



**UNIVERSITATEA POLITEHNICA
DIN BUCUREȘTI**



**Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației**

Decizie nr. 966 din 16.11.2022

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Fiz. Adrian SIMA

**APLICAȚII DE INTERFEROMETRIE
HOLOGRAFICĂ DIGITALĂ ÎN TIMP REAL CU
MODULAREA SPAȚIALĂ A LUMINII PENTRU
DIAGNOSTICAREA SUPRAFEȚELOR ȘI A
OBIECTELOR DE FAZĂ**

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. dr. ing. Ion MARGHESCU Univ. Politehnica din București	Președinte
Prof. dr. ing. Paul ȘCHIOPU Univ. Politehnica din București	Conducător de doctorat
Prof. dr. ing. Ramona-Voichița GĂLĂTUȘ Univ. Tehnică din Cluj-Napoca	Referent
Prof. dr. ing. Adrian TULBURE Univ. 1 Decembrie 1918 - Alba Iulia	Referent
Prof. dr. ing. Ioan BACIVAROV Univ. Politehnica din București	Referent

BUCUREȘTI 2022

Cuprins

1. Introducere

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat.....	1
1.2 Scopul tezei de doctorat.....	1
1.3 Conținutul tezei de doctorat.....	2
1.4 Echipamente experimentale folosite.....	3

2. Introducere în metodologia înregistrării interferențiale a fronturilor de undă.

2.1 Condiții experimentale în interferometria optică.....	4
2.2 Coerența spațială și temporală - tipuri de interferometre optice	5
2.3 Metode interferențiale de înregistrare a fronturilor de undă. Aplicații.....	5

3. Holografia ca metodă interferențială de înregistrare a fronturilor de undă.

3.1 Concepte teoretice privind înregistrarea și reconstrucția hologramelor.....	6
3.2 Clasificarea hologramelor.....	7
3.3 Holografie clasică. Aplicații.....	7
3.4 Holografie digitală - limitări, avantaje și aplicații.....	8

4. Interferometria holografică digitală (DHI) în timp real ca metodă dinamică de monitorizare și diagnosticare a fenomenelor și suprafețelor

4.1 Interferometriei holografice cu dublă expunere.....	10
4.2 DHI în timp real cu reconstrucția optică a frontului de undă cu ajutorul SLM Condiții experimentale.....	11

5. Aplicații experimentale de DHI în timp real cu ajutorul SLM în studiul obiectelor difuze

5.1 Studiul micilor deplasări	
5.1.1 Principiul metodei.....	12
5.1.2 Condiții experimentale.....	13
5.1.3 Rezultate experimentale.....	13
5.2 Aplicații în studiul deformărilor și defectelor structurale ale operelor de artă	
5.2.1 Aplicații ale tehnicilor optoelectronice în conservarea și restaurarea operelor de artă.....	14

5.2.2 Rezultate experimentale în investigarea defectelor structurale în artefactele pictate prin DHI în timp real	15
---	----

6. Aplicații experimentale de DHI în timp real în studiul obiectelor de fază.

6.1 Vizualizare în timp real a turbulenței și dizolvării în lichide	18
6.2 Monitorizarea fenomenului de evaporare a picătura de apă.....	20

7. Concluzii

7.1 Rezultate obținute.....	24
7.2 Contribuții originale.....	25
7.3 Lista lucrărilor originale.....	27
7.4 Perspective de dezvoltare.....	28

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....	30
------------------------------------	-----------

Capitolul 1

Introducere

Odată cu dezvoltarea tehnologică, interferometria holografică se adaptează prin folosirea unor noi mijloace de înregistrare a undelor, de reconstrucție a lor, cât și prin ritmul uriaș de creștere a vitezei de calcul și a tehnologiei informaționale. Sensorii de achiziție a imaginilor au devenit digitali. Achiziția holografică digitală poate fi corelată cu reconstrucția optică prin folosirea modulatorilor spațiale de lumină. Aceste caracteristici ale acestor dispozitive combinate cu diferite aplicații și tehnici numerice pot duce la un alt nivel tehnicile holografice de investigare. Astfel, acestea au căpătat pe lângă dimensiunea optică ce le consacră și una electronică. Holografia ca și interferometria holografică au devenit așadar tehnici opto-electronice de investigare a undelor.

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Odată cu digitalizarea senzorilor și mediilor optice de înregistrare, și holografia cât și în interferometria holografică devin *digitale*. Figura de interferență ce codifică informația despre obiect în cazul holografiei și modificările suferite de acesta în cazul interferometriei holografice pot fi reconstruite numeric și metodele devin mult mai versatile. În holografia digitală însă holograma dispăre ca obiect concret ce reconstruiește unda luminoasă prin difracție unei unde de reconstrucție. Reconstrucția optică prin difracție instantanee a undei de reconstrucție pe placa holografică a fost înlocuită de procesarea numerică - procedeu care consuma timp și resurse computaționale. Modulatoare spațiale de lumină reconstruiesc practic holograma ca obiect optic difractiv.

1.2 Scopul tezei de doctorat

În prezenta lucrare am încercat să obțin o sincronizare a celor două etape de înregistrare și reconstrucție holografică a undelor printr-o metodă *optoelectronică* ce presupune reconstrucția hologramei simultan cu înregistrarea ei. Această metodă optoelectronică presupune funcționarea simultană a două montaje experimentale de achiziție și reconstrucție holografică. Interferența din procesul de achiziție este

înregistrată digital pe senzorul unei camere de achiziție, iar reconstrucția se face simultan prin difracția optică a undei de reconstrucție pe un modulator spațial de lumină. Această configurație experimentală conectează practic cele două montaje și conferă metodei posibilitatea de investigare holografică în timp real a diferitelor unde și fenomene dinamice. Acest montaj ce poate fi compactizat având astfel o practicabilitate crescută prin posibilitatea de a fi transportat *in-situ*.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Cele șapte capitole ale prezentei lucrări se prezintă ca o dezvoltare progresivă a tematicii alese începând cu o prezentare sumară a domeniului, scopului și conținutului tezei în capitolul de introducere. De asemenea, tot în **primul capitol** este prezentată și baza experimentală de care am dispus în dezvoltarea și susținerea prezentului proiect.

Al doilea capitol prezintă sumar condițiile experimentale specifice interferometriei holografice cât și câteva aspecte teoretice privind coerența și interferența luminii, ca principale fenomene prezente în prezenta tematică a tezei. De asemenea, pentru că interferometria holografică intră în categoria metodelor de înregistrare a fronturilor de undă sunt descrise și alte câteva metode din aceeași categorie, dar prezentările metodelor sunt însoțite de exemplificări și aplicații experimentale dezvoltate personal.

În **capitolul al treilea** este descrisă holografia, ca metodă de înregistrare a fronturilor de undă și toate aspectele teoretice sunt însoțite de asemenea de exemplificări experimentale care au constituit subiecte și teme pentru diferite articole și prezentări științifice. Este introdusă aplicabilitatea reconstrucției hologramelor digitale prin difracție optică pe un modulator spațial de lumină, ca variantă *hard* a hologramei virtuale. Sunt de asemenea prezentate studii comparative de reconstrucție numerică și optică a hologramelor digitale, cât și anumite proceduri de simulare a hologramelor prin generare pe calculator.

Capitolul al patrulea prezintă interferometria holografică digitală ca metodă de investigare și comparare a diferitelor unde luminoase cât și de vizualizare și evaluare calitativă și cantitativă a anumitor fenomene dinamice care necesită o conectare și o investigare a acestora în timp real. Am insistat foarte mult pe anumite aspecte comparative între interferometria holografică clasică și cea digitală. Iar în legătură cu aceasta din urmă am pus accent pe interferometria holografică digitală în timp real prin reconstrucția frontului de undă cu ajutorul modulatorului spațial. În acest capitol este prezentată pe larg motivația teoretică a metodei propuse prin comparare cu metoda clasică. Sunt evidențiate numeroase avantaje experimentale ce vor fi aplicate ulterior în diferite aplicații - avantaje aduse de configurația hibridă de montaj propusă.

În **capitolul al cincilea** am prezentat aplicații practice ale configurației experimentale pentru studiul obiectelor difuze. Interferometria convențională nu poate fi aplicată decât obiectelor cu suprafețe netede, optice, dat în interferometria

holografică obiectele cu suprafețe mate, neregulate pot fi studiate. Am arătat că metoda propusă poate fi aplicată cu succes în studiul micilor deplasări ale obiectelor difuze cât și în detectarea defectelor structurale ale suprafețelor complexe cu aplicabilitate într-un domeniu foarte exploatat de tehnicile optoelectronice de investigare - arta și patrimoniul. Am făcut determinări în timp real pe două suprafețe pictate prin tehnici diferite - ulei pe lemn și frescă pe tencuială - și rezultatele au fost prezentate sistematic pe parcursul capitolului.

În *capitolul al șaselea* sunt prezentate investigații efectuate asupra obiectelor transparente, de fază. Am aplicat interferometria holografică digitală propusă pentru vizualizarea în timp real a anumitor fenomene în lichide precum, convecția, dizolvarea și difuzia, și de asemenea este prezentată și o aplicație pentru investigarea în timp real a evaporării unei picături de apă în vederea stabilirii unor coordonate pentru viitoare aplicații în studiul fenomenelor în picături. Pe lângă aplicația experimentală a fost dezvoltat și un model teoretic, iar pe baza lui a fost efectuată o simulare numerică ce s-a corelat întocmai cu observațiile experimentale, fapt ce a dovedit aplicabilitatea metodei în acest domeniu.

Ultimul capitol, *al șaptelea*, sintetizează concluziile, rezultatele obținute, prezintă contribuțiile originale, cât și o listă de lucrări publicate în tipul parcurgerii tematicii tezei. Iar în finalul capitolului sunt dezvoltate perspectivele ulterioare de aprofundare a aplicațiilor fizice și opto-electronice ale interferometriei holografice digitale ca metodă de investigare a undelor.

1.4 Echipamente experimentale folosite

În laboratorul colectivului de Spectroscopie și Optică Laser (SOL) al Institutului Național pentru Fizica Laserilor, Plasmei și Radiației (INFLPR) am folosit diferite echipamente și dispozitive optice specifice experimentelor de interferometrie optică. Acestea au fost corelate cu diferite componente optoelectronice pentru a obține configurațiile optime diferitelor aplicații de interferometrie holografică digitală. Astfel, pe lângă componente optice uzuale ca lentile, oglinzi, filtre spațiale, cuburi divizoare și polarizori am folosit surse de lumină laser în regim continuu cu He:Ne și YAG:Nd, senzori digitali și un modulator spațial în fază cu cristale lichide ce operează prin reflexie.

Capitolul 2

Introducere în metodologia înregistrării interferențiale a fronturilor de undă

În acest capitol am încercat să descriu specificitatea metodologiei teoretice și experimentale a opticii coerente ca domeniu general ce integrează atât holografia cât și interferometria holografică. Sunt prezentate într-o manieră sintetică noțiunile și conceptele teoretice ca interferența, coerența și difracția luminii, dar și particularitățile practice prezente în procedeele și experimentele generale de interferență.

2.1 Condiții experimentale în interferometria optică

Pentru că o figură de interferență se caracterizează printr-o distribuție periodică de intensitate sub formă de franje de diferite dimensiuni, aspecte și forme, metodele interferențiale presupun îndeplinirea anumitor condiții de stabilitate și rezoluție pentru o bună corelare a rezultatelor cu fenomenele studiate. În unele cazuri rezoluția franjelor impune și o rezoluție superioară a mediilor de înregistrare a figurii de interferență [1], [2]. Sursele de lumină folosite în interferometrie sunt de asemenea un domeniu vast, ele necesitând o adaptare a lungimii de undă la specificitatea obiectelor sau fenomenelor monitorizate sau înregistrate. Pentru că însuși fenomenul de interferență presupune o bună definiție a coerenței fronturilor de undă și o clasificare a tipurilor de interferență și o corelare a acestora cu fenomenele studiate sunt folosite în interferometrie atât surse de lumină albă cât și surse de lumină de diferite grade de coerentă, monocromatică, polarizată sau nu [3], [4], [5].

2.2 Coerența spațială și temporală - tipuri de interferometre optice

Coerența luminii folosită în investigațiile interferometrice este fenomenul care impune cele mai multe condiții configurației experimentale.

Coerența este cerința cea mai importantă a aplicațiilor de interferometrie în general și holografie în particular. Este imposibilă obținerea fenomenului de coerență între două fascicule provenite de la două surse distincte. În funcție de metoda prin care se obțin undele care interferă (acestea pot fi două sau mai multe, în cazul interferenței multiple) interferometrele se împart așadar în două clase majore - interferometre cu *divizare de front de undă* și cu *divizare de amplitudine*

Coerența este de asemenea de două tipuri - coerență spațială și coerență temporală și acestea vor fi impuse ca și parametri surselor ce se folosesc în interferometria holografică în experimentele prezentate.

2.3 Metode interferențiale de înregistrare și caracterizare a fronturilor de undă. Aplicații

În această secțiune am adus în discuție și am exemplificat în fiecare caz în parte câteva metode interferențiale de înregistrare și caracterizare a fronturilor de unda și a suprafețelor. Astfel, profilurile franjelor obținute prin numeroase metode interferențiale pot oferi informații cu privire la forma obiectelor difuze sau transparente și a fronturilor de unda reflectate sau transmise de acestea. Dintre metodele interferențiale propuse experimental sunt: interferometria speckle, interferometria Murty, interferometria Phase-Shift, interferometria Fizeau. De asemenea în prezenta secțiune este prezentată și o configurație de lambda-metru digital Fourier

Capitolul 3

Holografia ca metodă interferențială de înregistrare a fronturilor de undă

În acest capitol sunt analizate toate cerințele experimentale specifice holografiei ca metodă interferențială, aplicabilitatea lor în condițiile proprii de laborator și de asemenea o bună parte cazurilor teoretice sunt exemplificate experimental. Sunt efectuate și prezentate experimente de holografie clasică pe medii analogice de înregistrare ca emulsiile fotosensibile cât și experimente de holografie în termeni digitali cu reconstrucție atât numerică cât și optică a frontului de undă. De asemenea, pe parcursul acestei secțiuni este prezentată și o comparație între cele două moduri de înregistrare și reconstrucție.

3.1 Concepte teoretice privind înregistrarea și reconstrucția hologramelor.

Informația optică asupra unui obiect este conținută în unda luminoasă provenită de la el, numită așa cum s-a spus unda obiect, și anume în distribuția de amplitudine reală $a_0(\vec{r})$ și de fază $\varphi_0(\vec{r})$ din această undă:

$$a = a_0 e^{i\varphi_0} \quad (3.1)$$

Procedeul fotografic de înregistrare a unei obiect retine numai informația de amplitudine. Placa fotografică fiind un receptor pătratic răspunsul ei este proporțional cu intensitatea undei, $|a_0^2|$; faza undei obiect este pierdută la fotografiere.

Procedeul holografic de înregistrare a unei obiect retine întreaga informație, de fază și de amplitudine, conținută în undă. Înregistrarea fazei undei obiect se face cu ajutorul unei unde de referință:

$$r = r_0 e^{i\varphi_r} \quad (3.2)$$

anume prin interferența acestora cu unda obiect. Cele două unde coerente formează o figură de interferență în care distribuția de intensitate este dată de relația:

$$I(x, y) = |a + r|^2 = (a + r)(a^* + r^*) = a_0^2 + r_0^2 + ar^* + a^*r \quad (3.3)$$

În procesul de înregistrare a unei holograme, lumina de la fiecare punct al obiectului cade pe întreaga suprafață a hologramei, astfel că fiecare zonă a hologramei poate reconstrui întreaga imagine a obiectului. Aceasta este o proprietate foarte importantă de mare utilitate în aplicațiile holografiei în codarea de informație.

3. 2 Clasificarea hologramelor

Hologramele se pot clasifica în funcție de configurația experimentală ce duce la obținerea profilurilor undelor obiect și referință cât și în funcție de modul de înregistrare a figurii de interferență. În funcție de poziționarea obiectului, implicit de geometria undelor, de poziția hologramei și de asemenea în funcție de prezența elementelor optice din configurația de înregistrare a fost prezentată o clasificare a tipurilor de holograme

3. 3 Holografie clasică. Aplicații

În laboratorul de Spectroscopie Optică și Laseri (SOL) al INFLP am înregistrat și reconstruit o serie de holograme pe plăci holografice urmând a compara cerințele și metodele impuse de acest mediu clasic de înregistrare cu cel digital. În Fig. 3.5 este prezentată schema unui montaj experimental de holografie Fresnel folosit în înregistrările holografice clasice.

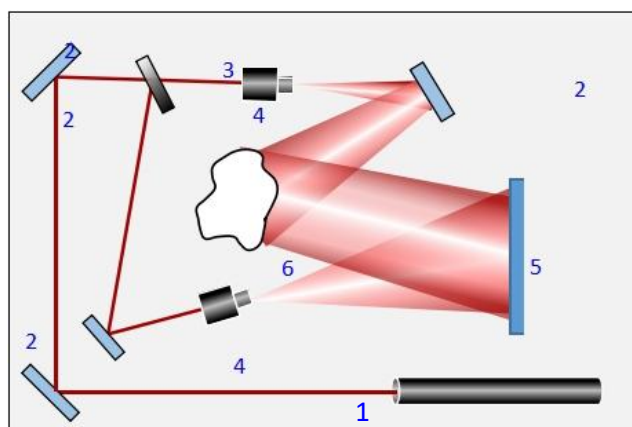


Fig. 3.5 Schema unui montaj experimental de holografie Fresnel folosit în înregistrările holografice clasice pe plăci cu emulsie: Laser He-Ne ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) (1); oglinzi (2); divizor de fascicul variabil (3); filtre spațiale (4); placa holografică - holograma (5); obiectul (6)

Am aplicat o configurație de holografie "off-axis" de tip Fresnel în care am optat pentru o undă de referință plană pentru a avea o intensitate mai mare în planul hologramei și pentru a reduce astfel timpul de expunere la înregistrare. În Fig. 3.6 sunt prezentate doua tipuri de holograme clasice înregistrate pe emulsie fotografică – holograme Fresnel (1, 2, 3) și o *holograma imagine* în care obiectul este văzut din trei unghiuri diferite (4).

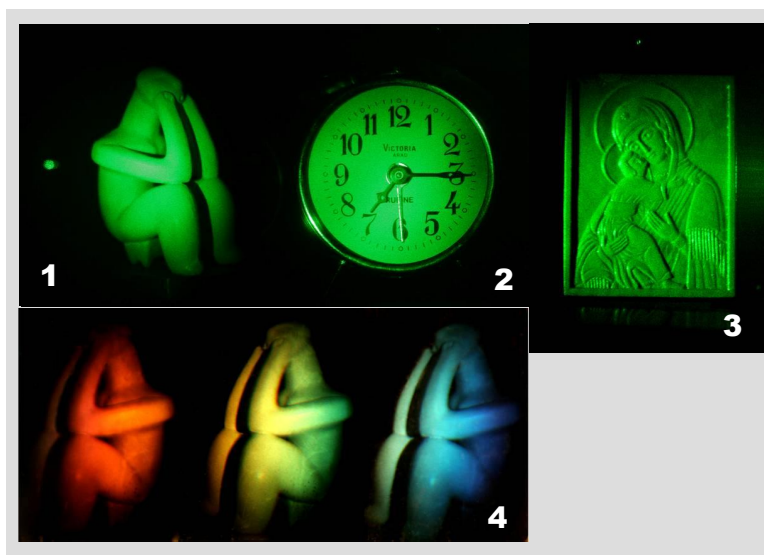


Fig. 3.6 Fotografiiile unor imagini reconstruite prin holografie clasică de tip Fresnel (1, 2, 3), de tip imagine (4, cele trei imagini sunt luate din unghiuri diferite pentru a se observa întreg spectrul de culoare) realizate pe placi holografice în Laboratorul de Spectroscopie Optică și Laseri al INFLPR

În funcție de modul de procesare chimică și de felul în care are loc difracția undei în planul hologramei la reconstrucție, hologramele sunt de două feluri - holograme de amplitudine și holograme de fază. Am obținut ambele tipuri de holograme aplicând procedurile chimice specifice.

3. 4 Holografia digitală - limitări, avantaje și aplicații.

În holografia digitală mediul de înregistrare este constituit dintr-un senzor digital. Atunci când se aplică acest mod de înregistrare, hologramele sunt salvate ca simple fișiere digitale și pot fi reconstrucție prin diferite tehnici computaționale sau cu ajutorul unor elemente optice difractive (DOE). În procesul de reconstrucția optică sau în cadrul procedurii computaționale trebuie să se țină cont de setup-ul de înregistrare, mai precis de caracteristicile celor două fronturi de undă care interferă – obiect și referință. Domeniul este vast și aplicabilitățile sunt numeroase [6], [7], [8], [9], [10].

Figurii de interferență odată înregistrată digital, i se aplică diferiți algoritmi de procesare digitală ce au ca scop o cât mai buna reconstrucție a frontului de undă corespunzător obiectului.

Limitări ale HD

Spre deosebire de hologramele înregistrate în manieră clasică pe emulsii fotografice de mare rezoluție, hologramele înregistrate digital suferă anumite limitări date de caracteristicile senzorilor digitali cu care se face înregistrarea. Astfel, conform ecuației (3.5), dacă pe o placă holografică se pot înregistra figuri de interferență, holograme, cu pana la 5000 linii/mm, corespunzătoare unor franje de $0,2 \mu\text{m}$, în cazul senzorilor digitali unde mărimea uzuală a pixelilor ce compun respectivul senzor (CCD sau CMOS) este în medie de $5 \mu\text{m}$, putem ajunge să înregistrăm figuri de interferență cu până la 70 linii/mm în medie.

Aceasta limitare pe care o suferă figura de interferență corespunde în mod direct unor limitări ale montajului experimental de înregistrare a hologramei digitale. Astfel cel mai important parametru de care trebuie ținut cont în cazul înregistrării unei holograme digitale este unghiul pe care îl fac unda de referință cu unda obiect. Pentru a nu depăși rezoluția limită a senzorului digital acesta nu poate fi destul de mare ca în cazul hologramelor clasice, unde rezoluția emulsiei permitea acest lucru.

Avantaje ale HD

Față de holografia analogică unde procesul de reconstrucție a imaginii era destul de laborios, presupunând o anumită configurație experimentală și anterior acesteia, numeroase procedee de dezvoltare și fixare efectivă a emulsiei fotografice, holografia digitală prezintă avantajul major că în procedeul de reconstrucție sunt eliminate toate aceste metode chimice consumatoare de timp și care pot induce și erori de procesare care se pot propaga până la o degradare a undei reconstruite.

În capitolul următor vom prezenta mult mai pe larg avantajele digitalizării în holografie, când vom lua în discuție interferometria holografică și aplicabilitatea acesteia ca metodă de investigare în timp real. În aceste cazuri propunem reconstrucția digitală optică folosind un modulator spațial digital, care elimină timpii de calcul și reconstruiește instantaneu frontului de undă obiect.

Au fost de asemenea dezvoltate **aplicații** de holografie digitală de tip "ghost image" și holograme digitale de tip Fourier "fără lentile" și Fresnel generate digital și reconstruite optic-difracțiv cu ajutorul SLM.

Chapter 4

Interferometria holografică digitală (DHI) în timp real ca metodă dinamică de monitorizare și diagnosticare a fenomenelor și suprafețelor

Interferometria holografică este o metodă foarte eficientă în evidențierea și monitorizarea deformărilor suferite de un anumit front de undă și pe parcursul acestui capitol noțiunile de interferometrie holografică clasică sunt adaptate cerințelor de achiziție digitală și reconstrucție optic - difractivă sau numerică a interferogramelor holografice. Această metodă implică interferența undelor care parcurg același drum, dar în momente diferite [11].

4.1 Interferometria holografică cu dublă expunere

Unele din cele mai importante atuuri ale interferometriei holografice în fața interferometriei optice sunt acelea că, pe de o parte elimină condiția ca obiectele supuse investigației să aibă suprafețe de calitate optică, iar pe de altă parte, undele care interferă nu trebuie să fie produse simultan. Astfel, avantajele investigației prin interferometrie holografică pot fi extinse și investigației anumitor materiale, componente și sisteme ce se găseau inițial în afara sferei de studiu a interferometriei clasice din pricina suprafețelor și texturii acestora. De asemenea, datorită faptului că undele care interferă nu sunt generate simultan, se pot compara interferometric fronturi de undă diferite ce vin fie de la același obiect aflat în stări diferite, fie de la două obiecte pe care dorim să le comparăm.

În cazul interferometriei cu dubla expunere pe același mediu (emulsie fotosensibilă depusă pe sticlă sau senzor digital) sunt înregistrate holografic două

unde provenite de la un obiect ce se vrea studiat corespunzătoare celor două stări consecutive ale acestuia.

$$|\Psi|^2 = 2C^2 a_o^2 [1 + \cos \Delta\varphi(\vec{r})] \quad (4.9)$$

Orice diferență de fază poate fi corelată fenomenologic cu o deplasare sau o deformare, fenomene ce induc o diferență de drum geometric între cele două unde holografice sau o schimbare în transparentă a obiectului care induce o modificare a distribuției indicelui de refracție. Ambele situații duc la modificarea drumului optic în unda obiect și la generarea de franje de interferență suprapuse peste imaginea reconstruită a obiectului.

4.2 DHI în timp real cu reconstrucția optică a frontului de undă cu ajutorul modulatorului spațial de lumină (SLM). Condiții experimentale

Interferometria holografică digitală presupune înlocuirea senzorului convențional (placa holografică) cu unul digital (senzori digitali CCD sau CMOS). Interferometria holografică digitală în timp real poate fi analizată ca o succesiune de interferograme diferențiale rezultate din scăderea consecutivă a unor cadre holografice succesive dintr-un cadru de referință, deci avem de a face cu “o succesiune de duble expuneri” (Fig. 4.1). Reconstrucția fronturilor de undă ce interferează este rezultatul dat de difracția pe matricea rezultată a unei unde incidente (operația se poate face digital, folosind un soft de reconstrucție ce simulează difracția, sau optic cu ajutorul unui modulator spațial de lumină).

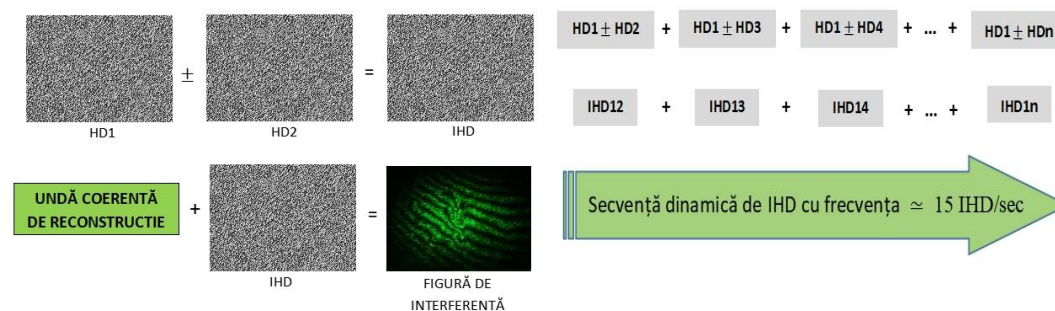


Fig. 4.1 Reprezentarea schematică a proceselor de formare și reconstrucție digitală în aplicațiile de interferometrie holografică digitală.

Interferometria holografică digitală în timp real poate fi analizată ca o succesiune de interferograme diferențiale rezultate din scăderea consecutivă a unor cadre holografice succesive dintr-un cadru de referință.

Capitolul 5

Aplicații experimentale de DHI în timp real cu ajutorul SLM în studiul obiectelor difuze

În secțiunile capitolului sunt prezentate aplicații experimentale de vizualizare a translației unui obiect difuz pe o direcție perpendiculară pe direcția de vizualizare și de asemenea sunt studiate diferite defectelor structurale ale unor suprafețe pictate cu aplicabilitate în analiza operelor de artă. Pe lângă metodele experimentale este prezentată și o simulare în cazul micilor deplasări și datele experimentale sunt comparate cu cele simulate. Pentru aceste investigații au fost concepute două configurații experimentale care vor fi descrise în cadrul secțiunilor capitolului.

5.1 Studiul micilor deplasări - translația suprafeței studiate pe o direcție normală la vectorul de sensibilitate.

5.1.1 Principiul metodei

Undele difractate de două holograme înregistrate pe același material ce corespund unor stări ușor diferite ale aceluiași obiect interferă la rândul lor. Obiectul poate suferi mici deplasări laterale și hologramele corespunzătoare obiectului în două stări diferite și compuse numeric într-o interferogramă pot genera prin difracția unei unde de reconstrucție o imagine a obiectului însuși, peste care se suprapune o rețea de franje de interferență perpendiculare pe direcția de translație. Densitatea franjelor depinde de valoarea deplasării și putem determina magnitudinea deplasării din valoarea interfranjei.

Franjele obținute prin reconstrucția optică prin difracție au fost corelate cu translația laterală a obiectului fixat pe o măsura micrometrică ce permite controlul deplasării. În paralel cu reconstrucția optică am efectuat și o reconstrucție numerică a

acelorași interferograme digitale. Se poate vedea în Fig. 5.5 similitudinea figurilor de interferență.

5.1.2 Condiții experimentale

Cu ajutorul montajului experimental a cărui configurație este prezentată în Fig.5.3 mi-am propus determinarea și vizualizarea modificărilor suferite de suprafața unui obiect difuz fie că este vorba de translație așa cum este prezentată în această secțiune sau deformare așa cum se va vedea în secțiunea următoare a acestui capitol

Montajul experimental este unul hibrid compus dintr-un montaj secundar de achiziție holografică digitală și o linie de reconstrucție care funcționează simultan cu montajul de achiziție întreg ansamblul putând efectua investigații în timp real prin achiziții și reconstrucții digitale simultane.

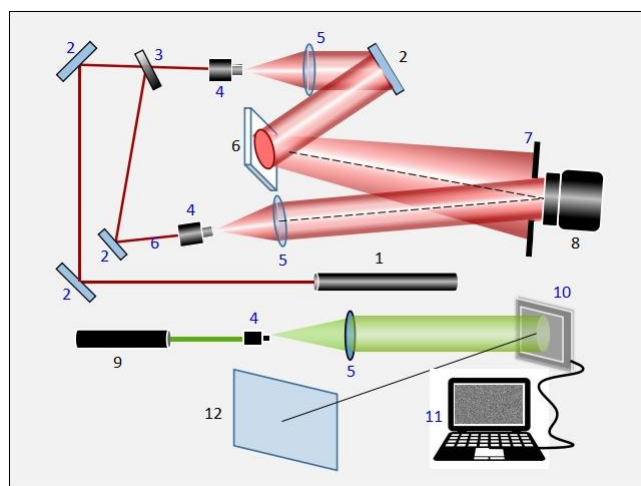


Fig. 5.3 Schema montajului hibrid de achiziție și reconstrucție holografică în timp real: (1) Laser He-Ne; (2) oglinzi; (3) divizor de fascicul variabil; (4) filtre spațiale; (5) lentile convergente pentru colimare; (6) obiect difuz; (7) diafragmă; (8) cameră digitală CCD; (9) laser Yag:Nd în regim continuu (532 nm); (10) SLM LCoS HoloEye HEO 1080; (11) laptop; (12) ecran de proiecție a imaginii reconstruite.

Este de precizat că modulatorul spațial reconstruiește în întregime cadrele holografice achiziționate de cameră păstrând aceeași frecvență de afișare a lor deci putem vorbi așadar în această primă etapă de achiziția și reconstrucția unor "filme holografice".

5.1.3 Rezultate experimentale

Achiziția holografică digitală a fost făcută cu ajutorul unui laser cu He-Ne ($\lambda = 632.8$ nm), iar reconstrucția franjelor s-a făcut cu un laser Nd:YAG ce funcționează în regim continuu dublat în frecvență cu lungimea de undă de 532 nm. Pentru o comparație calitativă a metodei a fost efectuată și reconstrucția numerică a hologramelor înregistrate digital. A fost simulată difracția pe distribuția de pixeli de diferite nivele

de gri asociate distribuției de intensitate în figura de interferență din planul sensorului. Reconstrucția numerică a fost efectuată în programul Matematica.

În Fig. 5.5 se pot observa obiectul iluminat cu unda de referință, reconstrucția holografică a acestuia prin difracție pe SLM și o serie de interferograme holografice reconstruite optic și numeric corespunzătoare diferitelor deplasări ale obiectului [12].

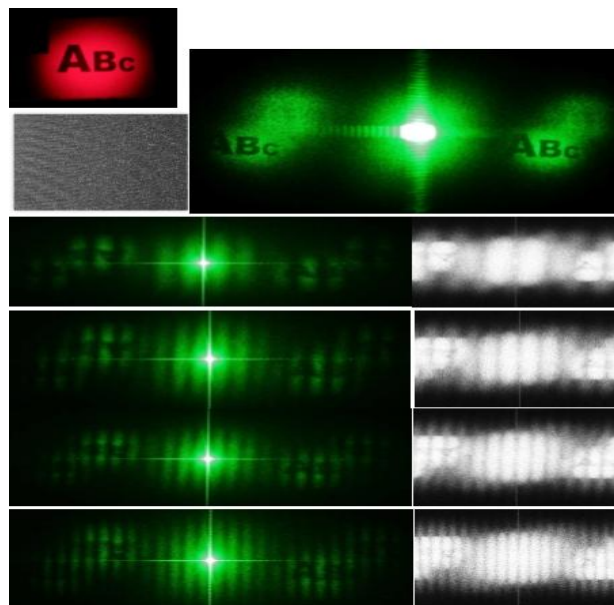


Fig. 5.5 Secvență în timp real de patru interferograme holografice corespunzătoare unor deplasări laterale dintr-o succesiune de cadre înregistrate digital și reconstruite cu modulatorul spațial în fază HoloEye HEO 1080: a) obiectul difuz iluminat cu unda coerentă; b) holograma de amplitudine înregistrată digital c) difracția undei de reconstrucție pe SLM-ul care afișează holograma de fază; d) secvență de interferograme holografice e) secvență de interferograme holografice calculate numeric

Se poate observa că planele de focalizare al obiectului respectiv al figurii de interferență sunt diferite și focalizarea selectivă se poate face din montajul de reconstrucție prin modificarea poziției lentilei de focalizare a fascicolului de reconstrucție care este modulată de SLM.

5.2 Aplicații în studiul defectelor structurale ale operelor de artă

5.2.1 Aplicații ale tehnicilor optoelectronice în conservarea și restaurarea operelor de artă

Odată cu dezvoltarea diferitelor tehnologii opto-electronice, s-a impus și o aplicare a acestor tehnologii în diagnosticarea și restaurarea artefactelor luând naștere o întreagă tendință în conservarea obiectelor ce țin de o întreagă moștenire istorică și culturală

prin folosirea și adaptarea noilor tehnologii în procedurile specifice acestei direcții. Interferometria holografică este o metodă ce poate oferi indicii valorase despre structura suprafețelor difuze [13]. DHI poate fi aplicată în procedurile de diagnosticare cât și de restaurare, dar și în metodele de autentificare și identificare a acestora.

5.2.2 Rezultate experimentale în investigarea defectelor structurale în artefactele pictate prin DHI în timp real

Pentru a aplica DHI în timp real pentru investigarea defectelor structurale pentru diferite suprafețe pictate am folosit două montaje experimentale. Cu ajutorul aceluiași montaj am investigat și anumite zone din suprafața unei icoane pictată în tehnica ulei pe lemn [14]. Defectele identificate sunt constituite din crăpături și desprinderi ale stratului de vopsea de pe substratul de grund și sunt prezentate în Fig. 5.7.

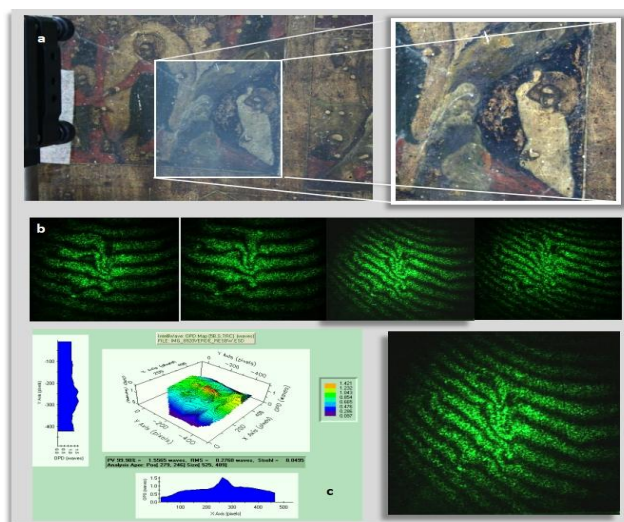


Fig. 5.7 Defect de crăpare și desprindere a stratului de vopsea de pe o icoana în ulei pe lemn de sec. XIX investigat prin interferometrie holografică digitală în timp real: a) Imaginea zonei studiate; b) secvență de interferograme; c) distribuția diferenței de drum optic generate de defect în timpul investigației.

Un al doilea tip de montaj a fost aplicat în studiul unei suprafețe pictate în tehnica frescă (Fig. 5.8). Am optat pentru această configurație pentru că de cele mai multe ori obiectele studiate sunt de dimensiuni prea mari pentru a fi transportate în laborator fără riscuri considerabile. De asemenea dacă obiectul este prea mare se cere o geometrie a componentelor care să scoată în afara montajului obiectul studiat.

Montajul de interferometrie holografică propus are la bază o configurație de tipul interferometrului Michelson cu divizare de amplitudine. Acest lucru permite poziționarea obiectului într-unul din brațele montajului, permițând ca pe celălalt braț să se propage fascicolul de referință. În zona de suprapunere a celor două unde am plasat camera digitală pentru achiziția secvențială a hologramelor. Pe lângă faptul că această configurație scoate obiectul practic în afara montajului conferă și avantajul

unui unghi mic între unda obiect și cea de referință fapt care face ca frecvența franjelor pe senzorul digital să nu depășească o valoare optimă dată de frecvența relativ mică pixelilor comparativ cu plăcile clasice cu emulsii.

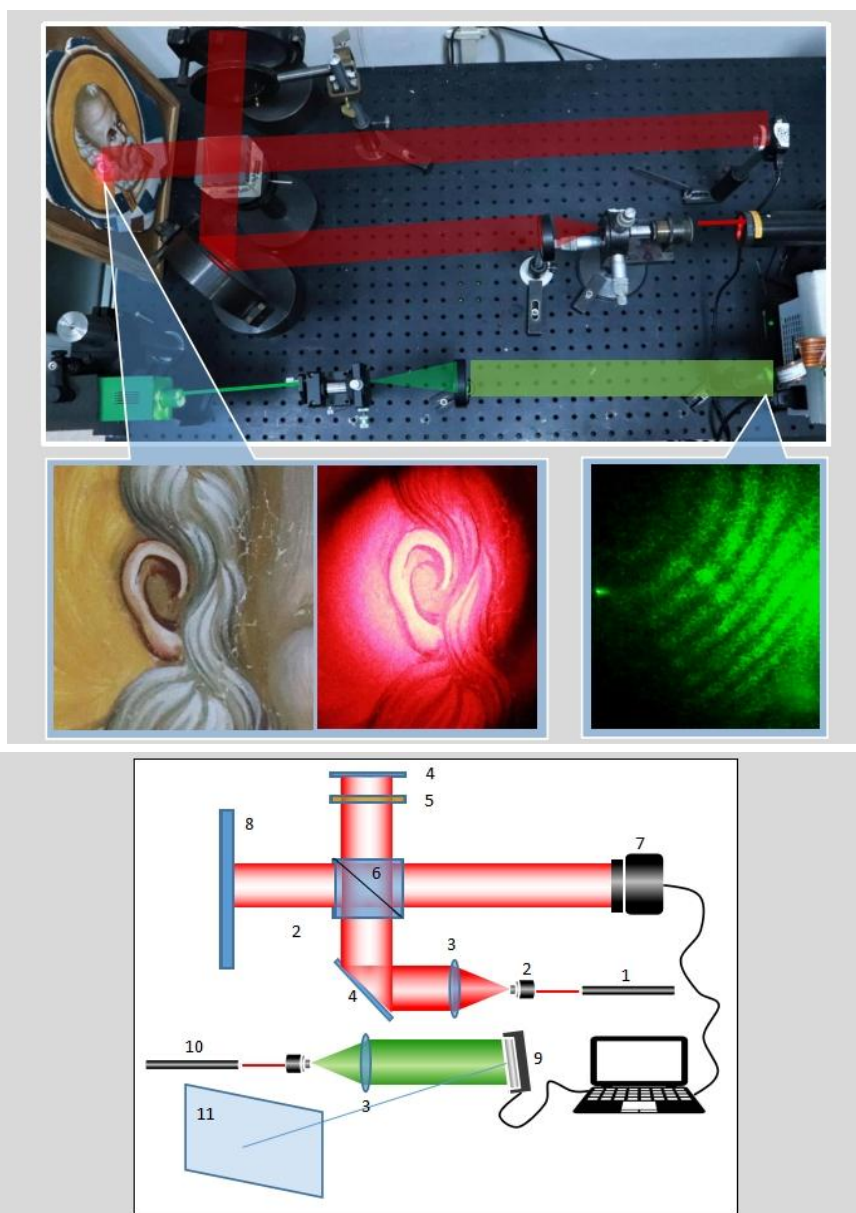


Fig. 5.8 Imaginea de laborator și schema montajului experimental de DHI în configurație Michelson, folosit în studiul defectelor structurale ale unei suprafețe pictate în tehnica "fresco" (1) laser He-Ne polarizat liniar; (2) filtre spațiale; (3) lentile de colimare; (4) oglinzi plane; (5) polarizor; (6) cub divizor; (7) cameră CCD; (8) obiect; (9) modulator spațial digital în fază HoloEye HEO 1080; (10) laser cu YAG:Nd în regim continuu 532 nm; (11) ecran de proiecție a figurii de interferență.

În Fig. 5.9 sunt prezentate trei zone de frescă studiate în detaliu asupra cărora s-au indus mici modificări de temperatură pentru a genera franje de interferență.



Fig. 5.9 Aspecte ale franjelor de interferență într-o serie de secvențe de interferometrie holografică digitală în timp real aplicată asupra unor zone dintr-o icoană în tehnica frescă.

Această metodă poate fi aplicată cu succes în acest tip de aplicații având ca principală limitare suprafața relativ mică ce poate fi investigată într-o singură secvență de interferograme holografice (diametrul de ~ 7 cm). Aceasta este cauzată atât de puterea dezvoltată de sursa coerentă folosită, de coerența spațială a acesteia, dar și de condițiile de limită a frecvenței spațiale a franjelor din hologramă impuse de frecvența pixelilor senzorului digital.

Capitolul 6

Aplicații experimentale de DHI în timp real în studiul obiectelor de fază

O categorie foarte importantă de obiecte ce intră în sfera de studiu a interferometriei holografice o constituie obiectele de fază, transparente la radiația folosită, dar care modifică drumul optic al luminii dintr-un fascicul prin variațiile de indici de refracție induse în comparație cu un fascicul coerent cu același drum geometric. Anumite reacții chimice, difuzia lichidelor, dizoluția, cristalizarea, conducția termică, dizolvarea sau turbulențele sunt fenomene care duc la variații ale indicelui de refracție în volumul obiectelor. Variațiile indicelui de refracție generează diferențe de drum optic ce pot constitui obiectul de investigație al DHI [15], [16], [17].

6.1 Vizualizare în timp real a turbulenței și dizolvării în lichide.

Pentru a demonstra aplicabilitatea metodei de interferometrie holografică în timp real propusă pentru acest tip de investigații am folosit o configurație experimentală similară cu cea prezentată în secțiunea 5.1.2 cu deosebirea că obiectul difuz a fost înlocuit cu un ecran alb mat cu o suprafață de granulație foarte mică, iar obiectul transparent studiat, în cazul nostru un lichid, a fost pus într-o cuvă de cuarț poziționată în fața ecranului difuz Fig. 6.2. Drumul geometric este același în cele două brațe ale montajului holografic, diferența de drum optic și implicit figura de interferență fiind generate de variații ale indicelui de refracție din volumul lichidului poziționat în brațul obiect. În cazul de față au fost vizualizate în timp real convecția și difuzia [18].

Convecția a fost observată în timp real odată cu formarea de curenți turbionari în volumul lichidului atunci când în apă a fost picurată soluție saturată de NaCl sau etanol de concentrație 70%.

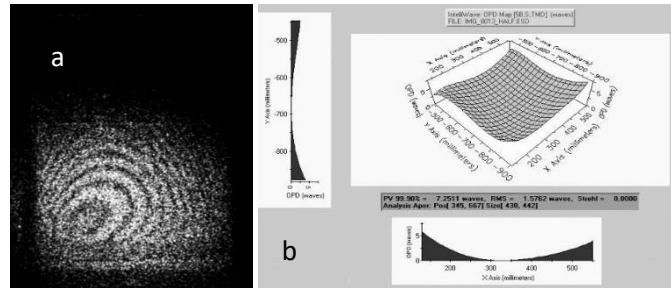


Fig. 6.2 Franjele de interferență generate de diferența de drum optic indusă de prezența apei într-o cuvă de cuarț, primul cadru holografic achiziționat fiind acela al cuvei goale (a); o distribuție a diferenței de drum optic ilustrat de franje (b).

În Fig. 6.3 este prezentată o serie de patru imagini reconstruite la un interval de o secundă dintr-o serie de interferograme holografice achiziționate în timpul convecției. Procesul a putut fi observat în timp real cu o frecvență de 22 interferograme pe secundă.

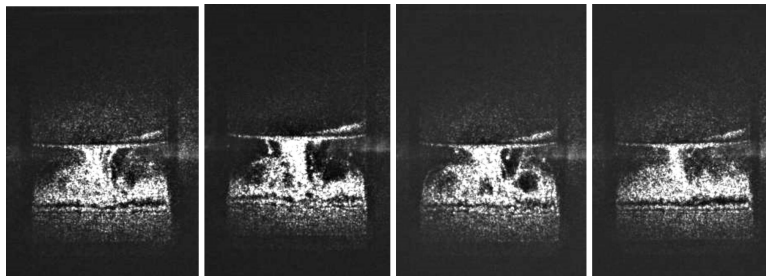


Fig. 6.3 Secvență de 4 imagini reconstruite la intervale de o secunda ale procesului de convecție observat în timp real prin DHI

În Fig. 6.4 este prezentată e succesiune de patru imagini în care se poate vedea pe lângă convecție și procesul de disoluție a unei soluții saturate de NaCl sau etanol de concentrație 70% în apă.

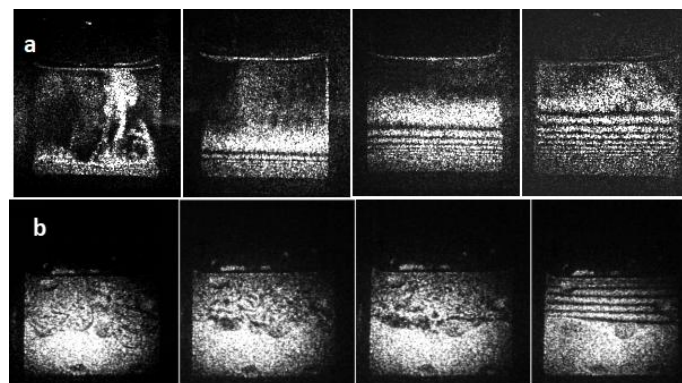


Fig. 6.4 Secvența de 4 imagini reconstruite din interferograme înregistrate în timp real (22 fps) în care este prezentat un proces de disoluție a două lichide: a) soluție salină saturată în apă (în prima imagine se poate observa convecția generată de o picătură de soluție saturată de NaCl în apă); b) etanol în apă

Ultimele trei imagini sunt achiziționate la intervale diferite și se poate observa că densitatea liniară a franjelor diferă pe de o parte de la un cadru la altul, dar și odată cu adâncimea. Pentru ultimul cadru din Fig. 6.4.a este trasată o hartă a diferenței de drum optic a variației indicelui de refracție cât și o distribuție de intensitate în funcție de adâncime (Fig. 6.5).

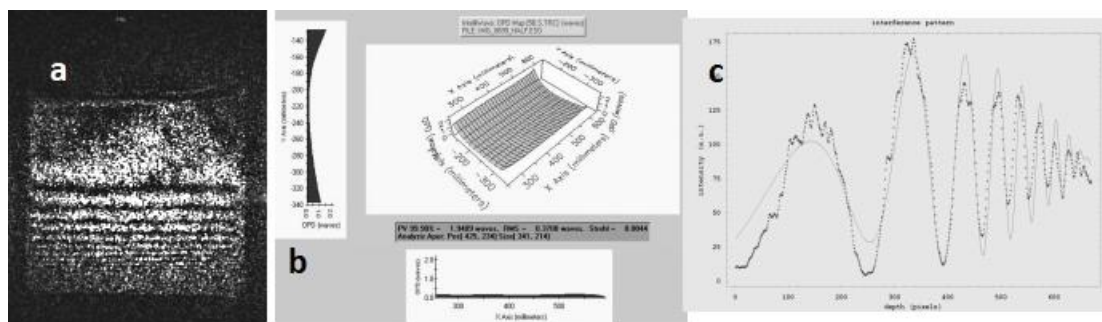


Fig. 6.5 Reconstrucția unei interferograme holografice generată de o cuvă de cuarț umplută cu apă în care se dizolva NaCl. (a); Distribuția indicelui de refracție corelat cu distribuția OPD generată cu ajutorul IntelliWave (b); Distribuția de intensitate în funcție de adâncime (c).

Densitatea franjelor corespunde cu variația indicelui de refracție care este de asemenea corelat cu variația densității cu adâncimea. Imaginea este înregistrată în timpul procesului de dizoluție după 1450 s. Variația interfranjei corespunde unui gradient de indice de refracție corelat cu variația exponențială a densității cu adâncimea.

6.2 Monitorizarea fenomenului de evaporare a picăturii de apă

Picăturile de apă sunt folosite pe scară largă în aplicații tehnologice și biologice și comportamentul lor în anumite condiții este studiat prin diferite metode [19].

Pentru că sunt aproape imposibil de investigat optic modificările de formă și de indice de refracție în interiorul unei picături prin folosirea unei unde plane am propus într-una din lucrările științifice care s-a încadrat în tematica prezentei teze folosirea unei unde divergente ca instrument de investigare interferometrică [20]. Chiar dacă folosirea fasciculelor divergente în aplicații de interferometrie nu este o practică nouă, inovația și originalitatea constau în configurația montajului experimental. Investigarea și caracterizarea unei picături de apă cu ajutorul interferometrului Mach-Zehnder nu a dat rezultatele așteptate conform Logofătu and all. [21]. Montajul de interferometrie holografică în timp real (Fig. 6.7) este compus, ca și celelalte montaje prezentate dintr-o componentă de achiziție holografică pe un senzor digital și alta de reconstrucție holografică folosind un modulator spațial în fază.

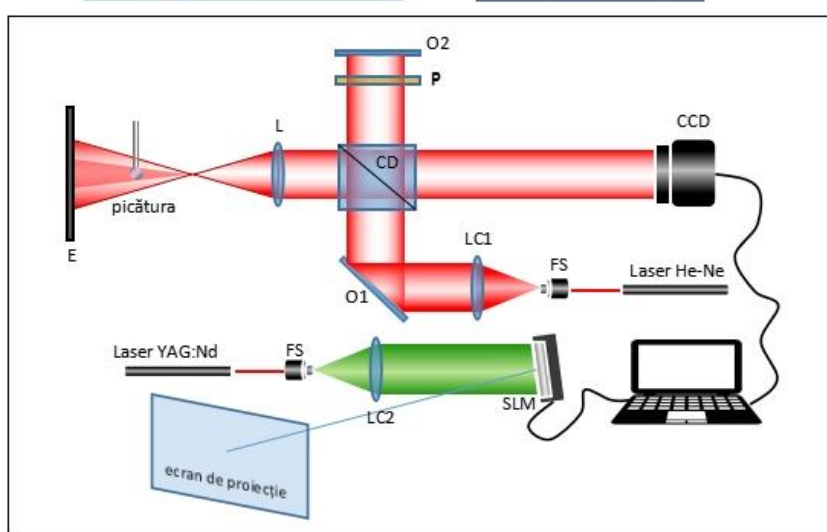
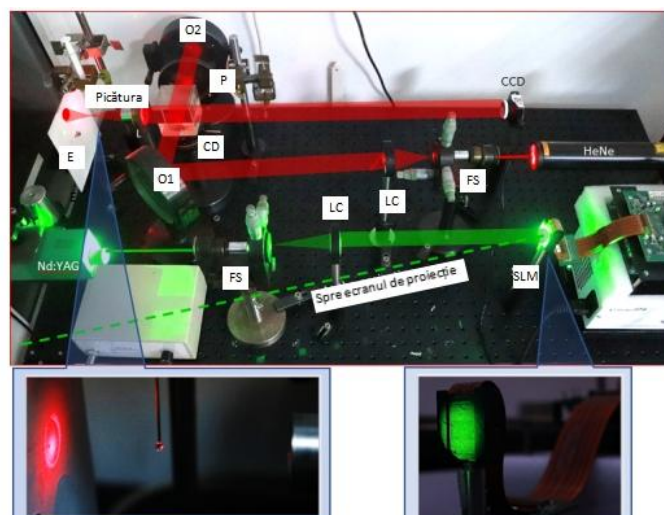


Fig. 6.7 Montajul de interferometrie holografică digitală în timp real pentru monitorizarea evaporării picăturii de apă în suspensie: laser He-Ne polarizat (633 nm); laser cu Nd:YAG dublat în frecvență (532 nm); FS - filtru spațial; LC1, LC2 - lentile de colimare; O1, O2 - oglinzi plane; P - polarizor (folosit ca atenuator); CD - cub divizor; E - ecran alb mat.

Lentila și picătura ca medii transparente refractive au roluri diferite în montaj în funcție de sensul razelor de lumină care le străbat. La rima trecere a fascicolului dinspre filtrul spațial spre ecranul mat lentila transformă fascicolul colimat într-unul divergent. La cea de a doua trecere de la ecran spre filtrul spațial, picătura care este foarte mică nu are aproape nici un efect asupra frontului de undă complex reflectat de ecran, iar lentila L are în acest caz rolul de a forma imaginea ecranului ce poartă proiecția picăturii. În paralel cu datele experimentale a fost efectuată și o simulare teoretică a evaporării picăturii de apă și au fost de asemenea calculate niște secvențe dinamice ale interferogramelor pentru a fi comparate cu datele experimentale (Fig. 6.8). În simulări viteza de variație a interfranței a fost ajustată cu cea obținută experimental și pe baza acestei corelări am putu obține o viteză de evaporare de $v = 0.14 \mu\text{l}/\text{m}^2\text{s}$

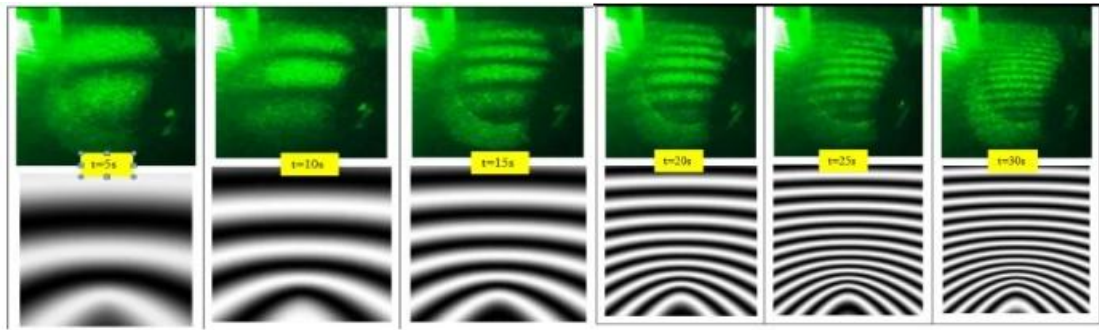


Fig. 6.8 – Două secvențe de șase imagini reconstruite selectate din interferogramele dinamice ce caracterizează evaporarea picăturii de apă, experimental (lumină verde) și în simulare numerică (alb-negru).

Pe lângă studiul evaporării picăturii de apă în suspensie, am elaborat și un montaj de interferometrie holografică ce permite studiul evaporării picăturii de apă de pe o suprafață (Fig. 6.9). Din cauza evaporării, curbura acesteia se modifică și acest lucru induce modificări în forma frontului de undă obiect care se văd în figura dinamică a franjelor de interferență care sunt circulare, de tip Heidinger.

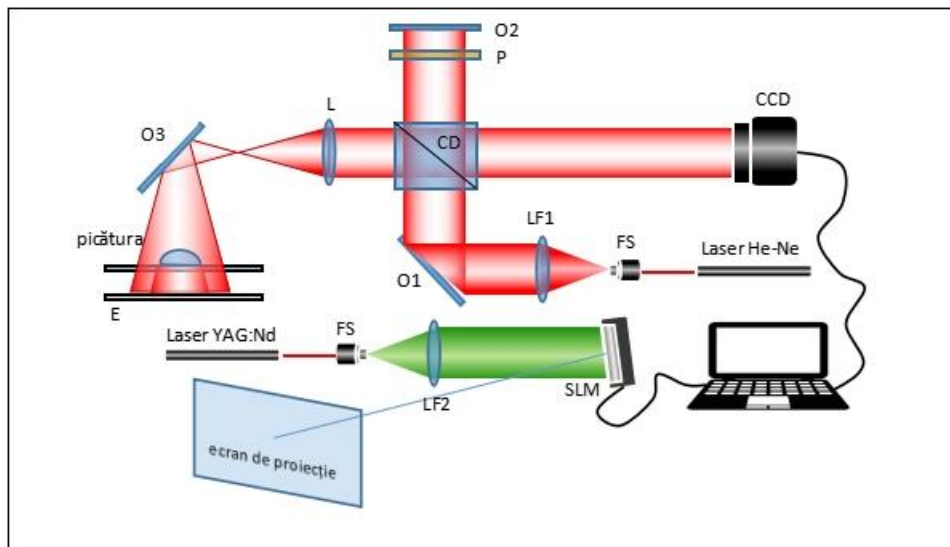


Fig. 6.9 Schema montajului experimental de interferometrie holografică digitală în timp real de monitorizare a evaporării picăturii de apă de pe o suprafață orizontală: laser He-Ne polarizat (633 nm); laser cu Nd:YAG dublat în frecvență (532 nm); FS - filtru spațial; L, LC1, LC2 - lentile de colimare; O1, O2, O3 - oglinzi planE; P - polarizor (folosit ca atenuator); CD - cub divizor; E - ecran alb mat.

Pentru compararea rezultatelor obținute prin DHI cu modularea spațială a luminii am evaluat viteza de evaporare a picăturii și cu ajutorului interferometrului în lumină albă Ambios Xi-100. În Fig. 6.11 sunt prezentate instantanee selectate din secvențele de interferograme dinamice obținute prin cele două metode.

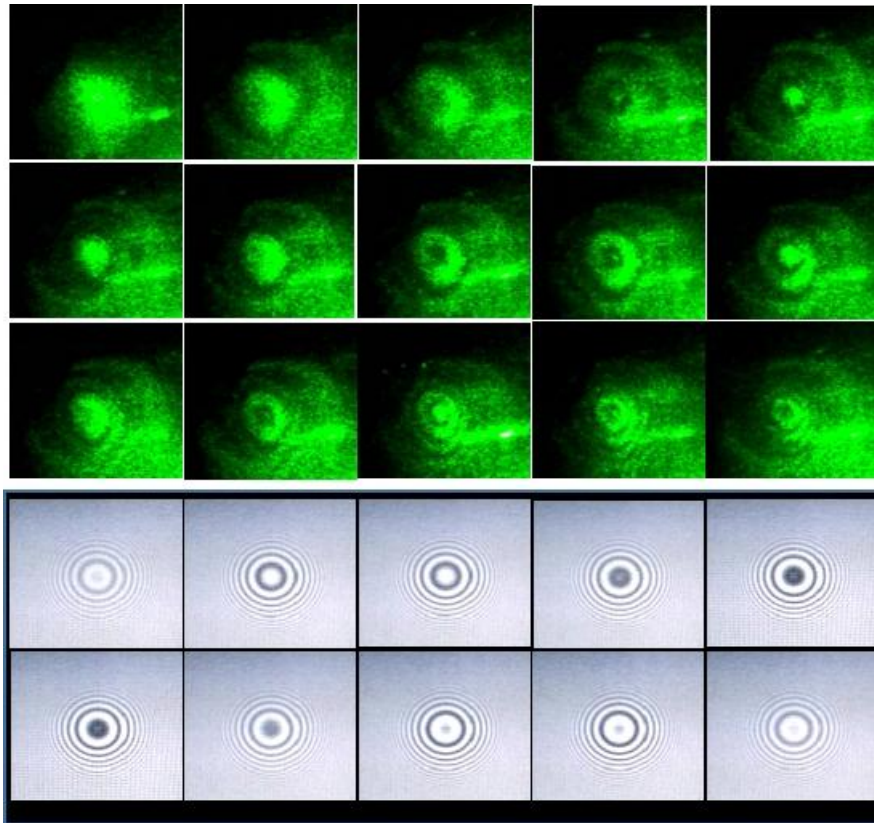


Fig. 6.11 Cadre succesive dintr-o secvență dinamică de interferograme obținute prin interferometrie holografică în timp real (lumină verde) și interferometrie în lumină albă generate de evaporarea unei picături de apă de pe o suprafață orizontală.

Cercetările privind acest comportament al picăturii pe suprafețe vor fi aprofundate, în scopul înțelegerii "efectului petei de cafea" (*coffee stain effect*) din perspectiva dinamicii fluidelor, al modului de investigare prin interferometrie holografică digitală și a aplicației acestuia în diferite domenii.

Capitolul 7

Concluzii

Tehnicile de calcul, algoritmi de reconstrucție elaborați în holografia digitală sunt consumatoare de resurse și timp și de cele mai multe ori aplicațiile necesită o corelare cu dinamicitatea fenomenelor studiate. Reconstrucția numerică a hologramelor are anumite limitări în aplicații de investigare a fenomenelor în timp real din cauza timpului de calcul. Tehnologiile optoelectronice trebuie să se regăsească în holografie pentru că pot fi liantul între înregistrarea pe mediul digital care generează un fișier virtual, o hologramă digitală ca o distribuție matricială de pixeli de intensități diferite și reconstrucția obiectului care poate fi instantanee, fizică prin metode optice difractive concrete, direct pe dispozitivul SLM care devine varianta "hard" a hologramei virtuale. Această cuplare a celor două etape s-a realizat cu succes pe parcursul experimentelor ce au fost efectuate pe durata tezei.

7.1 Rezultate obținute

Pe parcursul tezei toate metodele de înregistrare și diagnosticare a fronturilor de undă, altele decât holografia sau interferometria au fost însoțite de exemplificări experimentale efectuate personal sau la care am luat parte în interiorul colectivului SOL din cadrul INFLPR. Orice metodă de investigare care a fost prezentată teoretic a fost însoțită așadar de o parte experimentală efectuată personal.

- Am conceput și aplicat montaje și experimente de holografie digitală cu achiziție digitală și reconstrucție numerică și optic-digitală cu ajutorul SLM. Am comparat parametrii și rezultatele obținute în experimentele cu reconstrucție digitală și numerică.
- am reușit să corelez procedeul de înregistrare holografică digitală folosind o cameră CCD cu procesul de reconstrucție prin difracție optică instantanee pe SLM și să obțin un montaj hibrid de interferometrie holografică digitală ce efectuează investigații în timp real asupra diferitelor obiecte transparente (de fază) sau difuze.
- Am reușit să dovedesc funcționalitatea și utilitatea acestui montaj în diferite investigații ca
 - Monitorizarea în timp real a deplasărilor unui obiect în plan perpendicular pe direcția de vizualizare
 - Monitorizarea în timp real a diferitelor fenomene ca dizolvarea, difuzia, turbulența în lichide, viteza de evaporare a picăturilor de apă.

- Am demonstrat că se poate investiga interferometric comportamentul picăturilor de apă prin folosirea unui fascicul divergent ce interferă cu unul de referință și care produc franje ce pot fi reconstruite holografic și vizualizate în timp real și care conferă indicii despre comportamentul picăturii ca obiecte de fază.
- Am identificat defecte structurale în obiecte difuze prin investigații de interferometrie holografică digitală în timp real asupra suprafețelor. Au fost studiate suprafețe ale unor icoane în ulei și frescă, metoda putând fi aplicată și obiectelor de artă din piatră, ceramică, lemn, metal, etc. Defectele structurale au fost vizibile prin discontinuități ale franjelor generate de discontinuitățile structurale prezente în suprafețe.
- În final, am propus o schemă de montaj compact alcătuit dintr-un sub montaj de achiziție holografică digitală și unul de reconstrucție optic-difracțivă cu ajutorul SLM. Interferogramele digitale obținute prin scăderea consecutivă a hologramelor dintr-o hologramă corespunzătoare unei stări de referință a frontului de undă sunt afișate simultan pe monitorul computerului și implicit pe SLM care se comportă ca un al doilea monitor, în fază.

7.2 Contribuții originale

În prezenta lucrare am încercat să aplic și să adaptez metodele clasice de holografie și interferometrie holografică diferitelor aplicații folosind tehnici computaționale, și dispozitive optoelectronice care au transformat metodele clasice în metode digitale. Deși am folosit montaje clasice, consacrate de holografie în aceeași manieră clasică, în unele aplicații acestea au fost adaptate conform cu componentele optoelectronice folosite și cu metoda numerică sau optică de reconstrucție ținând cont de caracterul digital al metodei. De asemenea am dezvoltat și metode numerice de generare a hologramelor și de simulare a fenomenelor optice de reconstrucție ca difracția Fresnel, Fraunhofer sau Fourier. Deși în holografie înregistrarea și reconstrucția sunt două faze distincte ale procedurii, am încercat în lucrarea de fază să corelez aceste etape și să le aplic simultan pentru a conferi metodei aplicabilitate în investigații ce se fac în timp real păstrând aspectul digital al metodei ce o conectează la facilitățile IT, dar și dimensiunea clasică a metodei ce-i păstrează caracterul dinamic și elimină timp de procesare numerică.

Așadar, se poate spune că elementul de originalitate al prezentei teze este ***contribuția adusă la dezvoltarea unui dispozitiv compact opto-electronic ce poate efectua investigații holografice sau de interferometrie holografică digitală în timp real asupra diferitelor fenomene sau obiecte de interes.***

În acest scop am realizat mai multe montaje experimentale ce au condus în final la o propunere de montaj compact opto-electronic de DHI în timp real. Pe parcursul tezei am încercat să demonstrez funcționalitatea acestui montaj compact prin diferite investigații:

- Am monitorizat în timp real deplasări laterale ale obiectelor difuze prin achiziție digitală de holograme în regim video corelată cu o reconstrucție simultană a acestora printr-o metodă optic-digitală folosind un modulator spațial digital.
- am arătat că montajul poate fi util în monitorizarea în timp real a gradientilor de refracție în obiectele transparente. În acest scop am vizualizat în timp real prin interferometrie holografică digitală diferite fenomene ce au loc în lichide transparente (dizolvare, disoluție, turbulențe, convecție). Datele experimentale au fost prelucrate numeric și au fost extrase informații importante privind parametrii de funcționare ai montajului cât și date privind fenomenele investigate.
- Am demonstrat că diferite configurații experimentale montajul pot fi folosite cu succes în investigarea defectelor structurale ale obiectelor difuze. În acest scop am investigat diferite defecte structurale ale suprafețelor unor icoane pictate în tehnica ulei și frescă. Unul din avantajele montajului propus este ca, prin faptul că este compact, poate fi transportat și folosit *in-situ*, facilitate foarte utilă în cazul acestui timp de investigații.

Originalitatea montajului propus constă tocmai în eliminarea unor constrângeri tipice investigațiilor holografice ce constau în stabilitatea ridicată configurației experimentale, o foarte bună izolare mecanică a componentelor optice, procesare numerică la reconstrucție consumatoare de timp și resurse digitale. Condițiile experimentale se simplifică în momentul folosirii unui modulator spațial în tandem cu un senzor digital de achiziție cuplate printr-o aplicație numerică ce poate cupla hologramele înregistrate într-o interferogramă holografică. Principalele avantaje ale dispozitivului propus sunt:

- **Mobilitatea:** poate fi transportat cu ușurință pentru aplicații *in-situ*. Este compact, toate componentele optice și electronice fiind fixate pe o placă metalică, iar achiziția fiind efectuată digital și reconstrucția optic cu ajutorul SLM timpii de înregistrare sunt foarte mici fapt ce izolează suplimentar metoda de influențele mecanice.
- **Eliminarea considerabilă a nevoii de izolare mecanică:** spre deosebire de holografia clasică, în care înregistrarea se face pe medii convenționale și timpii de expunere sunt lungi (de ordinul zecilor de secunde) raportat la finețea detaliilor care sunt înregistrate (franje de interferență de ordinul zecilor de nm), fapt ce necesită o bună izolare mecanică a montajului experimental. Dacă înregistrarea se face digital, senzorul permite un foarte bun control ai parametrilor de expunere (timp de expunere, gain, gamma, frame rate, etc.) ce pot compensa cu succes condițiile experimentale (luminozitate, zgomot mecanic
- **Posibilitatea de adaptare în timp real a parametrilor experimentali:** spre deosebire de metodele clasice de holografie în care condițiile de expunere și configurația experimentală pot fi adaptate și modificate post înregistrare, în cazul de față, pentru că reconstrucția se face simultan cu înregistrarea, toți parametrii experimentali (timp expunere, aliniere, etc.) pot fi reglate și adaptate condițiilor de înregistrare și parametrilor ce caracterizează obiectul chiar în timpul experimentului.

- **Posibilitatea conectării la experiment, în timp real.** Metoda de înregistrare și reconstrucție fiind în totalitate digitalizată se poate face cu ajutorul dispozitivelor optoelectronice ce se pot conecta în timp real prin intermediul rețelelor și internetului. Astfel, la aceeași investigație pot lua parte observatori din locații diferite, fiecare putând adapta parametri experimentali conform cu propriile preferințe.

Se observă așadar că metoda propusă combină avantajele digitalizării în înregistrarea holografică a undelor și avantajele reconstrucției instantanee prin difracție în procesul de reconstrucție a fronturilor de undă.

7.3 Lista lucrărilor originale

1. F. Garoi, **A. Sima**, D. Apostol, V. Damian, P. C. Logofătu, V. Nascov, Iuliana Iordache, Ludmila Serghei, Mihaela Bojan, “*SNR improvement of digital speckle pattern interferograms*”, Proc SPIE 6606-12, Advanced Laser Technologies 2006, Dan C. Dumitras; Maria Dinescu; Vitally I. Konov, Editors, 25 April 2007
2. Nascov, V., Apostol, D., Garoi, F., **Sima, A.** “*Plane deformation state determination by digital speckle correlation*” Advanced Laser Technologies 2006, Proceedings of SPIE 6606, art. no. 660613 (2007)
3. V. Damian, P. C. Logofatu, D. Apostol, L. Vekas, D. Bica, A. Damian, F. Garoi, I. Iordache, **A. Sima**, M. Bojan, “*Magnetic liquid surface behavior to external stimulus*” ROMOPTO 2006, Proc SPIE 6785 23, V.I. Vlad eds., (Bucharest, Romania, 2006) 1 August 2007
4. D. Apostol, **A. Sima**, P. C. Logofatu, F. Garoi, V. Nascov, V. Damian, Iuliana Iordache, “*Fourier transform digital holography*” ROMOPTO 2006: Eighth Conference on Optics, Valentin I. Vlad, Editors, Proc SPIE 6785 678522 Date: 1 August 2007
5. D. Apostol, **A. Sima**, P. C. Logofatu, F. Garoi, V. Damian, V. Nascov, Iuliana Iordache, “*Static Fourier transform lamdameter*” ROMOPTO 2006: Eighth Conference on Optics, Valentin I. Vlad, Editors, Proc SPIE 6785 678521, 1 August 2007
6. Damian, V; Bojan, M; **Sima, A**, et al., “*White light interferometry for vertical artifact calibration*”, Conference on Industrial Laser Applications (INDLAS 2007), Date: MAY 23-25, 2007, Bran, Romania, Proc SPIE 7007 0J (2008)
7. Petre Catalin Logofatu, **Adrian Sima**, Dan Apostol, Invited Paper “*Diffraction experiments with the spatial light modulator: the boundary between physical and digital optics*,” ATOM-N 2008, Constanta, SPIE Proceedings [7297-03] (2009)
8. B. Ionita, M. Rosu, D. Apostol, **A. Sima**, V. Damian, I. Cristea, “*IntelliWave™ Interferometric analysis software in laser interferometry laboratory*,” ATOM-N 2008, Constanta, SPIE Proceedings [7297-18] (2009)
9. Petre Cătălin Logofătu, John Robert McNeil, **Adrian Sima**, Bogdan Ioniță, Florin Garoi, Dan Apostol, “*The characterization of gratings using the optical scatterometer*,” Romanian

- Journal of Physics 55(3-4), 376-385 (2010)
10. P. C. Logofatu, F. Garoi, A. Sima, B. Ionita, D. Apostol, "Classical holography experiments in digital terms," Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 12(1) 85-93 (2010)
 11. A. SIMA, P. SCHIOPU, P. C. LOGOFATU, „Real-time digital holographic interferometry set-up for phase gradient in dynamic phase objects using spatial light modulator” ATOM-N Constanta, Proc. of SPIE Vol. 10010, 100100R (2016)
 12. A. SIMA, P. SCHIOPU, P. C. LOGOFATU, „Real-time digital holographic interferometric measurement of diffusive objects displacements using spatial light modulator” Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 2017 9th International Conference, IEEE, december 2017
 13. A. SIMA, P. SCHIOPU, M. VLADESCU, F. GAROI, V. DAMIAN, B. M. GAVRILLOAIA, „Real - time spatial light modulated digital holographic interferometry applied in art structural diagnosis” , FABULOUS 2017 CONFERENCE, BUCHAREST, ROMANIA, OCTOBER 12 - 14, 2017
 14. Cristian Damian, Adrian Sima, Tiberius Vasile, and Daniela Coltuc. *Microscanning in hadamard spectroscopy*. Applied Optics, 56(18):5211, jun 2017.
 15. A. SIMA, P. C. LOGOFĂTU, M. L. PASCU, I. NICOLAE, "Monitoring droplet evaporation via real-time digital holographic interferometry using a phase only spatial light modulator", ROMANIAN REPORTS IN PHYSICS 74, 402 (2022)

7.4 Perspective de dezvoltare

Scopul prezentei teze a fost acela de a aduce o contribuție în ceea ce privește racordarea la tehnologia digitală a holografiei și interferometriei holografice cunoscute ca metode clasice de înregistrare și investigare a undelor și de a conferi acestor metode avantajele tehnologie inteligente (IT). Perspectivele de dezvoltare se încadrează în acest scop:

- Doresc să optimizez softul de producere a interferogramelor digitale prin introducerea în algoritmul de reconstrucție din hologramele înregistrate secvențial a unei opțiuni ce deplasează ordinul +1 de difracție corespunzător obiectului reconstruit față de ordinul 0. În acest moment deplasarea se face din configurația montajului experimental. Pe viitor se poate păstra o configurație de holografie *in-line* cu o mai mare ușurință în realizare și cu o mai bună eficiență de difracție la reconstrucție, și obiectul reconstruit din ordinul +1 se poate deplasa prin algoritmi numerici pe care intenționez să-i introduc în softul de scădere a hologramelor.
- Doresc de asemenea să aplic pentru obținerea unui brevet pentru realizarea unui montaj compact de DHI în timp real cu reconstrucție prin SLM ce poate fi transportat și folosit în aplicații in-situ
- De asemenea intenționez să aplic configurațiile experimentale propuse de DHI în noi investigații privind comportamentul micro picăturilor de apă și alte lichide la interacția cu radiația coerentă în scopul obținerii de medii active laser lichid, comportamentul picăturilor de apă încărcate cu diferiți poluanți.

- De asemenea doresc să extind aplicabilitatea metodei în diferite investigații ale suprafețelor operelor de artă sau obiectelor arheologice, în procedee de restaurare sau diagnosticare nedistructive.

Chiar dacă holografia și interferometria holografică sunt consacrate ca metode interferometrice clasice de investigare și diagnosticare a fronturilor de undă, prin digitalizarea mediilor de înregistrare și a celor de modulare a luminii doresc să aprofundez și să mențin conectate aceste două metode la tehnologia actuală prezentă și dezvoltată în diferite dispozitive optoelectronice. Toate avantajele tehnologiei digitale vor menține aceste metode extrem de versatile în numeroase aplicații și folosirea lor va răspunde în mare măsură noilor provocări trasate de noile direcții de cercetare.

Bibliografie

- [1] Davies, S., Hu, Y., Jiang, N., Blyth, J., Kaminska, M., Liu, Y., & Yetisen, A. K. (2021). Holographic sensors in biotechnology. *Advanced Functional Materials*, 31(47), 2105645.
- [2] Yetisen, A. K., Naydenova, I., da Cruz Vasconcellos, F., Blyth, J., & Lowe, C. R. (2014). Holographic sensors: three-dimensional analyte-sensitive nanostructures and their applications. *Chemical reviews*, 114(20), 10654-10696.
- [3] Deng, Y., Chu, D. Coherence properties of different light sources and their effect on the image sharpness and speckle of holographic displays. *Sci Rep* 7, 5893 (2017).
- [4] Stuerwald, Stephan & Kemper, Björn & Remmersmann, Christian & Langehanenberg, Patrik & Bally, Gert. (2008). Application of light emitting diodes in digital holographic microscopy. *Proc SPIE*. 6995. 10.1117/12.781186.
- [5] Naoyoshi NAMEDA, Gert von BALLY, Required Factors of Incoherent Light Sources for Reconstruction of a Holographic Image, *Journal of Light & Visual Environment*, 2002, Volume 26, Issue 2, Pages 2_44-2_47, Released on J-STAGE January 31, 2003
- [6] Schnars, U., Falldorf, C., Watson, J., Jüptner, W. (2015). Digital Holography. In: *Digital Holography and Wavefront Sensing*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [7] Wolfgang Osten, Ahmad Faridian, Peng Gao, Klaus Körner, Dinesh Naik, Giancarlo Pedrini, Alok Kumar Singh, Mitsuo Takeda, and Marc Wilke, "Recent advances in digital holography [Invited]," *Appl. Opt.* 53, G44-G63 (2014)
- [8] Picart, P., & Li, J. C. (2013). *Digital holography*. John Wiley & Sons.
- [9] Mihailescu, M., Preda, L., Preda, A., & Scarlat, E. (2009). NATURAL OBJECT VISUALIZATION BY DIGITAL HOLOGRAPHY. *UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN-SERIES A-APPLIED MATHEMATICS AND PHYSICS*, 71(2), 59-64.
- [10] Cristian Damian, Adrian Sima, Tiberius Vasile, and Daniela Coltuc. *Microscanning in hadamard spectroscopy*. *Applied Optics*, 56(18):5211, jun 2017.
- [11] Schedin, S. (2006). Digital holographic interferometry. *Journal of Holography and Speckle*, 3(1), 1-17.
- [12] Sima, A., Schiopu, P., & Logofatu, P. C. (2017, June). Real-time digital holographic interferometric measurement of diffusive objects displacements using spatial light modulator. In *2017 9th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)* (pp. 1-4). IEEE.
- [13] Kosma, K., Andrianakis, M., Hatzigiannakis, K., & Tornari, V. (2018). Digital holographic interferometry for cultural heritage structural diagnostics: A coherent and a low-coherence optical set-up for the study of a marquetry sample. *Strain*, 54(3), e12263.
- [14] Sima, A., Schiopu, P., Vladescu, M., Gavrioloia, B. M., Garoi, F., & Damian, V. (2017, October). Real-Time Spatial Light Modulated Digital Holographic Interferometry Applied in Art Structural Diagnosis. In *International Conference on Future Access Enablers of Ubiquitous and Intelligent Infrastructures* (pp. 193-198). Springer, Cham.

-
- [15] He, M. G., Zhang, S., Zhang, Y., & Peng, S. G. (2015). Development of measuring diffusion coefficients by digital holographic interferometry in transparent liquid mixtures. *Optics express*, 23(9), 10884-10899.
- [16] Zhang, S., He, M., Zhang, Y., Peng, S., & He, X. (2015). Study of the measurement for the diffusion coefficient by digital holographic interferometry. *Applied Optics*, 54(31), 9127-9135.
- [17] Vasile, G. C., & Mihăilescu, M. (2018, December). Determination of refractive index profile of a single-mode optical fiber using digital holographic measurements. In *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX* (Vol. 10977, pp. 156-160). SPIE.
- [18] Sima, A., Schiopu, P., & Logofatu, P. C. (2016, December). Real-time digital holographic interferometry set-up for phase gradient study in dynamic phase objects using spatial modulator. In *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII* (Vol. 10010, pp. 217-223). SPIE.
- [19] Psaltis, D., Quake, S. R., & Yang, C. (2006). Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics. *nature*, 442(7101), 381-386..
- [20] Sima, A., LOGOFĂTU, P., Pascu, M. L., & Nicolae, I. (2021). MONITORING DROPLET EVAPORATION VIA REAL-TIME DIGITAL HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY USING A PHASE ONLY SPATIAL LIGHT MODULATOR. *Romanian Reports in Physics*, 73(4).
- [21] Logofătu, P. C., Garoi, F., Boni, M., & Pascu, M. L. (2020). THE STUDY OF THE PROPERTIES OF WATER DROPLETS USING A MACH-ZEHNDER INTERFEROMETER AND MIE RIGOROUS DIFFRACTION. *Romanian Reports in Physics*, 72, 403.