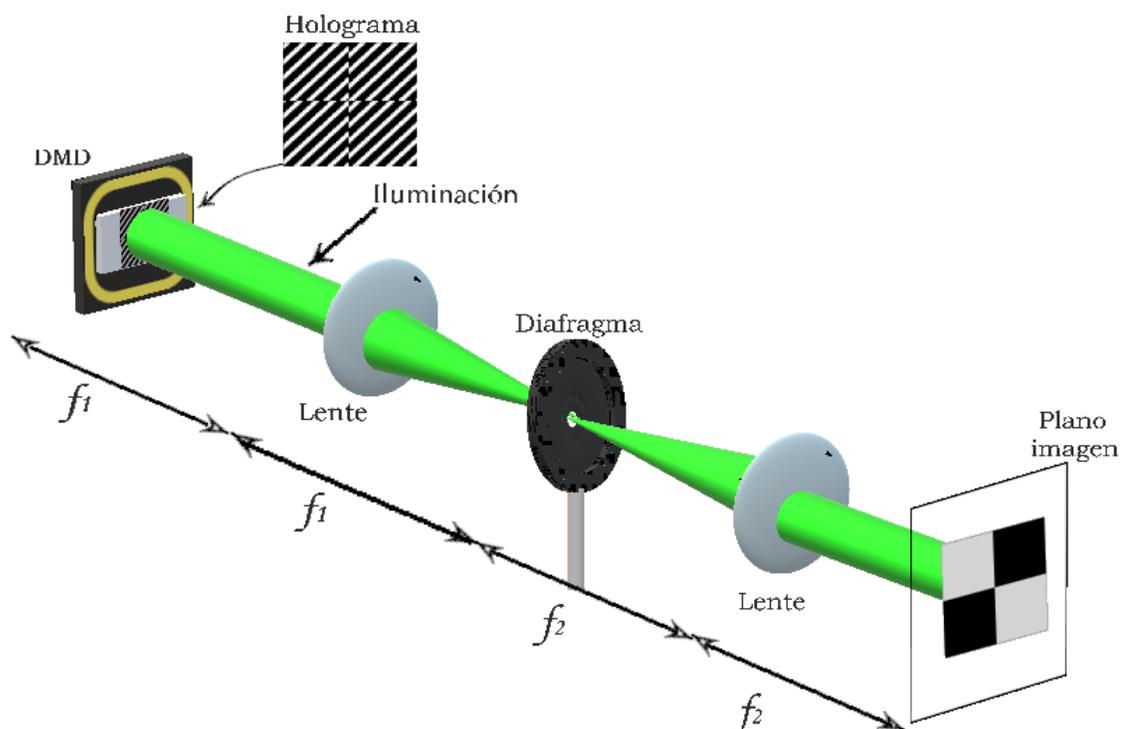


Figura 4.4: Sistema $4f$ implementado para reconstruir la información de fase codificada en cada holograma.

Dispositivo de detección

En la técnica de SPI, un detector sin resolución espacial recoge la luz difractada por el objeto para cada uno de los patrones proyectados, y proporciona una señal de fotocorriente proporcional. En los experimentos realizados se utiliza un fotodetector amplificado PDA36A-EC de silicio marca ThorLabs, sensible en el rango de longitudes de 350-1100 nm con un área de detección de 13 mm^2 (Ver Figura 4.5). Para digitalizar la señal de fotocorriente generada por el fotodiodo se utiliza una tarjeta DAQ A/D (Data AcQuisition Analog-to-Digital) de National Instruments.



Figura 4.5: Fotodiodo PDA36A-EC empleado en el dispositivo interferométrico como detector de un solo píxel.

La fotocorriente registrada por el detector y digitalizada por la tarjeta DAQ se almacena en la computadora para su posterior procesamiento. Para tener una buena correspondencia entre los coeficientes medidos para cada patrón proyectado, se ha de sincronizar el envío de los patrones con la captura del fotodiodo. Esta sincronización se puede realizar por software (enviando patrones de control) o por hardware (utilizando una señal de sincronía del DMD o de la tarjeta digitalizadora).

En el dispositivo experimental desarrollado, la velocidad de muestreo es de 2 kHz. El sistema de detección constituido por el fotodetector y la tarjeta DAQ adquiere valores a una frecuencia de 100 kHz. Por lo tanto, la intensidad generada por cada uno de los patrones se muestrea con 50 medidas. De estos 50 valores digitalizados solo se escogen 25 centrales para hacer un promedio, ya que en los valores extremos la intensidad no es uniforme debido tanto al tiempo de respuesta del fotodiodo como al movimiento de los microespejos (ver Figura 4.6). Luego, el valor promedio se toma en cuenta para el procesamiento y reconstrucción de la imagen de amplitud y fase. Con este mecanismo, obtenemos 16384 valores promedios, que son representativos de cada una de las señales debidas a todos los hologramas desplegados.

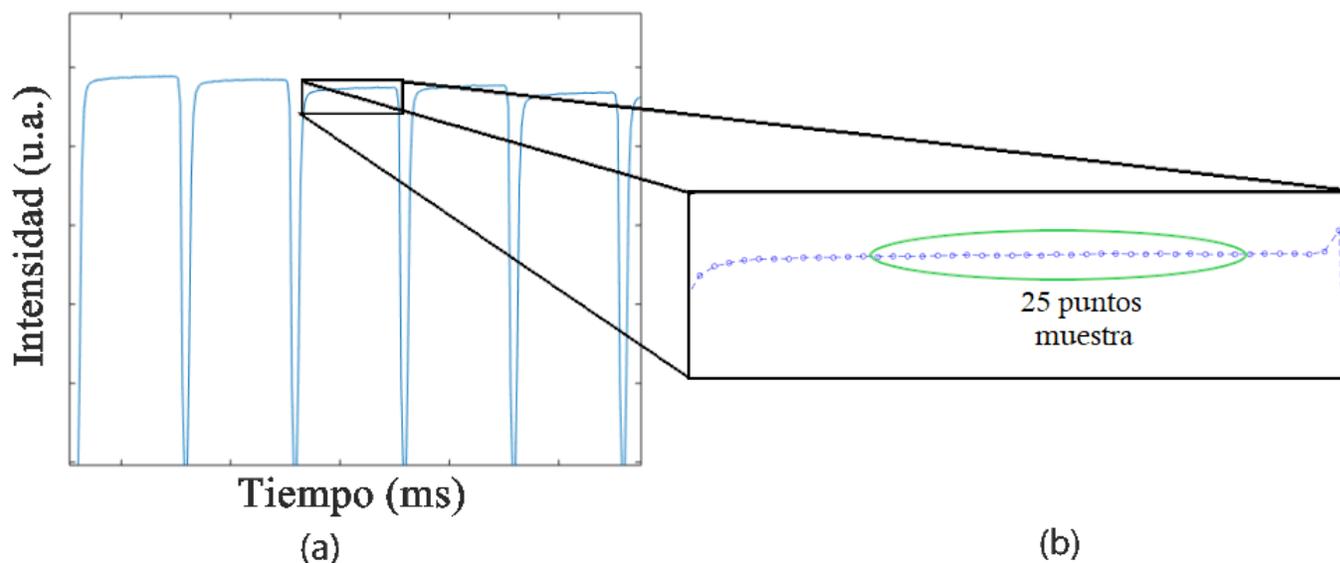


Figura 4.6: (a) Ejemplo de lectura de intensidad en función del tiempo proporcionada por el sistema de detección. Cada lóbulo corresponde a un holograma de muestreo desplegado en el DMD. (b) Se eligen 25 puntos centrales para promediar su valor y procesar la información.

4.2. Resultados

4.2.1. Caracterización de aberraciones

Cualquier aberración que posea un sistema óptico holográfico para la medida de la fase afectará a la calidad del resultado, ya que la medición de la fase es muy sensible a estas distorsiones. Sin embargo, el diseño del sistema óptico de la Figura 4.4(b) permite medir las aberraciones inducidas por los dispositivos del arreglo experimental. En esta etapa de calibración se utiliza una cámara CCD localizada en el plano del objeto del sistema interferométrico, es decir, el plano en el cual se proyectan los patrones de muestreo. Para medir las aberraciones se utiliza una técnica holográfica en eje de desplazamiento de fase (PS), desplegando en el DMD una serie de cuatro interferogramas que codifican una fase constante en cada patrón pero diferente entre ellos, como se muestra en la Figura 2.21.

En la Figura 4.7 se muestra el despliegue de los diferentes patrones de franjas en la pantalla del DMD que proyecta fases constantes sobre el sensor CCD que registra una distribución de

intensidades. Así, se registran cuatro distribuciones de intensidades I_0 , $I_{\pi/2}$, I_{π} y $I_{3\pi/2}$ en la cámara CCD, que corresponden a las distribuciones de fase 0, $\pi/2$, π y $3\pi/2$, respectivamente. En la Figura 4.8 se presentan los patrones de interferencia registradas por el sensor CCD. Como puede observarse en la figura, en lugar de una intensidad constante se obtiene un patrón de franjas de interferencia debido a las aberraciones de todo el sistema óptico, incluyendo el propio DMD. La fase de las aberraciones inducidas por el sistema se calcula con la técnica usual de PS aplicando la Ecuación (2.7).

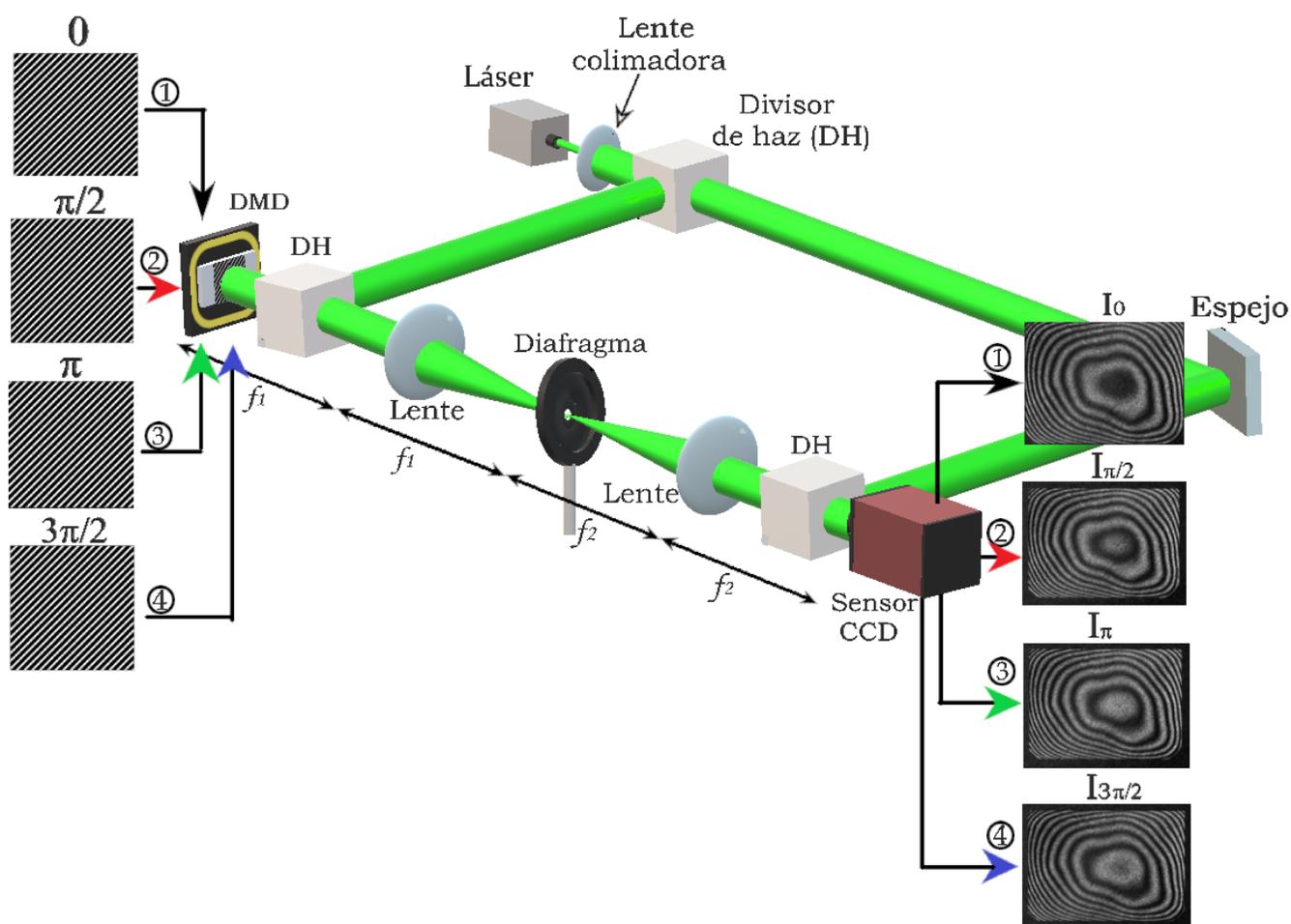


Figura 4.7: Esquema del sistema de calibración del dispositivo holográfico. La distribución de intensidad I_0 (flecha 1) sobre la cámara es producida por el despliegue del patrón de franjas que codifica una fase 0; la distribución de intensidad $I_{\pi/2}$ (flecha 2) es producido por el patrón de franjas que codifica la fase $\pi/2$; y así sucesivamente.

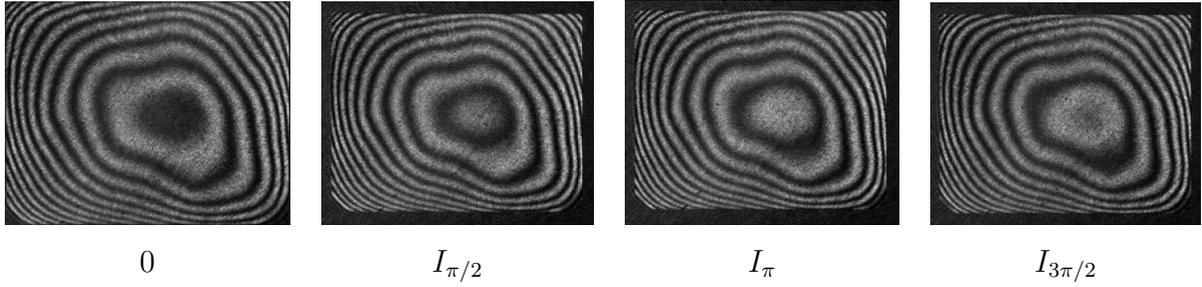


Figura 4.8: Distribuciones de intensidades sobre el sensor CCD producidas por los patrones de franjas que codifican los valores de fase de 0 , $\pi/2$, π y $3\pi/2$ en el plano del objeto.

De acuerdo con la técnica de PS vista en la Sección 2.2.1, la información de fase de las aberraciones θ_{ab} se calcula con la siguiente expresión, similar a la representada en la ecuación 2.7, es decir, la Ecuación 4.3. Esta fase calculada representa las distorsiones de fase inducidas por los elementos ópticos del sistema. Cabe notar que se las cuatro distribuciones de intensidades sobre el sensor CCD se registran en ausencia del objeto.

$$\theta_{ab} = \tan^{-1} \left(\frac{I_{3\pi/2} - I_{\pi/2}}{I_0 - I_\pi} \right). \quad (4.3)$$

La Figura 4.9 muestra la fase de las aberraciones inducidas por el sistema óptico medidas con el sistema óptico holográfico experimental esquematizado en la Figura 4.7 empleando la técnica holográfica en eje de desplazamiento de fase.

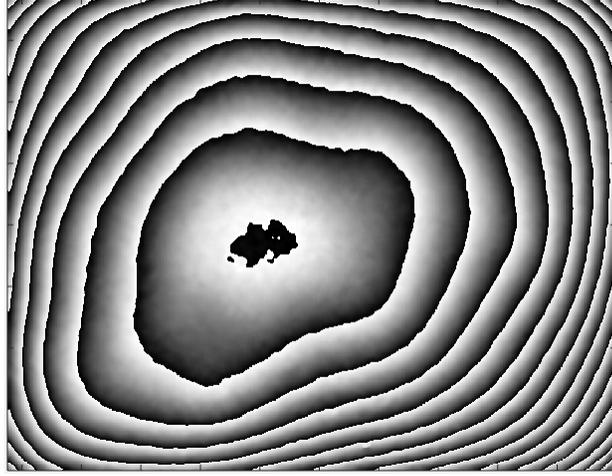


Figura 4.9: Fase de las aberraciones medidas experimentalmente con el sistema óptico esquematizado en la Figura 4.7.

Una vez caracterizada la fase de las aberraciones, es posible compensarlas o contrarrestarlas, para que las mediciones posteriores no se vean afectadas. La compensación se lleva a cabo incorporando el valor complejo conjugado de la fase de distorsión θ_{ab}^* en el holograma, y reescribiendo la Ecuación (4.1). De este modo, se obtiene el holograma

$$\mathbb{H}_i(x, y) = \frac{1}{2} [1 + \cos((x - y)\alpha_0 + \delta_i + \theta_{ab}^*)], \quad (4.4)$$

donde $\delta_i = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$. La Figura 4.10 muestra la imagen de un patrón de franjas con la información de fase de distorsión θ_{ab} incorporada y compensada, que generaría una distribución de fase constante sobre el plano del objeto.

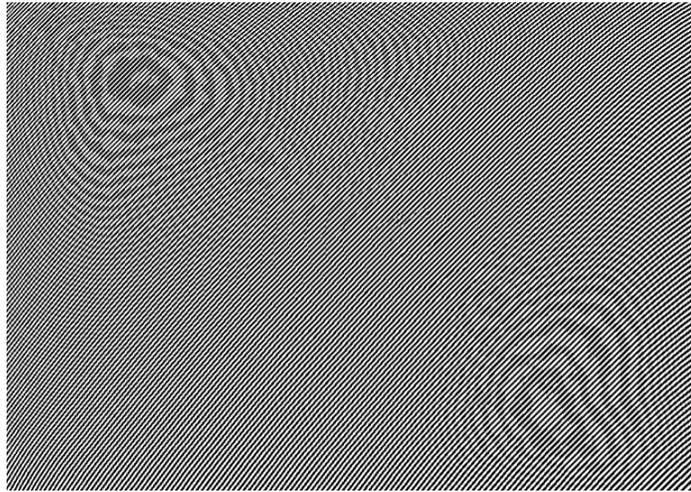


Figura 4.10: Patrón de franjas corregido con la información de fase de las aberraciones del sistema óptico. Al codificarlo en el DMD, genera una fase uniforme en el plano del objeto.

Una vez que se ha calculado la fase de la aberración del sistema, la compensación se considera en todas las proyecciones de patrones codificados con CGHS en el DMD. De este modo, podemos proyectar cualquier distribución de fase sobre el plano del objeto sin que se vea afectada por las distorsiones de fase provocadas por los dispositivos ópticos. La Figura 4.11(a) muestra un holograma de un patrón WH codificado en fase sin la compensación de las aberraciones, y su correspondiente imagen registrada por la cámara en el plano del objeto, Figura 4.11(b). La distribución de fase se hace visible en la cámara gracias a la interferencia con el haz de referencia. En la Figura 4.11(c) y 4.11(d) se muestran el holograma considerando la compensación del sistema y la reconstrucción de fase registrada en la cámara, respectivamente. Aunque estos resultados se obtuvieron con el sistema óptico de la Figura 4.7 utilizando un sensor basado en una matriz de píxeles, es posible realizar el mismo procedimiento utilizando un detector con un solo píxel, como se demostrará mas adelante.

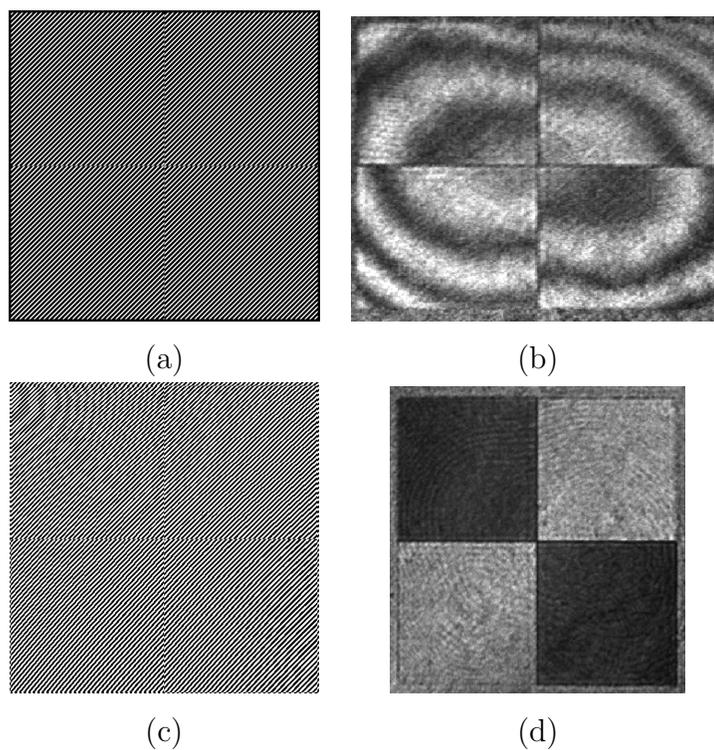


Figura 4.11: (a) Holograma que codifica un patrón WH en fase sin compensación de aberraciones y (b) la imagen registrada en la cámara. (c) El mismo holograma con la compensación y (d) la imagen capturada por la cámara.

El sistema óptico diseñado para medir las aberraciones se ha utilizado también para obtener la información de fase de un objeto. En el experimento realizado, el objeto es una resina transparente con un espesor no uniforme depositada sobre un substrato de vidrio, lo que genera variaciones locales de la fase. En la Figura 4.12 se muestra una imagen de la fotorresina empleada.

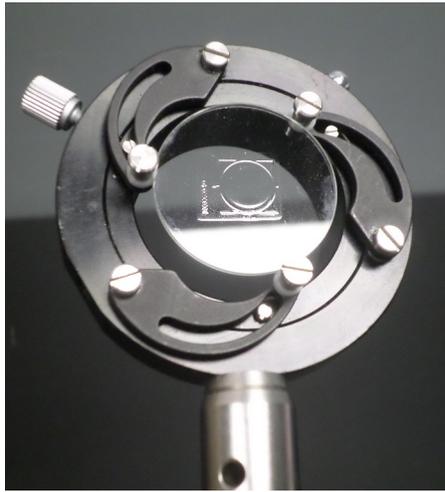


Figura 4.12: Resina.

Para obtener la distribución de fase de la muestra, esta se coloca justo en el plano imagen del DMD, es decir, al final del sistema $4f$, como se muestra en la Figura 4.13. Para realizar las medidas, se despliegan cuatro hologramas con patrones de franjas que codifican distintos desplazamientos de fase, esto es, 0 , $\pi/2$, π y $3\pi/2$. Los hologramas incorporan la corrección de aberraciones medidas en el proceso de calibrado y, por lo tanto, proyectan distribuciones de fase uniformes sobre el objeto. La distribución de intensidades generada por la interferencia entre el haz objeto y el haz de referencia se registra con la cámara CCD para cada desplazamiento de fase. Esto es, se obtienen las distribuciones de intensidad I_0 , $I_{\pi/2}$, I_{π} y $I_{3\pi/2}$.

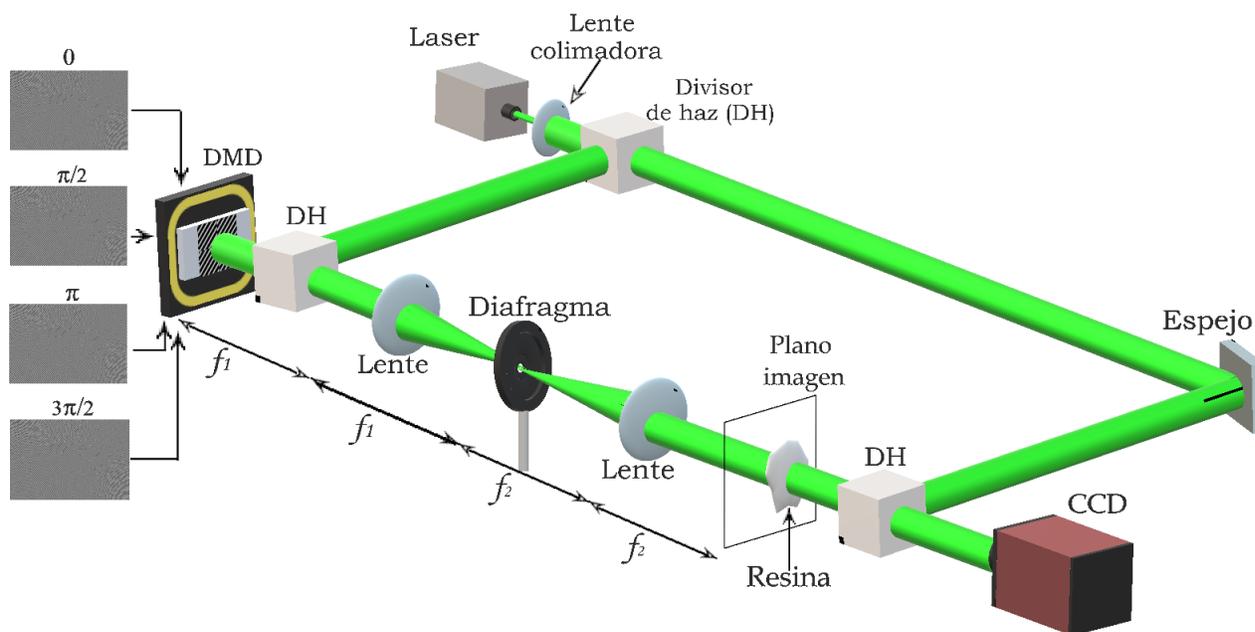


Figura 4.13: La resina se sitúa en el plano imagen.

Para calcular la distribución espacial de fase de la resina se aplica la técnica de desplazamiento de fase usando la Ecuación (4.3). La información obtenida se muestra en la Figura 4.14.

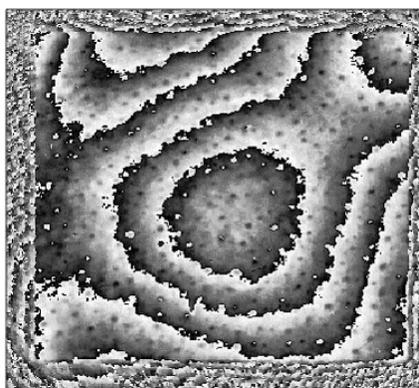


Figura 4.14: Distribución de fase medida con el sistema holográfico de la Figura 4.13.

En esta sección, se ha descrito la caracterización de la fase de las aberraciones del sistema así como la fase de una resina por medio de una cámara CCD. En la siguiente sección se aplica la técnica de SPI que utiliza un detector sin resolución espacial.

4.2.2. Recuperación de la fase con un detector de un solo píxel

En esta sección se describe el método de formación de imágenes de un solo píxel (SPI) utilizando patrones WH codificados en fase mediante hologramas tipo Lee (WHL), y aplicando el método de desplazamiento de fase (PS) con una diferencia de fase de $\pi/2$. A este método le hemos denominado SPI-WHL-PS, con el fin de abreviar las diferentes técnicas implementadas. En la Figura 4.15 se ilustra un esquema óptico para la implementación experimental del método. Cada uno de los patrones de muestreo de la base WH se codifica con cuatro hologramas tipo Lee (WHL). Estos hologramas tienen un desplazamiento de fase de 0 , $\pi/2$, π y $3\pi/2$, respectivamente y son desplegados en la pantalla del modulador DMD. De esta manera se obtienen los cuatro valores de intensidad, I_0 , $I_{\pi/2}$, I_{π} e $I_{3\pi/2}$, los cuales son necesarios para reconstruir la imagen de amplitud y fase del objeto. La generación de los patrones WHL se lleva a cabo con la Ecuación (4.2).

En nuestro caso utilizamos 4096 patrones WH, que son los necesarios para recuperar una imagen de 64×64 píxeles. Por tanto, se despliegan un total de 16384 hologramas WHL en el modulador espacial DMD. En el proceso de calibración inicial, se despliegan todos los hologramas WHL en ausencia del objeto para obtener la fase de las aberraciones del sistema óptico, incluyendo irregularidades en la superficie del DMD y la inhomogeneidad del haz de referencia. En la Figura 4.16 se muestra la distribución de fase de la aberración asociada al sistema óptico, caracterizada experimentalmente con el sistema holográfico de proyección de luz con fase estructurada y el detector de un solo píxel.

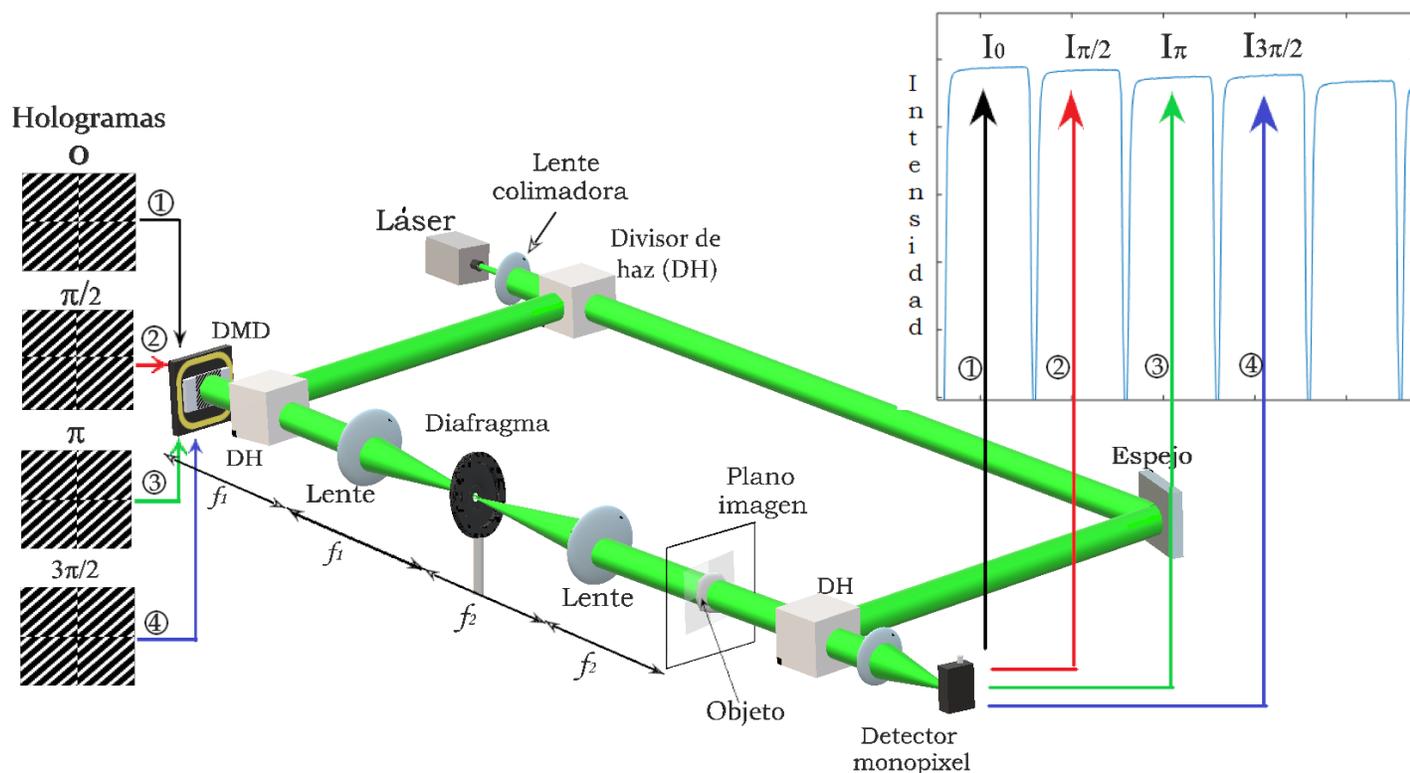


Figura 4.15: Esquema del método holográfico de adquisición de imágenes complejas SPI-WHL-PS. Las figuras a la izquierda muestran un ejemplo de los cuatro hologramas que son desplegados en el DMD, por cada uno de los patrones de muestreo WH ($N = 4096$). La gráfica a la derecha muestra la señal de fotocorriente para los patrones de muestreo generados por los cuatro hologramas. El holograma con valor de fase de 0 , produce una intensidad I_0 (línea 1); otro holograma con valor de fase de $\pi/2$, produce una intensidad $I_{\pi/2}$ (línea 2); lo mismo ocurre para los hologramas de valor de fase π y $3\pi/2$ que producen las intensidades I_{π} (línea 3) y $I_{3\pi/2}$ (línea 4). Este procedimiento se repite para cada uno de los patrones de luz estructurada que muestrean el objeto.

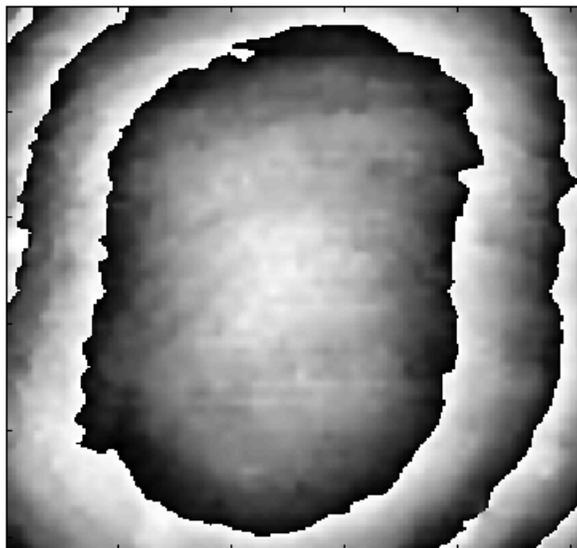


Figura 4.16: Imagen de las distorsiones de fase inducidas por el sistema óptico medida experimentalmente con el sistema óptico de la Figura 4.15 en ausencia de objeto. Los niveles de gris indican fase de 0 (negro) a 2π (blanco).

La fase de las distorsiones es incorporada y compensada en los hologramas WHL, de lo contrario, la medición de la fase de un objeto se vería afectada por estas distorsiones. Otra alternativa para compensar las distorsiones se puede llevar a cabo midiendo la imagen de fase del objeto sin compensar las aberraciones ópticas del sistema. Luego, por medio de un programa computacional, sustraemos a la imagen de fase obtenida de las distorsiones que fueron calculadas previamente, produciendo de este modo una imagen de fase del objeto solamente.

Una vez realizada la compensación de fase de las aberraciones con un detector con un solo píxel, se procede a muestrear un objeto, por ejemplo, la resina que se empleó en la subsección anterior, presentada en la Figura 4.12. La Figura 4.17 muestra la distribución de fase de la resina calculada con el método SPI-WHL-PS.

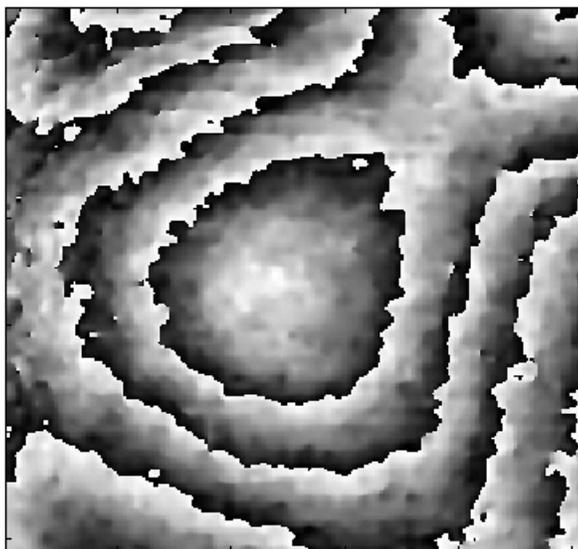


Figura 4.17: Distribución de fase de la fotorresina mostrada en la Figura 4.12 obtenida experimentalmente con el sistema óptico de la Figura 4.15 empleando luz estructurada y el detector de un solo píxel.

Imagen de un objeto de fase a través de un medio difusor

Un problema que ha atraído durante mucho tiempo la atención de los científicos en el campo de la imagen óptica es el de ver objetos ocultos por medios turbios, como humo, niebla o tejido biológico. En medios muy turbios, la falta de homogeneidad del índice de refracción a diferentes escalas produce aberraciones del frente de onda y una dispersión múltiple que da como resultado una distribución aleatoria de los fotones. En los últimos años se han desarrollado nuevos métodos relevantes para la obtención de imágenes a través de medios de dispersión, especialmente en el campo de la óptica biomédica [119–121].

La mayoría de los métodos desarrollados para la obtención de imágenes de alta resolución a través de medios turbios se basan en la detección únicamente de fotones balísticos, rechazando los que se han dispersado de forma múltiple. Esta idea se utiliza en muchas técnicas de imagen como la tomografía de coherencia óptica [122], la microscopía multifotónica [123] o el filtrado de Fourier [124]. La luz altamente dispersada también se puede utilizar para obtener imágenes a profundidades muy grandes, pero a costa de una resolución espacial más baja. Este es el caso de los métodos de formación de imágenes ópticas con luz difusa [125].

Recientemente se han propuesto métodos eficaces basados en el control de los frentes de onda con moduladores espaciales de luz programables [126]. Aprovechan la enorme cantidad de grados

de libertad espacial de la luz incidente. Algunas técnicas se basan en el efecto memoria, inherente a los patrones de speckle generados por la dispersión de los fotones [43]. Otros enfoques incluyen el control de frente de onda mediante optimización iterativa [42], la conjugación de fase [127] o la medición de la matriz de transmisión del medio [128]. En cualquier caso, las soluciones funcionan en situaciones muy concretas, o requieren una caracterización previa del medio.

Recientemente, se ha demostrado que los sistemas de imágenes basados en detección con un solo píxel pueden proporcionar imágenes de objetos a través de medios turbios. Este enfoque se ha demostrado incluso en el caso de medios difusores dinámicos y con objetos incrustados en el medio turbio [68, 69]. En este proyecto de tesis, hemos comprobado que la idea también puede aplicarse en las técnicas de holografía que emplean luz estructurada y detección con un solo píxel.

Para comprobar de manera experimental la tolerancia al scattering del sistema de holografía con detector de un solo píxel, emplearemos un difusor entre el objeto y el sistema de detección. El difusor escogido para la prueba es un difusor comercial con un ángulo de difusión de 25° (# 54-499 de Edmund Optics). Este material dispersa la luz en diferentes direcciones de manera aleatoria con una distribución del ángulo de dispersión con una anchura de 25° a media altura (FWHM). Si observamos un objeto a través de este tipo de material, como se aprecia en la Figura 4.18, se obtiene una imagen borrosa en la que es imposible apreciar detalles. Por supuesto, en el caso de un objeto de fase, es imposible obtener una imagen con métodos convencionales, ya que la fase quedaría totalmente enmascarada por el comportamiento aleatorio del difusor.



Figura 4.18: Difusor holográfico empleado en el experimento de imagen holográfica a través de un medio turbio. No es posible observar un objeto a través del difusor con métodos convencionales.

Para nuestro experimento, colocamos el difusor entre el objeto y el sistema de detección, como se muestra en la Figura 4.19 y se procede a aplicar el método SPI-WHL-PS.

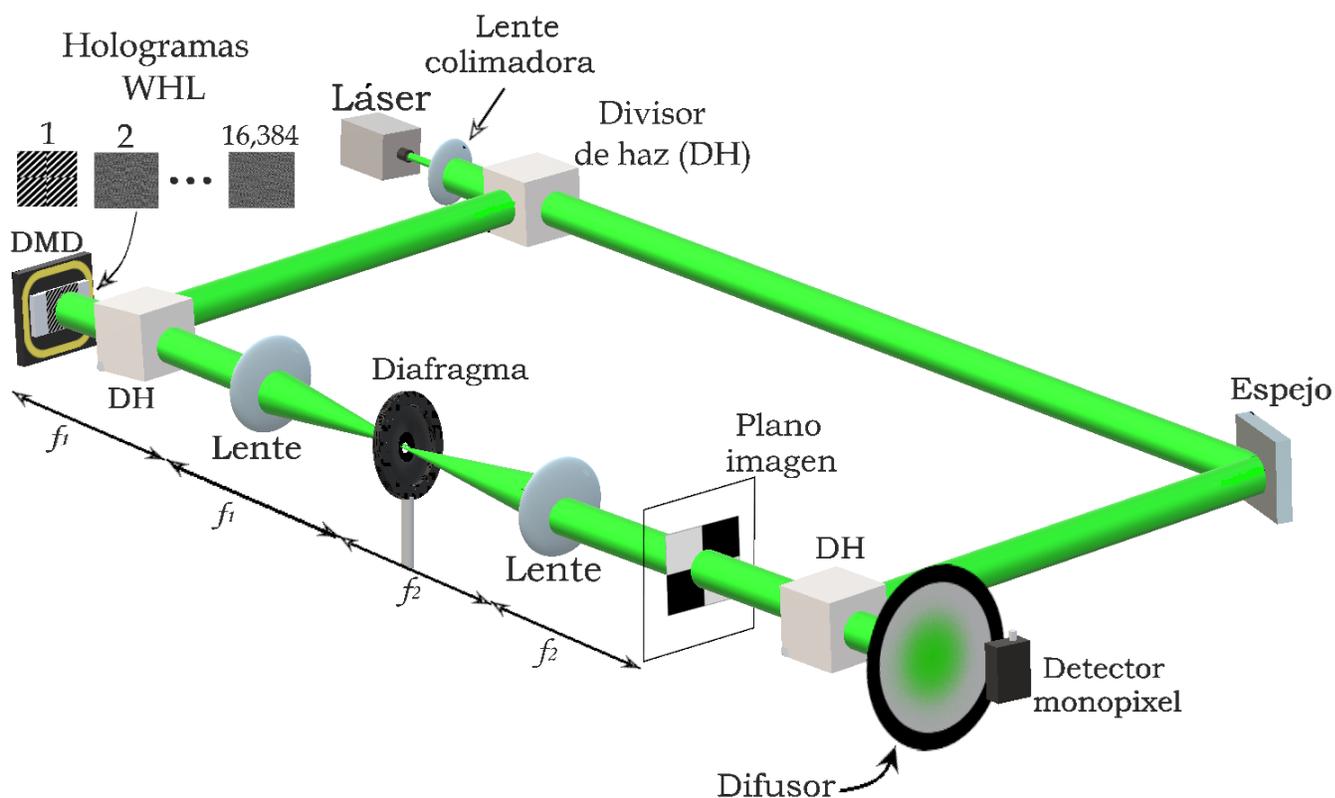


Figura 4.19: Esquema del método holográfico de adquisición de imágenes complejas con luz estructurada y detección de un solo píxel con un difusor enfrente del del fotodiodo.

En la Figura 4.20 se presenta la información de fase obtenida con el sistema óptico holográfico con luz estructurada y detección de un solo píxel representado en la Figura 4.19.

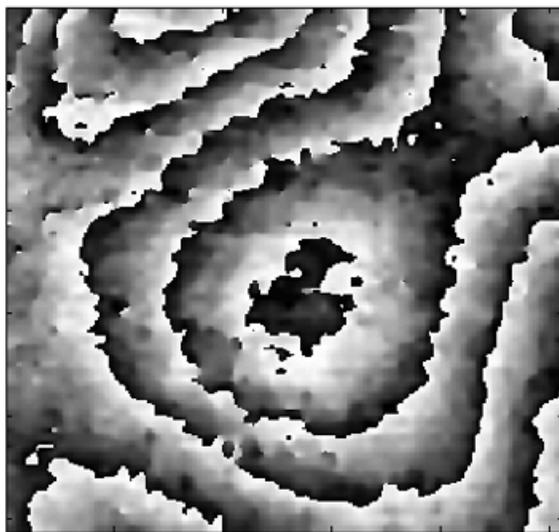


Figura 4.20: Distribución de fase de la fotorresina mostrada en la Figura 4.12 obtenida experimentalmente con el sistema óptico de la Figura 4.19, que incluye un difusor enfrente del fotodiodo.

Como se observa en el resultado obtenido en la Figura 4.20, pese a que un difusor se localiza enfrente del fotodiodo, es posible recuperar la información de fase del objeto. Esta es una característica que diferencia a la técnica de SPI frente a las técnicas de imagen convencional con sensores de CCD, ya que no es sencillo recuperar información de fase cuando el difusor está situado entre el objeto y el sensor CCD.

En el caso del sensor CCD, el difusor distorsiona la imagen del objeto con una respuesta aleatoria, lo que genera una imagen compuesta básicamente por ruido o *speckle*. Sin embargo, en el sistema de formación de imágenes con luz estructurada y un solo píxel, la imagen se reconstruye computacionalmente a partir de una combinación lineal de los patrones proyectados pesados por la intensidad de la luz difractada por el objeto. Es decir, para reconstruir la imagen, solo es necesario conocer el valor de la intensidad luminosa que atraviesa el objeto. Aunque la presencia del difusor desordena la información, el detector seguirá midiendo una señal proporcional a la intensidad medida sin el difusor. Por lo tanto, en estas condiciones sigue siendo posible reconstruir la imagen del objeto al otro lado del difusor.

También, se comprobó que el sistema holográfico con detección de un solo píxel desarrollado en la tesis es capaz de obtener la amplitud y la fase de una muestra biológica. Para evidenciarlo, se eligió una ala de libélula como objeto. En la Figura 4.21 se muestra una fotografía del ala utilizada en el experimento.

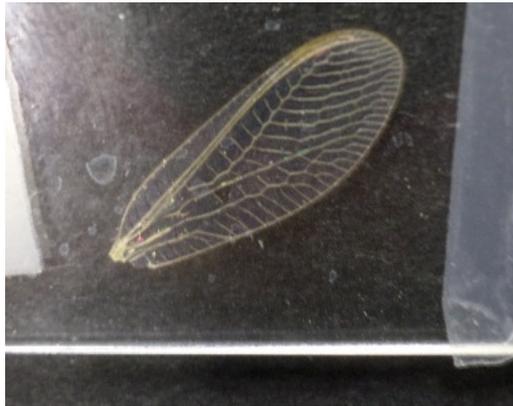


Figura 4.21: Ala de libélula empleada como objeto en el experimento de imagen holográfica.

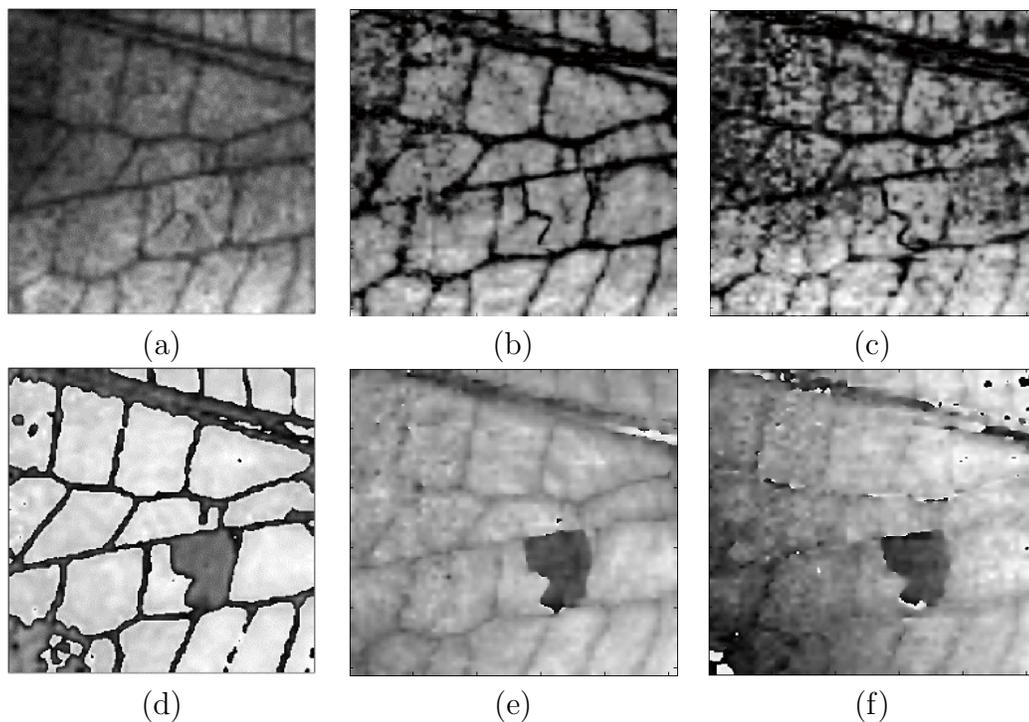


Figura 4.22: Imágenes de la amplitud y fase de un ala de libélula obtenidas con métodos holográficos. En (a) y (d) se muestra la amplitud y la fase, respectivamente, registrados con un sistema holográfico convencional con un sensor CCD. En (b) y (e) se muestra la distribución de amplitud y la fase, respectivamente, usando el sistema holográfico con luz estructurada y detección mediante un simple un fotodiodo. En (c) y (f) se muestra la distribución de amplitud y la fase, respectivamente, usando el sistema óptico holográfico con luz estructurada y un fotodiodo con un difusor entre el objeto y el detector.

En la Figura 4.22 se presenta la información tanto de amplitud y de fase de una ala de libélula

obtenida con un sistema holográfico de desplazamiento de fase cuando se usa un sensor CCD y un detector de un solo píxel, este último, con y sin difusor situado enfrente del fotodiodo.

En este capítulo se ha demostrado que es posible obtener la amplitud compleja de un objeto utilizando un modulador espacial de luz que solo modula amplitud y un detector con un solo píxel. El sistema óptico implementado es un interferómetro de Mach-Zehnder al que se ha acoplado un modulador de tipo DMD. El dispositivo permite muestrear el objeto con patrones WH codificados en fase por medio de hologramas de Lee registrados en el DMD. Dicho muestreo es llevado a cabo en el plano imagen del DMD por medio de un sistema de formación de imágenes $4f$ con filtraje en el plano de Fourier intermedio.

Aún cuando se utiliza un modulador de solo amplitud, el sistema óptico es capaz de modular la fase. Tal propiedad hace posible aplicar la técnica de desplazamiento de fase con la misma técnica holográfica basada en el método de Lee. A pesar de que la cantidad de hologramas es de 16384, la velocidad de refresco del modulador (22 kHz) permite que se desplieguen los patrones en un tiempo de alrededor de 8 segundos, algo que no puede lograrse con moduladores basados en cristal líquido, con los cuales el tiempo de muestreo podría llegar a ser del orden de minutos.

El sistema óptico diseñado y construido es capaz de medir la fase de las distorsiones debidas a los dispositivos utilizados. Esto se logra proyectando los patrones de luz estructurada en ausencia del objeto. Esta información sobre la distorsión es incorporada en los hologramas de Lee, de tal manera que se compensan las aberraciones, convirtiendo al arreglo óptico en un sistema adaptativo.

Una característica importante del sistema es que permite la reconstrucción de la imagen del objeto en presencia de un medio difusor entre el objeto y el detector. Esta cualidad nos permite “ver” a través de medios difusores o de *scattering*. Se ha comprobado experimentalmente que, en efecto, el sistema es robusto ante materiales difusores.

La implementación de un sistema $4f$ en el interferómetro permite proyectar los patrones de muestreo sobre el objeto de tal manera que no es necesario aplicar alguna clase de algoritmo de propagación adicional para calcular la amplitud compleja del objeto muestreado, lo cual evita procedimientos de postprocesamiento adicionales en la reconstrucción de las imágenes de amplitud y fase del objeto.

Capítulo 5

Método SPI-WHL-PS con un detector balanceado

Una de las características que debe evaluarse al estudiar un método holográfico es la rapidez con la que las mediciones son realizadas [138]. Y es que hay una gran variedad de fenómenos o procesos que cambian constantemente como, por ejemplo, variaciones moleculares en algunos materiales, cambios repentinos en gases o líquidos y cambios en la morfología de un material con algún grado de viscosidad. Así, obtener la imagen de fase de un objeto que cambia con rapidez es un reto que se presenta con frecuencia. Puesto que las técnicas de imagen con luz estructurada y detección con un solo píxel se basan en el muestreo del objeto con una secuencia de patrones luminosos, el proceso de medida requiere de cierto tiempo. Este es, de hecho, el principal inconveniente de la técnica. Por ello, esta abierta la investigación para reducir el tiempo de medida de los métodos holográficos basados en SPI.

A continuación describiremos una técnica para mejorar la velocidad de adquisición de las medidas del método SPI-WHL-PS. La técnica se basa en la siguiente característica del sistema. Para un holograma desplegado en el DMD, se generan dos haces de luz a la salida del sistema, a través del último divisor de haz (DH), como se muestra en la Figura 5.1(a). Los haces en cada salida del divisor de haz generan interferogramas que son complementarios el uno del otro en el siguiente sentido: si en una de las salidas, el haz objeto y el haz de referencia interfieren con una determinada diferencia de fase entre ellos, en la otra salida, el haz objeto y el haz de referencia interfieren con una diferencia de fase adicional de π radianes.

La Figura 5.1(b) muestra los dos interferogramas en las respectivas salidas del último DH,

constituidos por franjas claras y oscuras. Las franjas claras del patrón de interferencia de la izquierda son oscuras en el patrón de interferencia de la derecha. Esto significa que, por cada holograma WHL codificado en el DMD, se produce en cada salida del divisor de haz, dos haces. En una de las salidas se superponen el haz objeto y el haz de referencia con una diferencia de fase entre ellos que depende del patrón de fase proyectado por el holograma sobre el objeto y la propia fase del objeto. En la otra salida del divisor de haz, se superponen también el haz objeto y el haz de referencia con esa misma diferencia de fase y una diferencia de fase adicional de π radianes. En el Capítulo 4, las mediciones de intensidad correspondientes a la proyección de los patrones de muestreo sobre el objeto se realizaron teniendo en cuenta solo una de las salidas, lo que obligaba a desplegar cuatro hologramas WHL para obtener cuatro valores de intensidad, I_0 , $I_{\pi/2}$, I_π e $I_{3\pi/2}$. Si consideramos las dos salidas del divisor de haz, para un holograma WHL con un valor del desplazamiento de fase de 0 se obtienen en las salidas de divisor de haz dos valores de intensidad, I_0 e I_π . Para ese mismo holograma pero con un valor del desplazamiento de fase de $\pi/2$, obtienen en las salidas del divisor de haz dos valores de intensidad, $I_{\pi/2}$ e $I_{3\pi/2}$. En consecuencia, con solo desplegar dos hologramas (y no cuatro como en capítulo previo), es posible obtener los cuatro valores de intensidad, que son necesarios para formar el coeficiente complejo de la Ecuación (3.16).

Con el fin de registrar simultáneamente los dos haces de salida se utiliza un dispositivo de detección que permite caracterizar ambos haces y proporciona una mayor eficiencia al sistema. Se trata de un detector balanceado. Esta clase de detectores consiste en dos fotodiodos acoplados con una área de detección grande y con ruido muy bajo. Cada uno de los fotodiodos del detector balanceado registra la intensidad de los dos haces de salida del sistema óptico y genera una salida de voltaje que es la diferencia de las lecturas de los dos fotodiodos (canal RF). También, es posible obtener la lectura de los fotodiodos de manera individual, ya que este detector tiene dos canales más para este fin, un canal positivo “+” y otro negativo “-”, como se muestra en la Figura 5.2.

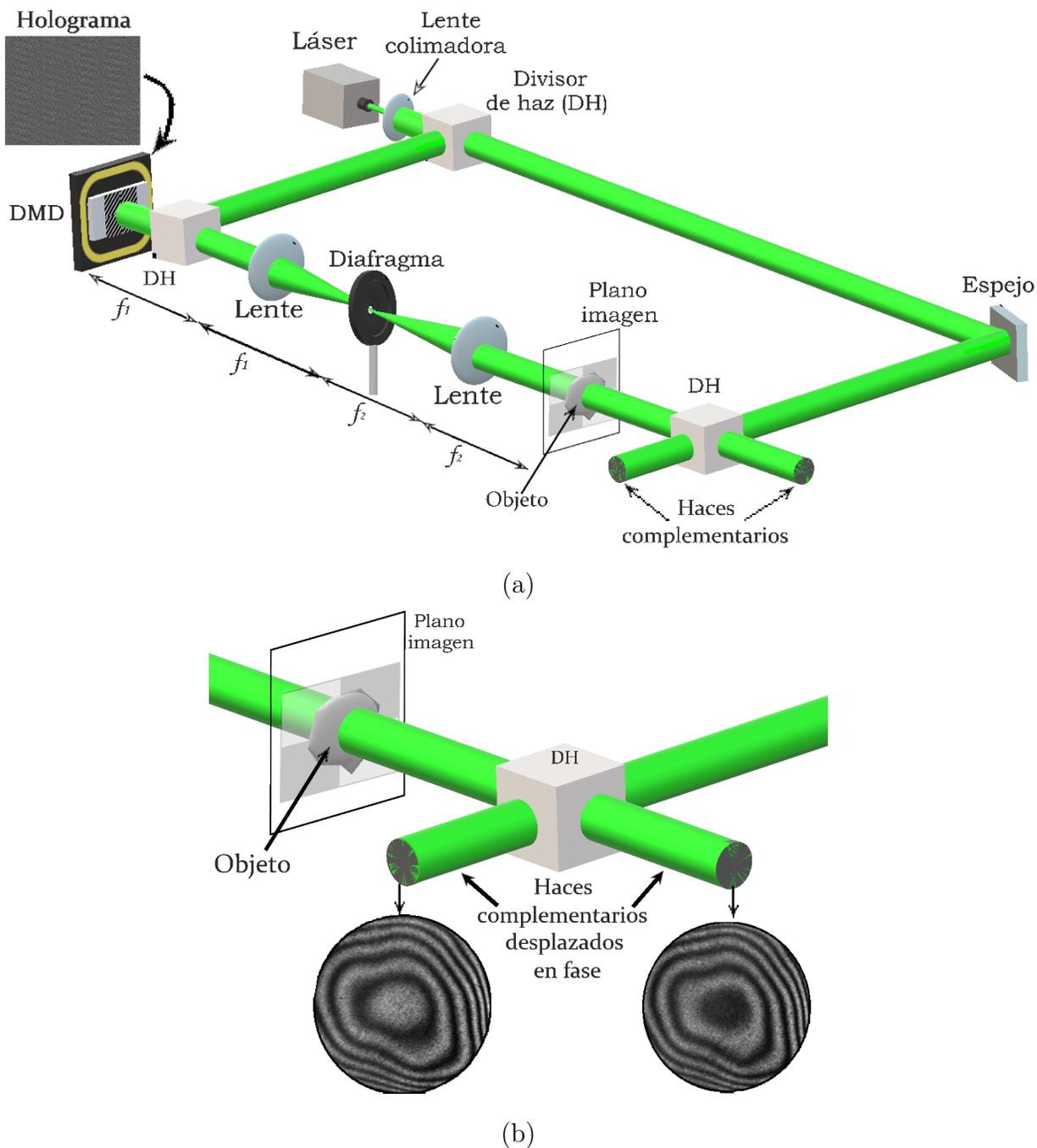


Figura 5.1: (a) Esquema del sistema de holografía digital con detección de un solo píxel en el que se realizan medidas en los dos haces complementarios a la salida del último divisor de haz. (b) Imágenes de los interferogramas obtenidos a la salida del sistema con una cámara digital. Se aprecia que ambos patrones están generados por la interferencia entre haces de luz que tienen una diferencia de fase complementaria de π radianes, esto es, las franjas claras del patrón de interferencia de la izquierda son oscuras en el patrón de interferencia de la derecha.

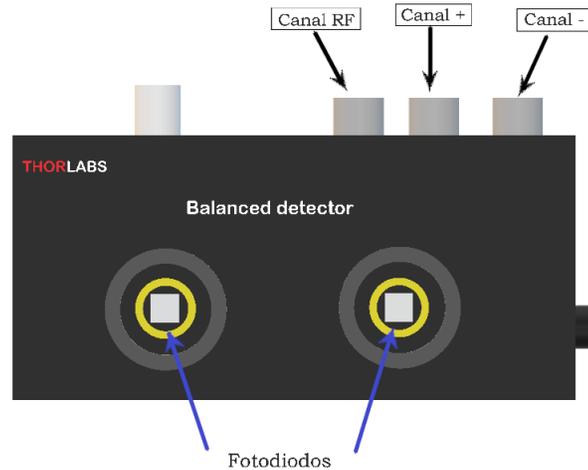


Figura 5.2: Esquema del detector balanceado. Registra la diferencia de intensidad de la luz (canal RF) que incide en cada uno de los fotodiodos. Los canales positivo “+” y negativo “-” permiten monitorear los niveles de intensidad de manera individual.

El empleo de un detector balanceado permite que dos intensidades con una diferencia de fase de π adicional entre el haz objeto y el haz de referencia se resten entre sí de manera electrónica. Esto tiene como consecuencia que, para obtener la imagen de fase del objeto, la substracción $I_{i,0} - I_{i,\pi}$, para construir el coeficiente complejo C_i de la Ecuación (3.16), se lleva a cabo de manera directa, sin la necesidad de realizar la substracción en la etapa de postprocesamiento.

Una de las ventajas de trabajar con de este tipo de detectores es que reduce el ruido generado por las oscilaciones de la fuente, en este caso el láser, y el ruido electrónico [129]. Además, estos detectores y su principio básico han sido utilizados en la técnica de microscopía Raman [130], en la medición de absorción en gases [131], medidas polarimétricas [129, 132], tomografía óptica coherente [133], en redes ópticas de acceso múltiple [134–136], imagen computacional [88], imágenes ópticas en el dominio de frecuencias [137], entre otros.

5.1. Sistema holográfico experimental

El esquema básico del sistema holográfico empleado se ha descrito en la Sección 4.1. La Figura 5.3 muestra el nuevo sistema óptico, en el que solo se ha modificado el sistema de detección, que ahora está constituido por un detector balanceado (Thorlabs PDB210A/M).

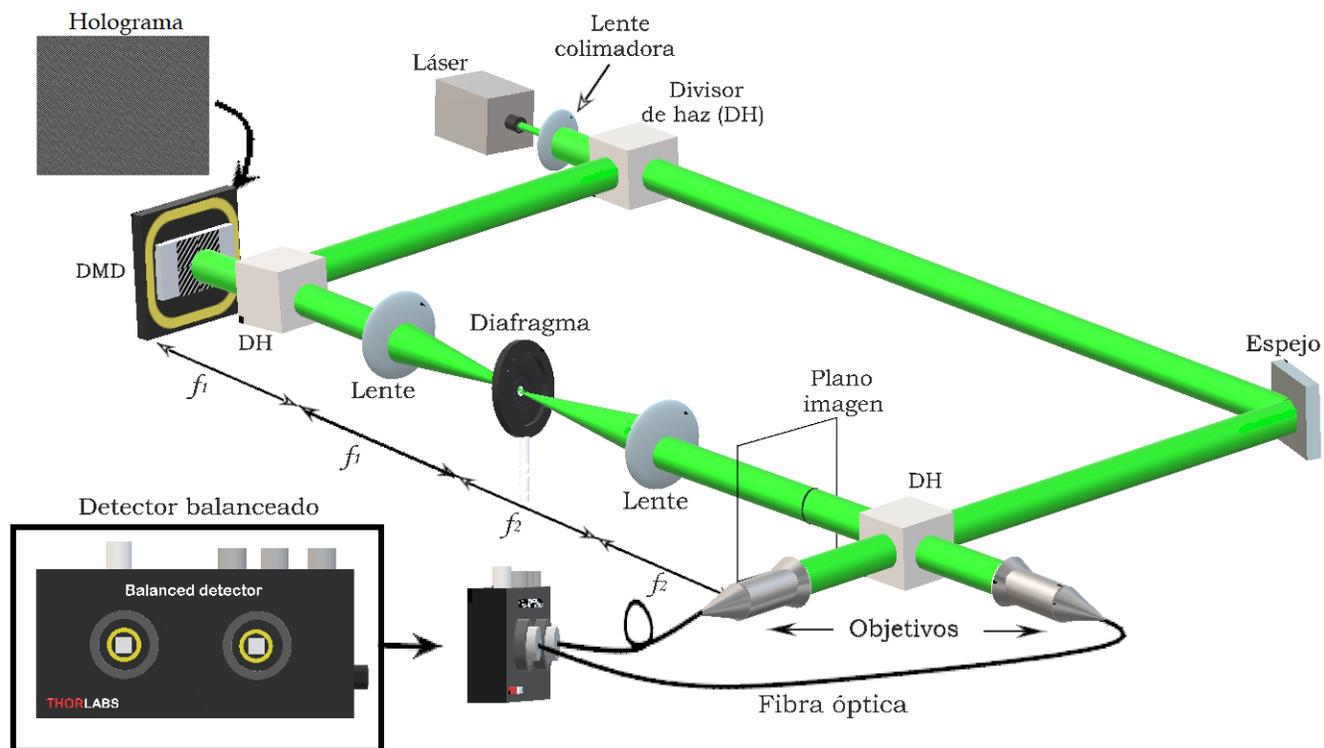


Figura 5.3: Esquema del sistema de holografía digital con luz estructurada y detección de un solo píxel con detección balanceada.

Como se observa en la figura, después de que el frente de onda del objeto interfiere con un haz plano de referencia, el divisor de haz produce los dos haces complementarios. Estos dos haces son focalizados con sendos objetivos en el extremo de dos fibras ópticas que conducen la luz y la hacen incidir sobre los dos fotodiodos del detector balanceado. Teniendo en cuenta los dos haces complementarios y las características del detector balanceado, para cada patrón de muestreo de la base de funciones WH, solo es necesario desplegar dos hologramas en el modulador DMD, uno con información de desplazamiento de fase de 0 y otro con desplazamiento fase adicional de $\pi/2$, para obtener la imagen de fase de un objeto (Ver Figura 5.4).

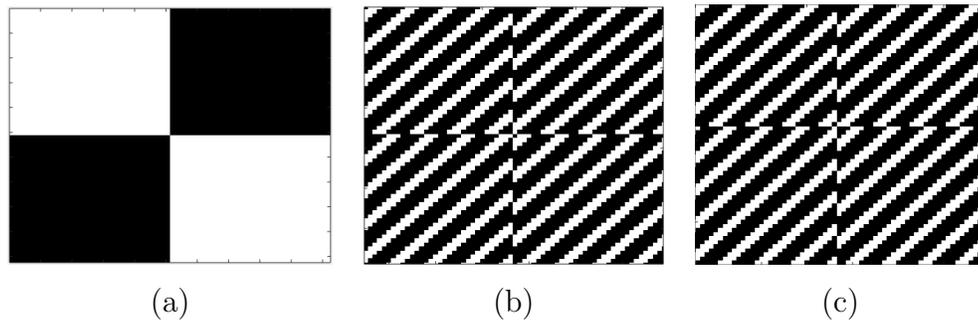


Figura 5.4: (a) Imagen de un patrón WH. Hologramas generados en el DMD para producir el patrón de fase de la figura (a) con desplazamientos de fase de 0 (b) y $\pi/2$ (c). Para lograr una mejor visualización de las franjas en los hologramas, se muestra una sección ampliada de la región central del holograma.

Otra opción para dirigir la luz hacia al detector balanceado es hacer incidir la luz de manera directa, utilizando, por ejemplo, espejos en lugar de la fibra óptica, y focalizando la luz en el área de detección con la ayuda de lentes. Finalmente, el detector balanceado registra la diferencia de los dos haces complementarios, es decir

$$I_{0-\pi} \equiv I_0 - I_\pi, \quad (5.1)$$

y

$$I_{\pi/2-3\pi/2} \equiv I_{\pi/2} - I_{3\pi/2}. \quad (5.2)$$

Este mismo procedimiento se sigue para cada uno de los patrones de muestreo. Los valores de intensidad de las Ecuaciones (5.1) y (5.2) para cada patrón de muestreo son almacenados en una computadora y se procesan con un programa informático para obtener la información de fase del objeto con el mismo método holográfico de desplazamiento de fase con detector puntual descrito en el capítulo anterior.

5.2. Resultados

Para obtener imágenes de objetos de fase con el esquema óptico propuesto en la Figura 5.3, es necesario calibrar previamente el sistema midiendo las aberraciones ópticas de todo el dispositivo. Para ello, se aplica la técnica holográfica de medida de la fase en ausencia de objeto. En el

proceso de medida se codifica una secuencia de hologramas en el DMD que proyecta los patrones WH sobre el plano del objeto. La cantidad de patrones usados dependerá de la resolución que se desea obtener. En nuestro caso el número de patrones de muestreo empleados es de 4096, los mismos que son necesarios para obtener una imagen de fase o de amplitud con una resolución de 64×64 píxeles.

En la Figura 5.5 se muestra la fase de las distorsiones del frente de onda producidos por el sistema óptico en la Figura 5.3 en ausencia del objeto, siguiendo el procedimiento descrito en el apartado 5.1. Una vez caracterizada la fase de dichas distorsiones se incorpora en los hologramas generados por computadora de tal modo que se genere la fase conjugada en el plano del objeto, y así obtener un frente de onda sin ninguna clase de distorsión.

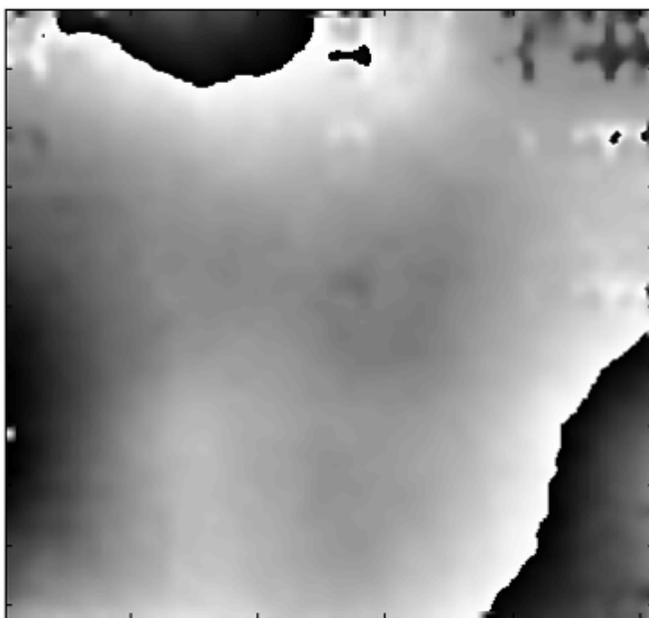


Figura 5.5: Distribución de fase de las distorsiones del frente de onda producidas por el sistema óptico de la Figura 5.3 en ausencia de objeto empleando un detector balanceado.

El objeto utilizado como muestra para realizar una imagen de fase con el sistema holográfico con detector balanceado es la resina presentada en la Figura 4.12. En la Figura 5.6 se presenta la imagen de fase de la muestra obtenida experimentalmente.

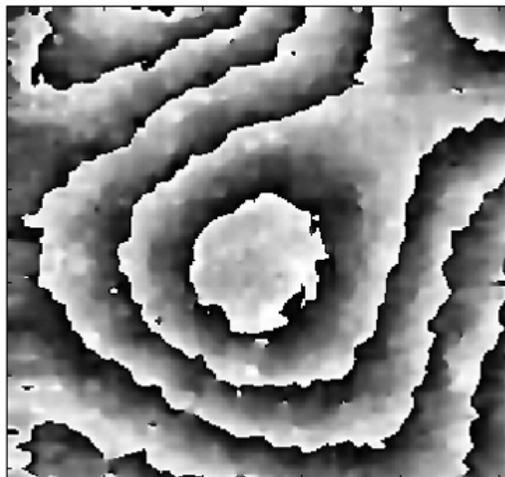


Figura 5.6: Distribución de fase de la fotorresina mostrada en la Figura 4.12 obtenida experimentalmente con el sistema óptico de la Figura 5.3 empleando luz estructurada y el detector balanceado.

También, se obtuvo la amplitud y fase de una muestra biológica, un fragmento del ala de libélula mostrada en la Figura 4.21. En la Figura 5.7 se muestran imágenes de la amplitud y la fase de dicha muestra obtenidas experimentalmente con el dispositivo de la Figura 5.3 calibrado.

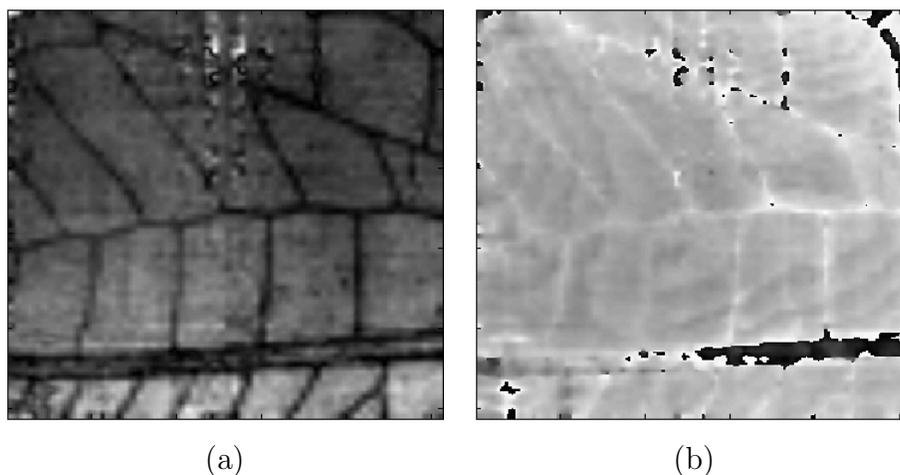


Figura 5.7: Amplitud (a) y fase (b) de un segmento del ala de libélula mostrada en la Figura 4.21, empleando el sistema óptico holográfico con luz estructurada y detector balanceado.

Además, para comprobar la tolerancia del sistema holográfico basado en detección balanceada a la presencia de aberraciones se ha realizado un experimento empleando un difusor entre el objeto de fase y el sistema de detección. Para la prueba, se ha empleado un plástico rugoso

comercial, con un ángulo aproximado de difusión de la luz de 25° , como material difusor de luz. Dos fragmentos de este difusor se sitúan entre el divisor de haz y el detector balanceado, como se muestra en la Figura 5.8.

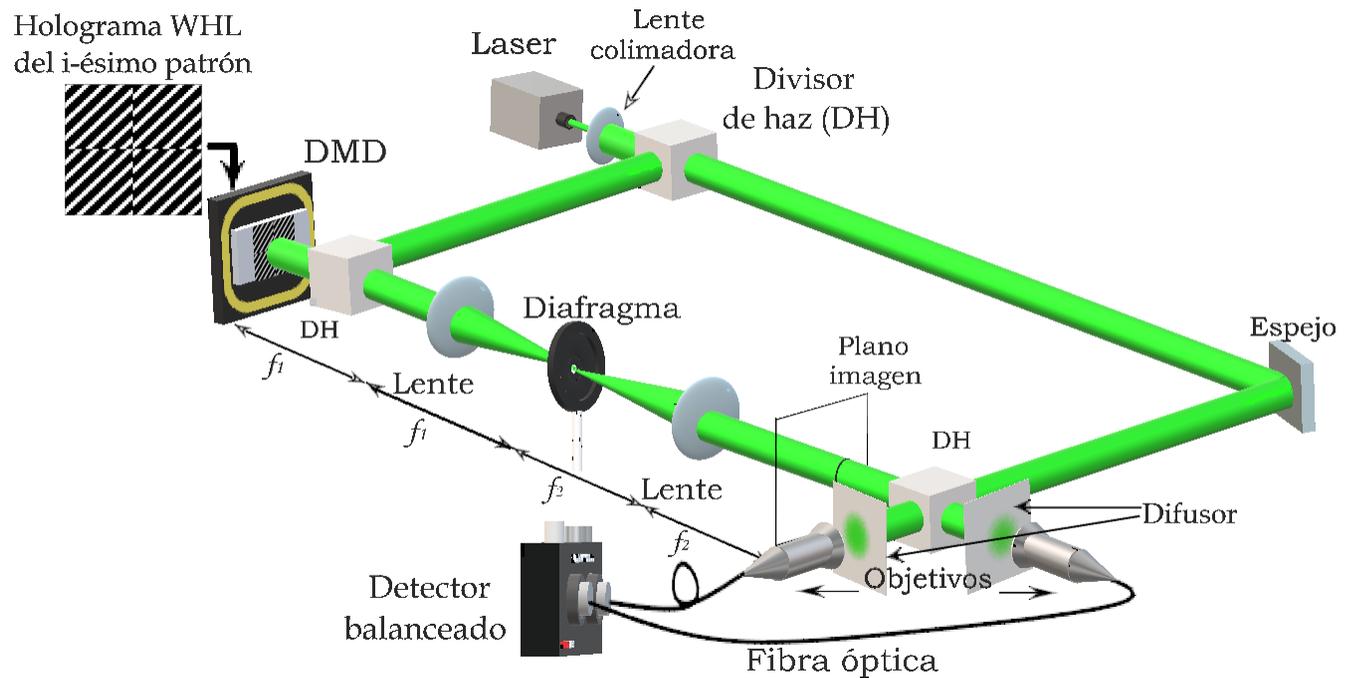


Figura 5.8: Esquema del sistema holográfico digital con luz estructurada y detección de un solo píxel con un material difusor antes del detector balanceado.

En la Figura 5.9 se muestran imágenes de la amplitud y la fase de un fragmento del ala de la libélula empleando el sistema holográfico de la Figura 5.8 cuando el difusor está situado antes del detector balanceado.

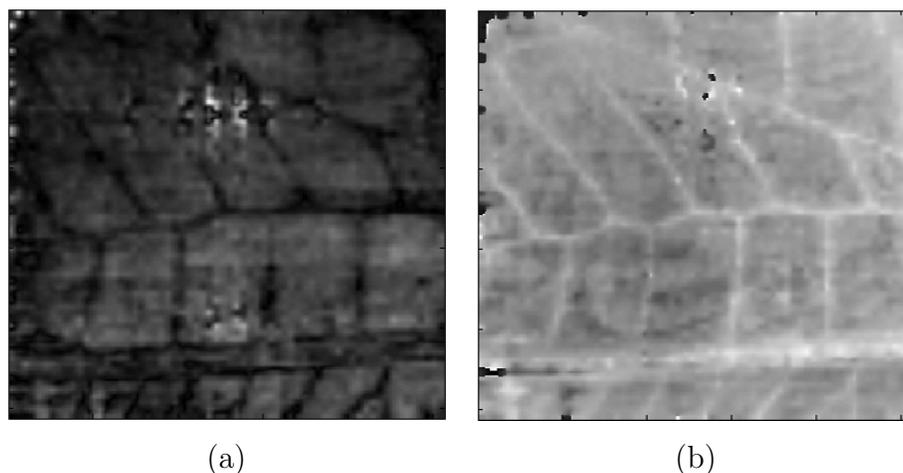


Figura 5.9: Amplitud (a) y fase (b) de un segmento del ala de libélula mostrada en la Figura 4.21, empleando el sistema óptico holográfico con luz estructurada y un material difusor situado antes del detector balanceado.

Así pues, el uso de un detector balanceado en el sistema holográfico diseñado e implementado en este trabajo de investigación permite la recuperación de la amplitud y la fase de un objeto. También, es posible caracterizar la fase de las distorsiones del frente de onda de la luz inducidas por los dispositivos ópticos del propio sistema holográfico. Los objetos que se muestrearon son una resina transparente depositada sobre un substrato de vidrio y un fragmento del ala de una libélula. Con el sistema holográfico implementado en este trabajo, fue posible obtener la amplitud y la fase del fragmento de ala de libélula aún cuando un material difusor se sitúa antes del detector balanceado. Por tanto, el sistema holográfico con un detector balanceado es robusto ante la presencia de materiales difusores.

Debido a que el sistema holográfico diseñado genera dos haces de luz complementarios a la salida, es decir, uno de los dos interferogramas generados, que expresan la diferencia de fase entre el haz objeto y el haz de referencia, tiene una diferencia adicional de π radianes respecto al otro, el empleo de un detector balanceado permite realizar la técnica holográfica de desplazamiento de fase de manera más directa. Además, la generación de tales haces complementarios y el empleo del detector balanceado como sistema de detección, permite disminuir en un 50% el número de hologramas desplegados en el DMD, la cantidad de datos adquiridos en la computadora y el tiempo de muestreo, comparado con el caso donde se utiliza un detector con un solo píxel basado en un solo fotodiodo.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones

Usualmente, la medición y caracterización de la fase se realiza con instrumentos muy sofisticados y costosos, ya que se requieren precisiones con valores del orden de fracciones de la longitud de onda de la luz empleada. Un sistema óptico que permita medir la distribución espacial tanto la fase como la amplitud con dispositivos simples es necesario para aplicaciones prácticas, como por ejemplo la microscopía óptica o la caracterización de materiales. Precisamente, este trabajo de tesis se ha centrado en el diseño y desarrollo de una novedosa arquitectura óptica holográfica capaz de formar imágenes de amplitud y fase de objetos completos.

El sistema óptico propuesto emplea un modulador espacial de luz reflectivo basado en microespejos (DMD) para modular la fase de un frente de onda. Aunque se trata de un modulador de amplitud, la fase se modula mediante el uso de CGH tipo Lee, desplegados en la pantalla del DMD. Estos hologramas están diseñados para generar patrones WH codificados en fase que muestrean el objeto y permiten aplicar técnicas de imagen de un solo píxel. La detección del sistema holográfico propuesto consiste en un dispositivo con un solo píxel, el cual mide la intensidad integrada de la interferencia entre el frente de onda generado por el objeto y un haz plano de referencia. Una tarjeta DAQ digitaliza la señal analógica y registra los valores de intensidad para cada patrón de muestreo en la computadora. Finalmente, los datos adquiridos son procesados con un programa informático creado en MatLab para calcular numéricamente la imagen de fase del objeto bajo estudio.

Las conclusiones principales de este trabajo son las siguientes:

- El sistema holográfico implementado es capaz de caracterizar las distorsiones de fase inducidas por los propios dispositivos ópticos empleados. Esta información es incorporada en los hologramas como información de fase conjugada, de tal manera que se compensan tales distorsiones, convirtiendo al arreglo óptico en un sistema adaptativo.
- Además, el mismo DMD es utilizado para aplicar la técnica holográfica de PS, y no es necesario usar láminas de retardo o transductores piezoeléctricos, que contribuyen a complicar el sistema.
- La velocidad de refresco del DMD permite desplegar todos los hologramas WHL y proyectar los patrones de Hadamard en fase en un intervalo de tiempo breve (alrededor de 8 segundos para imágenes de 64x64 píxeles). Los tiempos de muestreo usando un DMD son muy cortos en comparación con los tiempos de muestreo empleando un SLM basado en una pantalla de cristal líquido, que son del orden de minutos.
- Con el modulador DMD es posible manipular la fase para realizar tres tareas distintas: la caracterización de la fase de las distorsiones inducidas por el sistema, la aplicación de la técnica de desplazamiento de fase y la creación de los patrones WH en fase que permiten muestrear el objeto.
- El sistema de detección del sistema óptico holográfico consta de un simple fotodiodo. Esta clase detectores son útiles cuando la intensidad de la iluminación es muy baja o cuando se trabaja fuera del espectro visible. Además, el sistema de detección es tan simple que permite desarrollar fácilmente técnicas de detección más sofisticadas cuando se requiere conocer otras propiedades de la luz distintas a la intensidad, tales como la fase, la longitud de onda o la polarización.
- Aún cuando un material difusor esté presente en el sistema (localizado entre el objeto y el detector) es posible obtener información tanto de amplitud como de fase, lo que marca una clara ventaja sobre los dispositivos de detección basados en arreglos matriciales de píxeles, como los sensores CCD o CMOS. En consecuencia, el sistema holográfico propuesto en este trabajo es robusto ante materiales difusores localizados entre el objeto y el sistema de detección.

- El sistema holográfico básico puede mejorarse añadiendo un detector balanceado. Con estos detectores el número de hologramas desplegados en el modulador DMD, la cantidad de datos almacenados en la computadora y el tiempo de muestreo se reducen en un 50 %, comparado con el caso en donde se emplea un solo fotodiodo.

6.2. Perspectivas futuras

Finalizado este trabajo, se abre un gran abanico de mejoras de algunos aspectos del sistema holográfico y el desarrollo de nuevas aplicaciones.

- En este trabajo, la velocidad de refresco del DMD empleada fue de alrededor del 10 %, comparada con la velocidad máxima de DMD que puede alcanzar el modulador, que es de 22 kHz. La velocidad limitada empleada en este trabajo obedece a que el fotodiodo y la tarjeta digitalizadora poseen un tiempo de respuesta que no es suficiente para muestrear al objeto a la máxima velocidad, siendo esta limitación solo de carácter instrumental. Sin embargo, con la explotación del 100 % de la velocidad de refresco del modulador DMD y con los dispositivos adecuados, es posible reducir el tiempo de medida (hasta menos de un segundo para imágenes complejas de 64×64 pixeles), lo que representaría una mejora notable en la optimización de la resolución temporal del sistema, un aspecto que se pretende trabajar en un futuro trabajo.
- Una característica importante de la iluminación empleada en este trabajo es que es de tipo coherente. Una alternativa en este aspecto es la utilización de luz parcialmente coherente. Determinar la fase con tales fuentes de iluminación posibilitaría muestrear objetos que sufren cambios físicos, químicos o biológicos al iluminarlos con luz coherente, ampliando la gama de aplicaciones de la técnica a otras áreas de investigación, por ejemplo, en el área oftalmológica.
- Aunque una evaluación experimental de la resolución tanto espacial como temporal no se contempla en este trabajo, resolver estos parámetros conllevaría a una caracterización más adecuada del sistema óptico presentado y así se podría determinar mejor el alcance de la técnica implementada.
- Una característica del sistema holográfico desarrollado en este trabajo es que permite la

compensación de las distorsiones del frente de onda de la luz. En este caso, la caracterización y la compensación de estas distorsiones inducidas por el sistema, se realizaron de manera manual. Elaborar un procedimiento para llevar a cabo el proceso de compensación de manera automática, desarrollando un sistema adaptativo autónomo, incrementaría la eficiencia del sistema holográfico, un aspecto de esta investigación que se pretende implementar en un futuro trabajo de investigación.

- Por otro lado, considerando los resultados obtenidos, resulta de gran interés la aplicación del sistema holográfico desarrollado en el área de la microscopía. La obtención de imágenes de amplitud y fase a nivel celular, no solo resultaría relevante en el campo de la imagen óptica en general, sino también en el área médica, ya que, posiblemente, las ventajas del método SPI-WHL-PS se pondrían de manifiesto también en la escala de la microscopía, ampliando de esta manera el alcance de la técnica desarrollada en esta investigación.

Bibliografía

- [1] G. Popescu, “The power of imaging with phase, not power,” *Phy. Today* **70**(5), 35-40 (2017).
- [2] R. K. Tyson, “*Principles of Adaptive Optics*,” CRC Press 4th Ed., 2015.
- [3] B. C Platt and R. Shack, “History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing,” *J. Refract. Surg.* **17**(5) S573-S577 (2001).
- [4] J. N. Clark, X. Huang, R. Harder, and I. K. Robinson, “High-resolution three-dimensional partially coherent diffraction imaging,” *Nat. Commun.* **3** 993, 1-6 (2012).
- [5] J. M. Rodenburg, “Ptychography and related diffractive imaging methods,” *Adv. Imaging Electron Phys.* **150**, 87-184 (2008).
- [6] D. Gabor, “A new microscopic principle,” *Nature* **161**, 777-778 (1948).
- [7] D. Gabor, “Microscopy by reconstructed wavefronts,” *Proc. Roy. Soc.* **197**, 454-487 (1949).
- [8] D. Gabor, “Microscopy by reconstructed wavefronts: 2”, *Proc. Phys. Soc.* **64**, 449-469 (1951).
- [9] E. N. Leith and J. Upatnieks, “Reconstructed wavefronts and communication theory,” *Jour. Opt. Soc. Amer.* **52** (10), 1123-1130 (1962).
- [10] E. N. Leith and J. Upatnieks, “Wavefront reconstruction with diffused illumination and threedimensional objects,” *Journ. Opt. Soc. Amer.* **54**(11), 1295-1301 (1964).
- [11] N. Radwell, K. J. Mitchell, G. M. Gibson, M. P. Edgar, R. Bowman, and M. J. Padgett, “Single-pixel infrared and visible microscope,” *Optica* **1**(5), 285-289 (2014).

- [12] A. D. Rodríguez, P. Clemente, E. Tajahuerce, and J. Lancis, “Dual-mode optical microscope based on singlepixel imaging,” *Opt. Lasers Eng.* **82**, 87-94 (2016).
- [13] H.-J. Cho, D.-Ch. Kim, Y.-H. Yu, S. Shin, and W. Jung, “Tilt aberration compensation using interference patterns in digital holography,” *J. Opt. Soc. Korea* **13**(4), 451-455 (2009).
- [14] S. Li and J. Zhong, “Dynamic imaging through turbid media based on digital holography,” *J. Opt. Soc. Am. A* **31**(3), 480-486 (2014).
- [15] T. Nomura, B. Javidi, S. Murata, E. Nitanaï, and T. Numata, “Polarization imaging of a 3D object by use of on-axis phase-shifting digital holography,” *Opt. Lett.* **32**(5), 481-483 (2007).
- [16] A. Doblás, E. Sánchez-Ortiga, M. Martínez-Corral, G. Saavedra, and J. Garcia-Sucerquia, “Accurate single-shot quantitative phase imaging of biological specimens with telecentric digital holographic microscopy,” *J. Biomed. Opt.* **19**(4), 1-7 (2014).
- [17] P. Marquet, C. Depeursinge, and P. J. Magistretti, “Review of quantitative phase-digital holographic microscopy: promising novel imaging technique to resolve neuronal network activity and identify cellular biomarkers of psychiatric disorders,” *Neurophotonics* **1**(2), 1-15 (2014).
- [18] T. D. Yang, H.-J. Kim, K. J. Lee, B.-M. Kim, and Y. Choi, “Single-shot and phase-shifting digital holographic microscopy using a 2-D grating,” *Opt. Express* **24**(9), 9480-9488 (2016).
- [19] T. Kakue, S. Itoh, P. Xia, T. Tahara, Y. Awatsuji, K. Nishio, S. Ura, T. Kubora, and O. Matoba, “Single-shot femtosecond-pulsed phase-shifting digital holography,” *Opt. Express* **20**(18), 20286-20291 (2012).
- [20] Ll. Martínez-León, M. Araiza-Esquivel, B. Javidi P. Andrés, V. Climent, J. Lancis, and E. Tajahuerce, “Single-shot digital holography by use of the fractional Talbot effect,” *Opt. Express* **17**(15), 12900-12909 (2009).
- [21] T. Kreis, *Handbook of Holographic Interferometry, Optical and Digital Methods*, Federal Republic of Germany, Wiley-VCH, 2005.

- [22] U. Schnars and W. Jueptner, “Principles of direct holography for interferometry,” In: Jueptner W, Osten W (eds) FRINGE 93 Proc. 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns. Akademie, Berlin, 115-120 (1993).
- [23] U. Schnars and W. Jueptner, “Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction,” *Appl. Opt.* **33**(2), 179-181 (1994).
- [24] A. W. Lohmann and D. P. Paris, “Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer,” *Appl. Opt.* **6**(10), 1739-1748 (1967).
- [25] W.-H. Lee, “Computer-generated Holograms: Techniques and Applications,” *Prog. in Optics*, **16**, 120-232 (1978).
- [26] V. D. Schreier, “Synthetische Holografie,” Physik-Verlag, WeinheimDeerfield BeachBasel, 1984.
- [27] O. Bryngdahl and F. Wyrowsky, “Digital Holography- computer generated holograms,” *Prog. in Optics* **28**, 1-86, (1990).
- [28] T.-C. Poon, “*Digital holography and three-dimensional display: Principles and applications*,” Springer, New York, 2006.
- [29] G. T. Nehmetallah, R. Aylo, and L. A. Williams, *Analog and digital holography with MatLab*, SPIE PRESS, 2015.
- [30] W. P. Bleha and L. A. Lei, “Advances in Liquid Crystal on Silicon (LCOS) Spatial Light Modulators Technology,” *Proc. of SPIE* **87360A** 1-8 (2017).
- [31] E. Martín-Badosa, M. Montes-Usategui, A. Carnicer, J. Andilla, E. Pleguezuelos, and I. Juvells, “Design strategies for optimizing holographic optical tweezers set-ups,” *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **9**(8), S267-S277 (2007).
- [32] I. Moreno, J. A. Davis, B. M. Pascoguin, M. J. Mitry, and D. M. Cottrell, “Vortex sensing diffraction gratings,” *Opt. Lett.* **34**(19), 2927-2929 (2009).
- [33] M. S. Millán, E. Pérez-Cabré, L. A. Romero, and N. Ramírez, “Programmable diffractive lens for ophthalmic application,” *Opt. Eng.* **53**(6), 61709-61722 (2014).

- [34] M. Kreysing, D. Ott, M. J. Schmidberger, O. Otto, M. Schürmann, E. Martín-Badosa, G. Whyte, and J. Guck, “Dynamic operation of optical fibres beyond the single-mode regime facilitates the orientation of biological cells,” *Nat. Commun.* **5**(5481), 1-6 (2014).
- [35] C. Maurer, A. Jesacher, S. Bernet, and M. Ritsch-Marte, “What spatial light modulators can do for optical microscopy,” *Laser Photonics Rev.* **5**(1), 81101 (2011).
- [36] M. Takeda, W. Wang, and D. N. Naik, “*Coherence Holography: A Thought on Synthesis and Analysis of Optical Coherence Fields*,” FRINGE 2009 Proc. 6th International Workshop on Advanced Optical Metrology. Springer, Berlin 14-21 (2009).
- [37] E. Frumker and Y. Silberberg, “Phase and amplitude pulse shaping with two-dimensional phase-only spatial light modulators,” *J. Opt. Soc. Am. B* **24**(12), 2940-2947 (2007).
- [38] E. Frumker and Y. Silberberg, “Femtosecond pulse shaping using a two-dimensional liquid-crystal spatial light modulator,” *Opt. Lett.* **32**(11), 13841386 (2007).
- [39] H. Chen, Z. Zheng, B.-F. Zhang, J. Ding, and H.-T. Wang, “Polarization structuring of focused field through polarization-only modulation of incident beam,” *Opt. Lett.* **35**(16), 28252827 (2010).
- [40] F. Kenny, D. Lara, O. G. Rodríguez-Herrera, and C. Dainty, “Complete polarization and phase control for focus-shaping in high-NA microscopy,” *Opt. Express* **20**(13), 1401514029 (2012).
- [41] A. P. Mosk, “Imaging and focusing through turbid media,” *Bio-Optics: Design and Application*, Proc. Optics in the Life Sciences. OSA, Hawaii, (2013).
- [42] I. M. Vellekoop and A. P. Mosk, “Focusing coherent light through opaque strongly scattering media,” *Opt. Lett.* **32**(16), 23092311 (2007).
- [43] J. Bertolotti, E. G. van Putten, C. Blum, A. Lagendijk, W. L. Vos, and A. P. Mosk, “Non-invasive imaging through opaque scattering layers,” *Nature* **491**, 232-234 (2012).
- [44] W. P. Bleha and L. A. Lei, “Advances in Liquid Crystal on Silicon (LCOS) Spatial Light Modulator Technology,” Proc. SPIE 8736, Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics **VII**(87360A) 1-8 (2013).
- [45] E. G. van Putten, I. M. Vellekoop, and A. P. Mosk “Spatial amplitude and phase modulation using commercial twisted nematic LCDs,” *Appl. Opt.* **47**(12), 2076-2081 (2008).

- [46] New software features of ALP 4.3 Release 21, Vialux (2018).
- [47] L. J. Hornbeck, “Texas Instrument,” *Tech. J.* **15**(7) (1998).
- [48] J. B. Sampsel, “Digital micromirror device and its application to projection displays,” *J. Vac. Sci. Technol. B* **12**(6), 3242-3246 (1994).
- [49] T. Yoon, Ch-S. Kim, K. Kim, and J. Choi, “Emerging applications of digital micromirror devices in biophotonic field,” *Opt. Laser Technol.* **104**, 17-25 (2018).
- [50] Y. X. Ren, M. Li, K. Huang, J. G. Wu, H. F. Gao, Z. Q. Wang, and Y. M. Li, “Experimental generation of Laguerre-Gaussian beam using digital micromirror device,” *Appl. Opt.* **49**, 1838-1844 (2010).
- [51] L. Gong, X. Z. Qiu, Y. X. Ren, H. Q. Zhu, W. W. Liu, J. H. Zhou, M. C. Zhong, X. X. Chu, and Y. M. Li, “Observation of the asymmetric Bessel beams with arbitrary orientation using a digital micromirror device,” *Opt. Express* **22**, 26763-26776 (2014).
- [52] X. Y. Ding, Y. X. Ren, and R. D. Lu, “Shaping super-Gaussian beam through digital micro-mirror device,” *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **58**(3), 1-6 (2015).
- [53] M. A. Preciado, K. Dholakia, and M. Mazilu, “Generation of attenuation-compensating Airy beams,” *Opt. Lett.* **39**, 4950 (2014).
- [54] L. Gong, Y. X. Ren, W. W. Liu, M. Wang, M. C. Zhong, Z. Q. Wang, and Y. M. Li, “Generation of cylindrically polarized vector vortex beams with digital micromirror device,” *J. Appl. Phys.* **116**(18), 1-7 (2014).
- [55] D. Kim, W. Choi, M. Kim, J. Moon, K. Seo, S. Ju, and W. Choi, “Implementing transmission eigenchannels of disordered media by a binary-control digital micromirror device,” *Opt. Commun.* **330**, 35-39 (2014).
- [56] D. Dan, M. Lei, B. Yao, W. Wang, M. Winterhalder, A. Zumbusch, Y. Qi, L. Xia, S. Yan, Y. Yang, P. Gao, T. Ye, and W. Zhao, “DMD-based LED-illumination Super-resolution and optical sectioning microscopy,” *Sci. Rep.* **3**(1116), 1-7 (2013).
- [57] H. T. Dai, X. W. Sun, D. Luo, and Y. J. Liu, “Airy beams generated by a binary phase element made of polymer-dispersed liquid crystals,” *Opt. Express* **17**(22), 19365-19370 (2009).

- [58] W. Zhou, Q. Xu, Y. Yu, and A. Asundi, “Phase-shifting in-line digital holography on a digital micro-mirror device,” *Opt. Lasers Eng.* **47**(9), 896-901 (2009).
- [59] D. B. Conkey, A. M. Caravaca-Aguirre, and R. Piestum, “High-speed scattering medium characterization with application to focusing light through turbid media,” *Opt. Express* **20**(2), 17331740 (2012).
- [60] S. A. Goorden, J. Bertolotti, and A. P. Mosk, “Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device,” *Opt. Express* **22**(15), 17999-18009 (2014).
- [61] W. Zhou, Q. Xu, Y. Yu, and A. Asundi, “Phase shifting in-line digital holography on a digital micro-mirror device,” *Opt. Lasers Eng.* **47**(9), 896-901 (2009).
- [62] M. Chlipala and T. Kozacki, “3D color reconstructions in single DMD holographic display with LED source and complex coding scheme,” *Proc. of SPIE*, **10335**, 1-8 (2017).
- [63] Jiang Xing, Zhou Hao, Wu Dan, Hou Jun-jian, and Gu Ji-hua, “Color hologram reconstruction based on single DMD,” *Proc. SPIE* **9684**, 1-6 (2016).
- [64] D. Stuart, O. Barter, and A. Kuhn, “Fast algorithms for generating binary holograms,” *arXiv: 1409.1841v1* (2014).
- [65] M. F. Duarte, M. A. Davenport, D. Takhar, J. N. Laska, Ting Sun, K. F. Kelly, and R. G. Baraniuk, “Single-pixel imaging via compressive sampling,” *IEEE Signal Process. Mag.* **25**(2), 83-91 (2008).
- [66] M. P. Edgar, G. M. Gibson, and M. J. Padgett, “Principles and prospects for single-pixel imaging,” *Nat. Photon.* **18**, 13-20 (2019).
- [67] G. A. Howland, D. J. Lum, M. R. Ware, and J. C. Howell, “Photon counting compressive depth mapping,” *Opt. Express* **21**(20), 23822-23837 (2013).
- [68] E. Tajahuerce, V. Durán, P. Clemente, E. Irlés, F. Soldevila, P. Andrés, and J. Lancis, “Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection”, *Opt. Express* **22**(14), 16945-16955 (2014).
- [69] V. Durán, F. Soldevila, E. Irlés, P. Clemente, E. Tajahuerce, P. Andrés, and J. Lancis, “Compressive imaging in scattering media,” *Opt. Express* **23**(11), 14424-14433 (2015).

- [70] C. M. Watts, D. Shrekenhamer, J. Montoya, G. Lipworth, J. Hunt, T. Sleasman, S. Krishna, D. R. Smith, and W. J. Padilla, “Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators,” *Nat. Photonics* **8**(8), 605-609 (2014).
- [71] M. P. Edgar, G. M. Gibson, R. W. Bowman, B. Sun, N. Radwell, K. J. Mitchell, S. S. Welsh, and M. J. Padgett, “Simultaneous real-time visible and infrared video with single-pixel detectors,” *Sci. Rep.*, **5**(10669), 1-8 (2015).
- [72] V. Durán, P. Clemente, M. Fernández-Alonso, E. Tajahuerce, and J. Lancis, “Single-Pixel Polarimetric Imaging,” *Opt. Lett.* **37**(5), 824-826 (2012).
- [73] Y. Wu, P. Ye, I. O. Mirza, G. R. Arce, and D. W. Prather, “Experimental demonstration of an optical-sectioning compressive sensing microscope (CSM),” *Opt. Express* **18**(24), 24565-24578 (2010).
- [74] S. S. Welsh, M. P. Edgar, R. Bowman, B. Sun, and M. J. Padgett, “Near video-rate linear Stokes imaging with single-pixel detectors,” *J. Opt.* **17**(025705), 1-9 (2015).
- [75] F. Soldevila, E. Irlas, V. Durán, P. Clemente, M. Fernández-Alonso, E. Tajahuerce, and J. Lancis, “Single-pixel polarimetric imaging spectrometer by compressive sensing,” *Appl. Phys. B*, **113**(4), 551-558 (2013).
- [76] V. Studer, J. Bobin, M. Chahid, H. S. Mousavi, E. Candes, and M. Dahan, “Compressive fluorescence microscopy for biological and hyperspectral imaging,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **109**(26), E1679-E1687 (2012).
- [77] N. Huynh, E. Zhang, M. Betcke, S. Arridge, P. Beard, and B. Cox, “Single-pixel optical camera for video rate ultrasonic imaging,” *Optica* **3**(1), 26-29 (2016).
- [78] M.-J. Sun, M. P. Edgar, G. M. Gibson, B. Sun, N. Radwell, R. Lamb, and M. J. Padgett, “Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution,” *Nat. Commun.* **7**(12010), 1-6 (2016).
- [79] J. Greenberg, K. Krishnamurthy, and D. Brady, “Compressive single-pixel snapshot x-ray diffraction imaging,” *Opt. Lett.* **39**, 111-114 (2013).
- [80] L. Martínez-León, P. Clemente, Y. Mori, V. Climent, J. Lancis, and E. Tajahuerce, “Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination,” *Opt. Express* **25**(5), 4975-4984 (2017).

- [81] D. J. Brady, K. Choi, D. L. Marks, R. Horisaki and S. Lim, “Compressive Holography,” *Opt. Express* **17**(15), 13040-13049 (2009).
- [82] P. Clemente, V. Durán, E. Tajahuerce, Pedro Andrés, V. Climent and J. Lancis, “Compressive Holography With A Single-Pixel Detector,” *Opt. Lett.* **38**(14), 2524-2527 (2013).
- [83] B. Bhaduri, C. Edwards, H. Pham, R. Zhou, T. H. Nguyen, L. L. Goddard, and G. Popescu, “Diffraction phase microscopy: principles and applications in materials and life sciences,” *Adv. Opt. Photonics* **6**(1), 57-119 (2014).
- [84] P. Clemente, V. Durán, V. Torres-Company, E. Tajahuerce and J. Lancis, “Optical Encryption Based on Computational Ghost Imaging,” *Opt. Lett.* **35**(14), 2391-2393 (2010).
- [85] J. Lancis, Ll. Martínez-León, V. Durán, E. Tajahuerce, V. Torres-Company, P. Clemente and P. Andrés, “Ghost Holography,” 10th Euro-American Workshop on Information Optics (WIO) 2011, IEEE Conference Publications, 19-24 Jun. 2011, Benicassim, Valencia, España, DOI:10.1109/WIO.2011.5981441.
- [86] K. Ota and Y. Hayasaki, “Complex-amplitud single-pixel imaging,” *Opt. Lett.* **43**(15), 3682-3685 (2018).
- [87] S. Shin, K. Lee, Y. Baek, and Y. Park, “Reference-free single-point holographic imaging and realization of an optical bidirectional transducer,” *Phys. Rev. Lett.* **9**(4), 044042 (2018).
- [88] F. Soldevila, P. Clemente, E. Tajahuerce, N. Uribe-Patarroyo, P. Andrés, and J. Lancis, “Computational imaging with a balanced detector,” *Sci. Rep.* **6**(29181), 1-10 (2016).
- [89] J. W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics*, Roberts & Co., Colorado, 1996.
- [90] T. Kreis, *Holographic Interferometry: Principles and Methods*, Akademie Verlag, Berlin, 1996.
- [91] L. P. Yaroslavski and N. S. Merzlyakov, *Methods of Digital Holography*, Consultants Bureau, New York, 1980.
- [92] P. Hariharan, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- [93] I. Yamaguchi and T. Zhang, “Phase-shifting digital holography,” *Appl. Opt.* **22**(16), 1268-1270 (1997).

- [94] W.-H. Lee, “Binary synthetic holograms,” *Appl. Opt.* **13**, 1677-1682 (1974).
- [95] Y.-X. Ren, R.-D. Lu, and L. Gong, “Tailoring light with a digital micromirror device,” *Ann. Phys. (Berlin)* **527**(7-8), 447-470 (2015).
- [96] R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, “A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane picture,” *Optik* **35**(2), 237-246 (1972).
- [97] M. Harwit and N. J. A. Sloane, *Hadamard transform optics*, Academic Press, London, 1979.
- [98] W. K. Pratt, J. Kane, and H. C. Andrews, “Hadamard transform image coding,” *Proc. IEEE* **57**(1), 58-68 (1969).
- [99] J. H. Shapiro, “Computational ghost imaging,” *Physical Review A*, **7**(6), 1-4 (2008).
- [100] R. N. Bracewell, *The Fourier transform and its applications*, MacGraw-Hill, New York, 1986.
- [101] A.V. Oppenheim, *Discrete-time signal processing*, Prentice Hall, London, 2014.
- [102] R. G. Baraniuk, “Compressive Sensing,” *IEEE Signal Process. Mag.* **24**(4), 118-120 (2007).
- [103] S. Engelberg, “Compressive Sensing (Instrumentation Notes),” *IEEE Instru. Meas Mag.* **15**(1), 42-46 (2012).
- [104] E. J. Candes and M. B. Wakin, “An Introduction To Compressive Sampling,” *IEEE Signal Process. Mag.* **25**(2), 21-30 (2008).
- [105] J. Park, S. Hwang, J. Yang and D. Kim, “Generalized Distributed Compressive Sensing,” disponible en Cornell University Library, <http://arxiv.org/abs/1211.6522>, (2012).
- [106] E. J. Candès, J. K. Romberg, and T. Tao, “Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements,” *Commun. Pure Appl. Math.* **59**(8), 1207-1223 (2006).
- [107] D. Kim, J. Trzasko, M. Smelyanskiy, C. Haider, P. Dubey, and A. Manduca, “High-Performance 3D Compressive Sensing MRI Reconstruction Using Many-Core Architectures,” *Int. J. Biomed. Imaging* **2011**, 1-11 (2011).
- [108] Y. H. Chang, J. W. Gray, and C. J. Tomlin, “Exact reconstruction of gene regulatory networks using compressive sensing,” *BMC Bioinformatics* **15**(400), 1-22 (2014).

- [109] R. Su, Y. Lai, and X. Wang, "Identifying Chaotic FitzHugh-Nagumo Neurons Using Compressive Sensing," *Entropy* **16**(7), 3889-3902 (2014).
- [110] L. Nie, X. Yang, I. Adcock, Z. Xu, and Y. Guo, "Inferring Cell-Scale Signalling Networks via Compressive Sensing," *PLoS ONE* **9**(4), 1-12 (2014).
- [111] C. Gao, Q. Guan, H. Zhang, W. Chen, and F. Tian, "A novel feature extraction method by compressive sensing for signal peptide," *J. Chem. Pharm. Res.* **5**(11), 212-218 (2013).
- [112] Y. Hui-min and J. Song, "Research On Compressive Sensing-Based 3D Imaging Method Applied To GPR," *Microw. Opt. Technol. Lett.* **55**(12), 2896-2901 (2013).
- [113] Y. Wang, C. Yang, and J. Cao, "On Tikhonov Regularization And Compressive Sensing For Seismic Signal Processing," *Math. Models Methods Appl. Sci.* **22**(2), 1-24 (2012).
- [114] J. Caoab, Y. Wangb, J. Zhaoab, and C. Yang, "A review on restoration of seismic wavefields based on regularization and compressive sensing," *Inverse Probl. Sci. Eng.* **19**(5), 679-704 (2011).
- [115] Q. Tian and J. Wu, "A Review on Face Recognition Based on Compressive Sensing", *IETE Tech. Rev.* **30**(5), 427-438 (2013).
- [116] S. Zhang, X. Zhao, and B. Lei. "Robust Facial Expression Recognition via Compressive Sensing," *Sensors* **12**(3), 3747-3761 (2012).
- [117] Y. Huang, J. L. Beck, and S. Wu, "Robust Bayesian Compressive Sensing for Signals in Structural Health Monitoring," *Computer-Aided Civ. Infrastruc. Eng.* **29**(3), 160-179 (2014).
- [118] R. Gupta, P. Indyk, E. Price, and Y. Rachlin, "Compressive Sensing With Local Geometric Features," *Int. J. Comput. Geom. Appl.* **22**(4), 365-390 (2012).
- [119] V. Ntziachristos, "Going deeper than microscopy: the optical imaging frontier in biology," *Nat. methods* **7**, 603 (2010).
- [120] M. Wenner, "The most transparent research," *Nat Medicine* **15**, 1106 (2015).
- [121] S. Gigan, "Optical microscopy aims deep," *Nat. Photon.* **11**, 14 (2017).

- [122] D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, and C. A. Puliafito, “Optical coherence tomography,” *Science* **254**, 1178 (1991).
- [123] F. Helmchen and W. Denk, “Deep tissue two-photon microscopy,” *Nat. Methods* **2**, 932-940 (2005).
- [124] E. Berrocal, S.-G. Pettersson, and E. Kristensson, “High-contrast imaging through scattering media using structured illumination and Fourier filtering,” *Opt. Lett.* **41**, 5612-5615 (2016).
- [125] A.P. Gibson, J.C. Hebden, and S.R. Arridge, “Recent advances in diffuse optical imaging,” *Phys. Med. Biol.* **50**, R1R43 (2005).
- [126] A.P. Mosk, A. Lagendijk, G. Lerosey, and M. Fink, “Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media,” *Nat. Photon.* **6**, 283 (2012).
- [127] Z. Yaqoob, D. Psaltis, M.S. Feld, and C. Yang, “Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples,” *Nat. Photon.* **2**, 110 (2008).
- [128] S. Popoff, G. Lerosey, M. Fink, A.C. Boccara, and S. Gigan, “Controlling light through optical disordered media: transmission matrix approach,” *Nat. Commun.* **1**, 81 (2010).
- [129] D. Côté and I. A. Vitkin, “Balanced detection for low-noise precision polarimetric measurements of optically active, multiply scattering tissue phantoms,” *J. Biomed. Opt.* **9**(1), 213-220 (2004).
- [130] E. Molotokaite, V. Kumar, C. Manzoni, D. Polli, G. Cerullo, and M. Marangoni, “Raman-induced Kerr effect microscopy with balanced detection,” *J. Raman Spectrosc.* **44**(10), 1385-1392 (2013).
- [131] D. M. Sonnenfroh, W. T. Rawlins, M. G. Allen, C. Gmachl, F. Capasso, A. L. Hutchinson, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, and A. Y. Cho, “Application of balanced detection to absorption measurements of trace gases with room-temperature, quasi-cw quantum-cascade lasers,” *Appl. Opt.* **40**(6), 812-820 (2001).
- [132] X. Wang, Y. Cui, W. Sun, J. Ye, and Yan Zhang, “Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection,” *J. Opt. Soc. Am. A* **27**(11), 2387-2393 (2010).

-
- [133] A. Bradu and A. G. Podoleanu, “Fourier domain optical coherence tomography system with balance detection,” *Opt. Express* **20**(16), 17522-17538 (2012).
- [134] S.-P. Tseng, “Modified multiphotodiode balanced detection technique for improving SAC-OCDMA networks,” *Opt. Comm.* **344**(1), 38-42 (2015).
- [135] H. Heo, S. Min, Y. H. Won, Y. Yeon, B. K. Kim, and B. W. Kim, “A New Family of 2-D WavelengthTime Spreading Code for Optical Code-Division Multiple-Access System With Balanced Detection,” *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16**(9), 2189-2191 (2004).
- [136] X. Wang, N. Wada, T. Miyazaki, G. Cincotti, and K. Kitayama, “Asynchronous Multiuser Coherent OCDMA System With Code-Shift-Keying and Balanced Detection,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13**(5), 1463-1470 (2007).
- [137] Y. Chen, D. M. de Bruin, Ch. Kerbage, and J. F. de Boer, “Spectrally balanced detection for optical frequency domain imaging,” *Opt. Express* **15**(25), 16390-16399 (2007).
- [138] G. Popescu, T. Ikeda, R. R. Dasari, and M. S. Feld, “Diffraction phase microscopy for quantifying cell structure and dynamics,” *Opt. Lett.* **31**(6), 775-777 (2006).

Apéndice A

Artículo y resúmenes de congresos

Este trabajo de tesis esta basado en los siguientes trabajos:

- “High sampling rate single-pixel digital holography system employing a DMD and phase-encoded patterns”, *Opt. Express*, **26**(16) (2018).
- “High-speed single-pixel digital holography”, *Proc. of SPIE* **10333** DOI: 10.1117/12.2272045 (2017).
- “High-Speed Single-Pixel Digital Holography with Phase-Structured Illumination”, invited in *Optics & Photonics International Congress, OPIC* (2017).
- “Wavefront compensation in high-speed single-pixel digital holography”, *EOS Topical Meeting on Diffractive Optics*, ISBN: 978-1-5108-4795-8, (2017).
- “High-speed single-pixel digital holography with a DMD”, *IEEE Workshop on Information Optics*, DOI: 10.1109/WIO.2017.8038187 (2017).
- “Single-pixel complex-value imaging at high sampling rates”, *POSTER, XII Reunión Nacional de Óptica*, ISBN (ed. digital): 978-84-09-03559-5, (2018).
- “Phase measurements with balance detector based in single-pixel imaging approach”, artículo en preparación.