

UNIVERSITATEA BUCURESTI
FACULTATEA DE FIZICA

L U C R A R E D E D I P L O M A

CONTROL NEDESTRUCTIV HOLOGRAFIC. ELIMINAREA FRANJELOR
PARAZITE DIN INTERFEROGRAMELE HOLOGRAFICE PRINTR-O
METODA DE MOIRÉ GENERAT ELECTRONIC.

Conducători științifici:

Doctor inginer Vlad I.Valentin, I.F.T.A.R.

Doctor lector Bohățiel Teodor, Facultatea de Fizică.

Student: Axinte Vasile-Doru

*Tim să mulțumesc în mod deosebit
pentru amabilitatea și competențe cu care am
fost îndrumat de Dr. V.I. Vlad în efectuarea
lucrării, precum și pentru condițiile de lucru
din laboratoarele de holografie ale I.F.T.A.R.*

CAPITOLUL 1

1.1. Controlul nedestructiv holografic, comparație cu alte metode.

Cerințele actuale ale industriei precum și numeroase alte domenii de activitate presupun pentru instalații și diverse componente fiabilitate și siguranță în funcționare într-o gamă foarte largă de parametri de funcționare. De asemenea considerente de ordin economic impun realizări cu un consum minim de materiale și de cele mai multe ori din punct de vedere tehnic gabaritul și greutatea redusă sînt avantajoase.

Metodele de control nedestructiv s-au impus datorită posibilităților de testare a instalațiilor atât înainte cît și după punerea lor în funcțiune privind siguranță în funcționare, pe de o parte, și datorită informațiilor utile în proiectarea viitoarelor instalații la parametrii ceruți, pe de altă parte.

Metodele clasice de control nedestructiv, dintre care cele mai răspîndite sînt controlul cu radiații penetrante (X,gama) și controlul cu ultrasunete dau informații utile în cazul materialelor solide de dimensiuni mari și forme geometrice regulate și nu prea complicate.

Restricțiile privind gabaritul și greutatea au impus tehnologii de realizare a unor componente cu suprafețe foarte dure, rezistente și de formă arbitrară. Metodele cunoscute de control a suprafețelor (pulberi și lichide penetrante, cîmpuri magnetice, măsurători tensometrice) pun în evidență doar defectele grosolane, evaluările fiind în cel mai bun caz calitative și nerelevînd (chiar în cazul folosirii a două, trei metode diferite pentru un răspuns cît mai complet) toate informațiile necesare.

Apariția opticii coerente "o soluție în căutare de probleme" imediat după punerea la punct a laserilor și în special dezvoltarea interferometriei holografice oferă o nouă metodă de control nedistructiv.

Lungimea de undă mică a luminii ($4 \div 7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) și faptul că procedeele interferometrice permit să se detecteze variații de fracțiuni din această lungime de undă în mod uzual, iar în montaje mai sofisticate se ajunge la precizii de ordinul $10^{-11} \div 10^{-12} \text{ m}$ au făcut din interferometria optică una din cele mai precise metode de măsură, cu un câmp larg de aplicații. (Testarea componentelor optice, alinierea și măsurarea pieselor pe mașini unelte, verificarea etaloanelor de lungime, vizualizarea curgerii fluidelor, foto-elasticitatea, etc.).

Era de așteptat ca orice îmbunătățire fundamentală în tehnicile interferometrice prezente să-și găsească imediat numeroase și variate aplicații.

Interferometria holografică este o astfel de îmbunătățire fundamentală, introducând față de metodele clasice următoarele avantaje esențiale:

1) Permite măsurători pe suprafețele tridimensionale de forme și condiții de prelucrare arbitrare, fără componente optice cu parametri excepționali.

2) Permite examinarea microdeformațiilor complexe din mai multe perspective (o interferogramă holografică este echivalentă cu un număr mare de interferograme clasice formate în diferite puncte de observare).

3) Permite, static sau dinamic, înregistrarea și vizualizarea variațiilor unui obiect între două momente ale istoriei lui.

Legătura cu controlul nedistructiv s-a făcut imediat ce montajele de interferometrie holografică au fost puse la punct,

în felul următor: orice corp supus unui efort se deformează, suprafața sa modificându-se în funcție de mărime, direcția și tipul efortului aplicat, de natura, structura și forma corpului.

Orice defect al suprafeței, sau imediat sub suprafață se va manifesta ca o perturbare a formei suprafeței.

Sensibilitatea deosebită a metodei permite decelarea defectelor foarte mici în cazul unor solicitări moderate a pieselor de controlat.

Un alt avantaj deosebit este lipsa contactului cu aparatul de măsură (Influența luminii este total neglijabilă în funcționare), metoda de măsură pretîndu-se la măsurători de finețe mecanică deosebită (ex: vizualizarea vibrațiilor membranei unui difuzor sau vibrațiile cutiilor de rezonanță ale instrumentelor muzicale, etc.).

Cu avantajele esențiale enumerate, domeniile în care a pătruns interferometria holografică sînt numeroase și foarte variate, astfel că putem enumera doar cîteva pentru a forma o imagine despre aplicabilitatea foarte mare:

a) Punerea în evidență a deformațiilor elastice (interferometrie holografică cu dublă expunere I H D E).

b) Vizualizarea relaxării biologice la plante (IHDE)

c) Examinarea gradului de prelucrare a unei lame de sticlă în două etape ale procesului (IHDE).

d) Determinarea regimului termic al unor dispozitive electronice (IHDE).

e) Curenții de convecție din flacără, bec cu gaze, puși în evidență cu IHDE.

f) Urmărirea undei de șoc înregistrată prin IHDE.

g) Modurile de vibrație puse în evidență prin interferometrie holografică pentru generarea contuturilor la: membrane

de diverse forme, palete de turbină, cutii de rezonanță.

h) Obținerea liniilor de nivel cu interferometrie holografică cu doi indici de refracție.

i) Determinarea deformațiilor în articulații (genunchi, umăr, etc.) (IHDE).

Ca orice activitate nouă interferometria holografică are numeroase dificultăți privind manevrabilitatea, prețul de cost, interpretarea corectă a rezultatelor, dar avantajele enumerate mai sus o impun în activitatea practică drept metodă de lucru deosebit de utilă.

Sensibilitatea deosebită a măsurătorilor interferometrice produce și efecte nedorite, perturbatii minore (variații inerente ale instalațiilor, mici rotații sau translații, vibrații sau diverse ale modificări necontrolabile ale mediului de lucru) producând efecte comparabile cu efectele fenomenului măsurat.

Lucrarea de față propune o metodă de eliminare a manifestărilor efectelor perturbatoare în interferometria holografică printr-o tehnică de Moiré, fără a cere eliminarea fenomenelor perturbatoare (Cerință greu de îndeplinit fără un hardware optic foarte complex dublat de experimente îngrijite și greoaie).

Spre deosebire de tehnicile Moiré tradiționale, cu rețele desenate sau imprimate, relativ greu de realizat într-o gamă largă de frecvențe spațiale și de factor de umplere, se folosește o metodă de generare electronică pe monitorul unei camere TV a rețelelor necesare, metodă de o versatilitate remarcabilă.

CAPITOLUL 2

2.1. CONSIDERATII TEORETICE SI EXPERIMENTALE ASUPRA HOLOGRAFIEI

Înregistrarea și reconstrucția amplitudinii și fazei unei unde optice transmise sau reflectate de un obiect iluminat coerent sînt domeniile de lucru ale holografiei.

Amplitudinea unei optice se poate înregistra și reda folosind oricare din mediile de înregistrare redare uzuale: filme, plăci etc.

Aceste medii răspund numai la intensități (pătratul amplitudinii).

Faza unei optice se poate înregistra (reda) prin conversie în variații de intensitate (la redare variațiile de intensitate sînt convertite în variații de fază).

Practic conversia fază intensitate se soluționează prin interferometrie astfel: unda transmisă sau reflectată de obiect $O(x, y, z)$ (x, y, z) este suprapusă peste unda de referință $R(x, y, z)$ provenind de la aceeași sursă coerentă și fiind egalizată în fază și figura de interferență rezultată este înregistrată pe fotodetector.

După dezvoltare (cînd fotodetectorul este o placă fotografică) placa hologramă se comportă ca o rețea de difracție complicată, cu linii ondulate (modulație în frecvențe spațiale) și cu transparență variabilă (modulație în transmisie).

Iluminînd placa hologramă cu o referință identică cu cea de la înregistrare, unul din ordinele de difracție care apar ca reconstitui frontul unde $O(x, y, z)$.

Pentru analiza cantitativă a înregistrării și reconstrucției folosim următoarele notații:

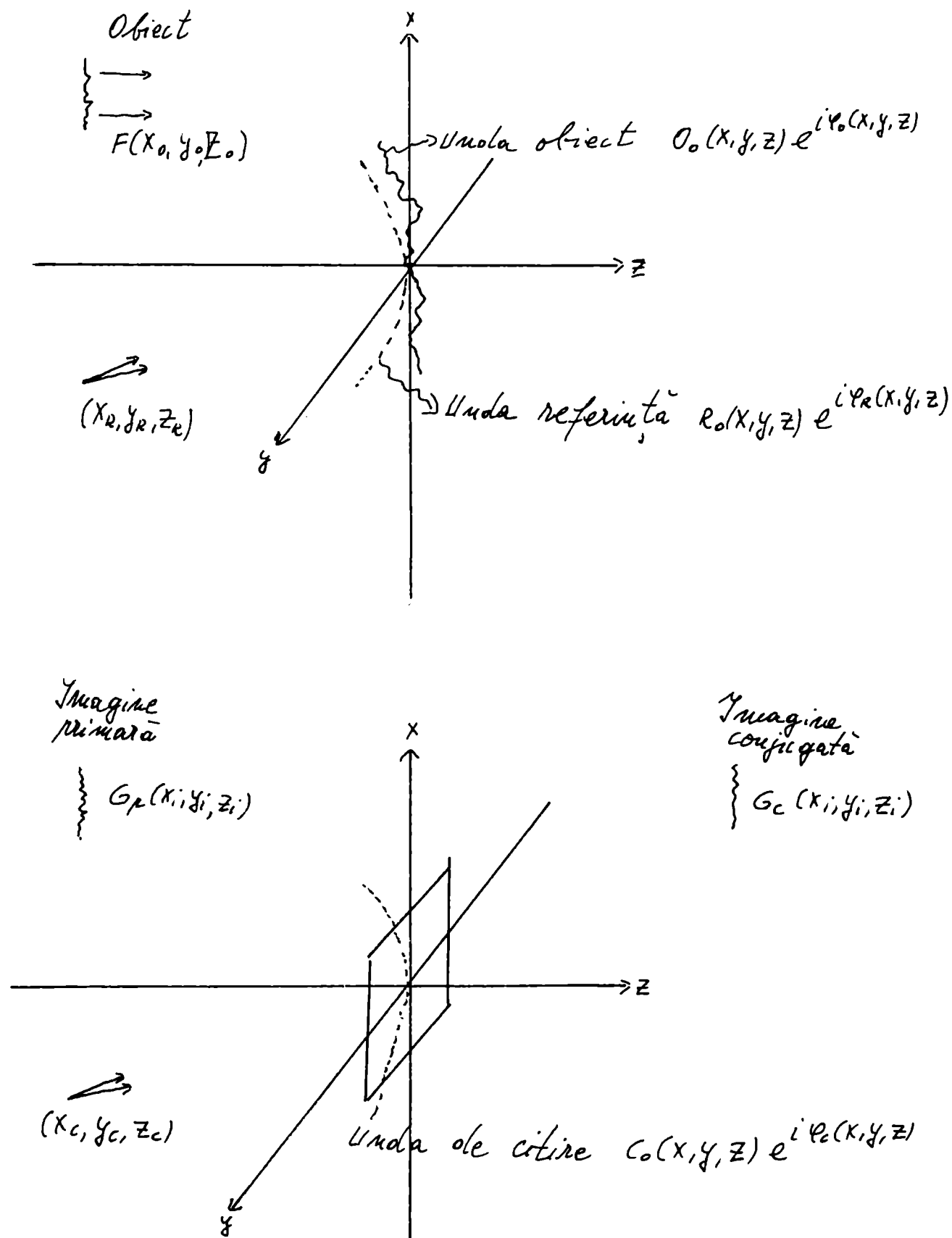
(X_o, Y_o, Z_o) - punct obiect curent

(X_r, Y_r, Z_r) - punct referință

(X_i, Y_i, Z_i) - punct imagine curent

- (X_c, Y_c, Z_c) - punct referință la citire
- $F(X_o, Y_o, Z_o)$ - distribuția de amplitudine luminoasă la obiect
- $O(X_i, Y, Z)$ - distribuție de amplitudine corespunzătoare a obiectului la hologramă.
- $R(X, Y, Z)$ - distribuția de amplitudine luminoasă corespunzătoare referinței de citire la hologramă.

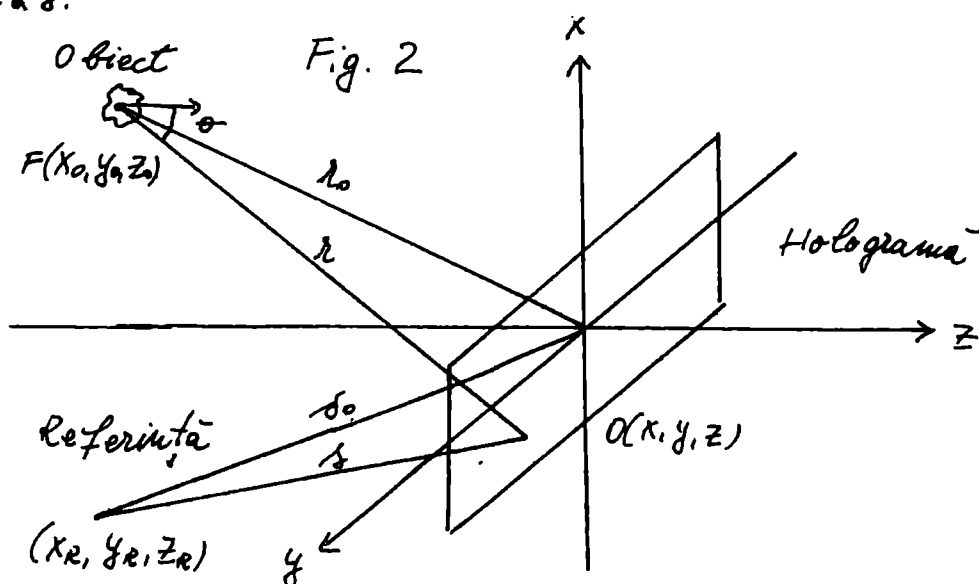
Fig. 1



2.1.1. Holograme plane

Pentru grosimi mici ale mediilor de înregistrare în comparație cu interfranjele figurii de interferență dintre undele $O(x,y,z)$ și $R(x,y,z)$ studiem cazul hologramelor plane.

În fig. 2 este reprezentată configurația de înregistrare Leith Upatnieks.



Conform principiului Huygens în planul hologramei vom avea distribuția de amplitudine luminoasă $O(x,y,z)$ provenită de la obiect

$$(1) \quad O(x,y,z) = \frac{-i}{2\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x_0, y_0) (1 + \cos \theta) \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{r} dx_0 dy_0$$

Forma bidimensională a relației (1) este:

$$(2) \quad O(x,z) = \left(\frac{-i}{4\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} F(x_0) (1 + \cos \theta) \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{r^{\frac{1}{2}}} dx_0$$

În planul hologramei $z = 0$:

$$(3) \quad r = [(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + z_0^2]^{\frac{1}{2}}$$

Pentru undă de referință $R(x,y,z) = \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{r}$

$$(4) \quad r = [(x_R - x)^2 + (y_R - y)^2 + z_R^2]^{\frac{1}{2}}$$

Considerînd $z_0^2 \gg x_0^2, y_0^2$ avem aproximația :

$$(5) \quad r \simeq z_0 + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_0} + \frac{x^2 + y^2}{2z_0} - \frac{xx_0}{z_0} - \frac{yy_0}{z_0} - \dots$$

Se folosesc în continuare:

$$(6) \quad O(x, y) = O_0(x, y) e^{i\varphi_0(x, y)} \quad \text{și} \quad R(x, y) = R_0(x, y) e^{i\varphi_R(x, y)}; \text{ cu } O_0, R_0 \in \mathbb{R}$$

Cîmpul total în planul hologramei :

$$(7) \quad H(x, y) = O(x, y) + R(x, y)$$

produce o expunere cu intensitatea

$$(8) \quad E(x, y) = |H(x, y)|^2$$

După dezvoltare holograma are o transmitanță în amplitudine:

$$(9) \quad t(x, y) = \sqrt{E(x, y)} \simeq t_0 + \beta E(x, y) + \dots$$

Termenul constant t_0 nu are importanță pentru analiza de mai jos.

Introducînd (8) în (9) avem:

$$(10) \quad t(x, y) \sim \beta |H(x, y)|^2 = \beta [O_0^2 + R_0^2 + O_0 R_0 e^{i(\varphi_0 - \varphi_R)} + O_0 R_0 e^{-i(\varphi_0 - \varphi_R)}]$$

Dacă iluminăm holograma cu o undă

$$(11) \quad C(x, y) = C_0(x, y) e^{i\varphi_c(x, y)}$$

ea produce următorul răspuns

$$(12) \quad \psi(x, y) = C(x, y) t(x, y) = \beta [C_0 O_0^2 e^{i\varphi_c} + C_0 R_0^2 e^{i\varphi_c} + \\ + C_0 O_0 R_0 e^{i(\varphi_c + \varphi_0 - \varphi_R)} + C_0 O_0 R_0 e^{i(\varphi_c - \varphi_0 + \varphi_R)}]$$

2.1.1.a Holograme Fresnel

Dacă în (5) nu putem neglija termenii pătratici în x_0 și y_0 vorbim despre holograme Fresnel.

Fie un obiect punctiform și sursa referinței de asemenea punctuală:

$$(13) \quad O_0(x, y) e^{i\varphi_0(x, y)} = B \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{r} \\ R_0(x, y) e^{i\varphi_R(x, y)} = A \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{r}$$

În fig 3 este reprezentat un montaj tipic pentru holografie Fresnel.

Presupunem A și B constante pe întreaga arie a hologramei și vom pune

$$(14) \quad r = [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z_0^2]^{\frac{1}{2}} \\ r_0 = [x_0^2 + y_0^2 + z_0^2]^{\frac{1}{2}} \\ r = [(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2 + z_R^2]^{\frac{1}{2}} \\ r_0 = [x_R^2 + y_R^2 + z_R^2]^{\frac{1}{2}}$$

În acest mod obținem

$$(15) \quad \varphi_0 = k(r - r_0) = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2]^{\frac{1}{2}} - [x_0^2 + y_0^2 + z_0^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \simeq \\ \simeq \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{1}{2z_0} (x^2 + y^2 - 2xx_0 - 2yy_0) + \dots \right]$$

și expresii analogice pentru $\varphi_R(x, y)$ și $\varphi_C(x, y)$

Termenul al treilea al ecuației de bază (12) va conține

$$(16) \quad \varphi_0 - \varphi_R + \varphi_C = \frac{\pi}{\lambda} \left[(x^2 + y^2) \left(\frac{1}{z_0} - \frac{1}{z_R} + \frac{1}{z_C} \right) - \right. \\ \left. - 2x \left(\frac{x_0}{z_0} - \frac{x_R}{z_R} + \frac{x_C}{z_C} \right) - 2y \left(\frac{y_0}{z_0} - \frac{y_R}{z_R} + \frac{y_C}{z_C} \right) \right]$$

Considerând această expresie ca reprezentând primul ordin al undei sferice reconstruite

$$(17) \quad \varphi_R^{(1)} = \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 + y^2 - 2xX_R - 2yY_R}{Z_R} \right)$$

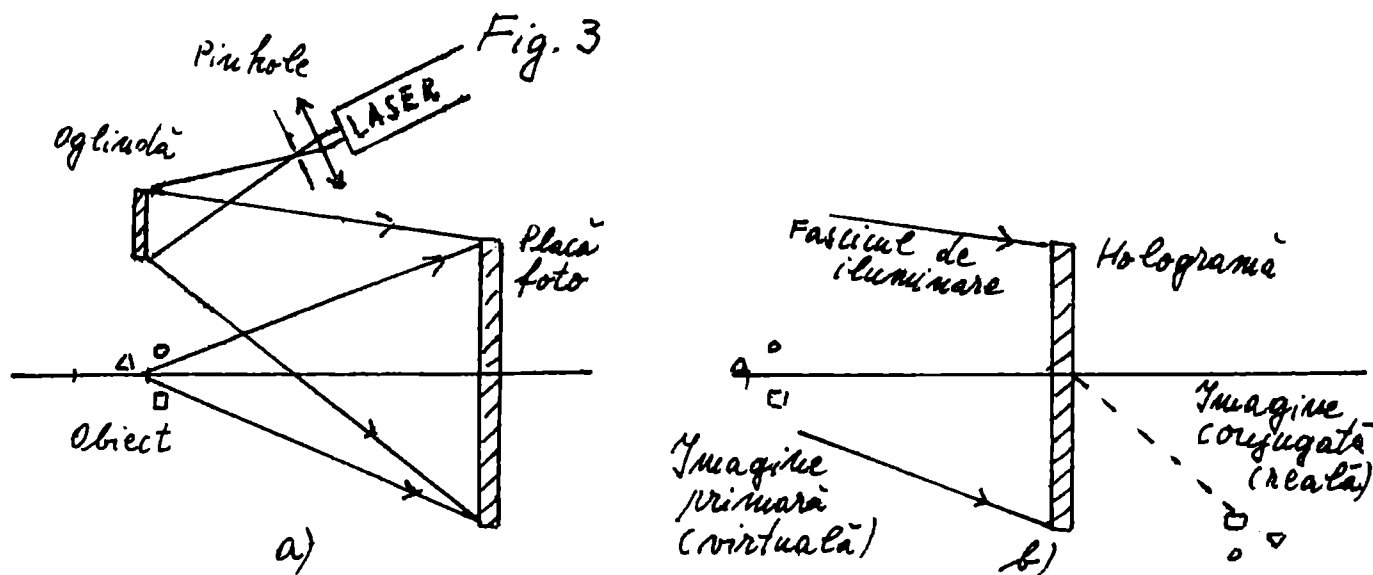
Cu Z_R raza și X_R, Y_R coordonatele centrului undei sferice și unda de citire identică cu unda de referință ($z_C = z_R$), obținem pentru imaginea primară:

$$(18) \quad Z_R = z_0; \quad X_R = x_0; \quad Y_R = y_0 \quad (\text{identitate cu unda obiect})$$

și pentru imaginea conjugată (termenul al patrulea din (12))

$$(19) \quad Z_C = -z_0; \quad X_C = \frac{2x_R z_0 - x_0 z_R}{2z_0 - z_R}; \quad Y_C = \frac{2y_R z_0 - y_0 z_R}{2z_0 - z_R}$$

În fig 3 este reprezentat un montaj tipic pentru holografie Fresnel.



Fasciculul laser este divizat și expandat pentru a forma undele obiect și referință. Apoi unda reflectată de obiect și unda referință sînt suprapuse pe placa fotografică, avînd grijă ca drumurile optice să fie egale (fig. 3a)

Holograma, obținută prin dezvoltarea plăcii, trebuie plasată în poziția ei originală.

Observatorul, ce privește prin hologramă, va vedea o imagine nedistorsionată a obiectului, ca și cum el ar fi prezent în locul unde a fost înregistrat. (fig. 3 b).

În afară de această imagine primară (virtuală) holograma va difracta înspre observator o imagine conjugată (reală) care apare neclară și puternic distorsionată (fig. 3b). Imaginea conjugată posedă o inversie de profunzime (paralaxă) și o focalizare inversă,

Adesea în holofrafie se folosește o undă de referință plană: $z_R \rightarrow \infty$, α_R unghiul între $\vec{k}$ și axa Z în planul Xz (fig. 4 a b).

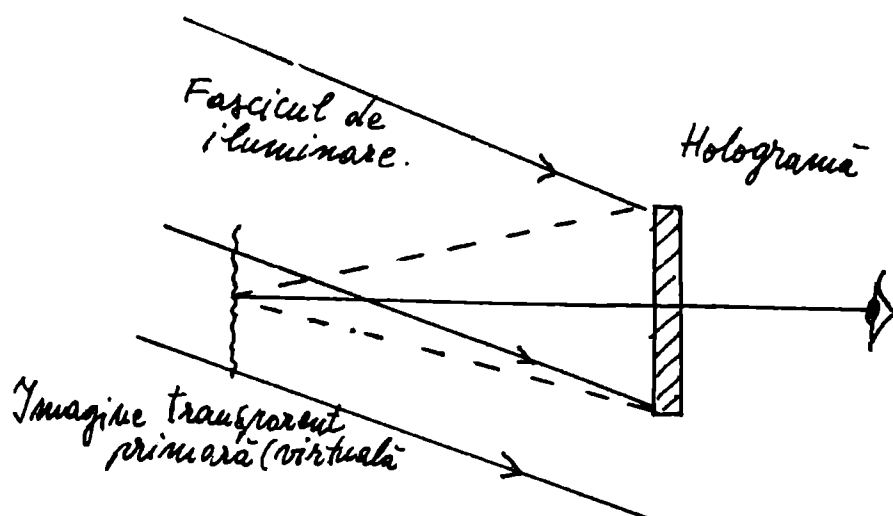
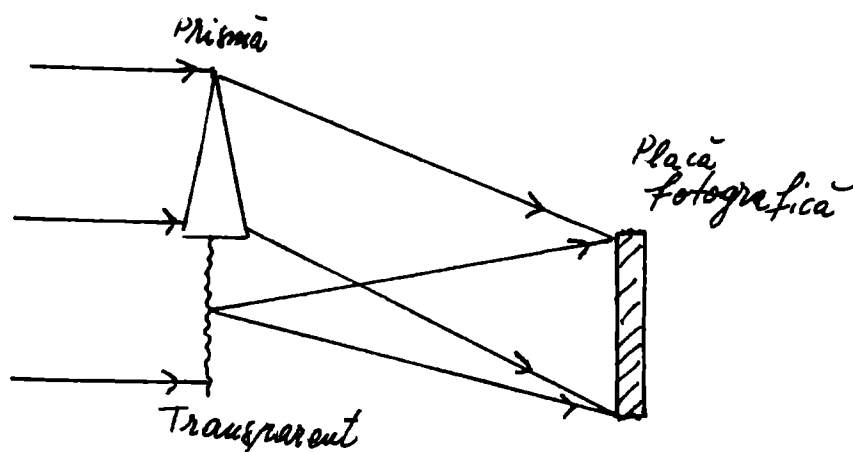
$$(20) \quad \varphi_R = \frac{2\pi}{\lambda} X \sin \alpha_R ; \quad \varphi_C = \frac{2\pi}{\lambda} X \sin \alpha_C$$

$$(21) \quad \varphi_0 - \varphi_R + \varphi_C = \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{X^2 + Y^2}{Z_0} - 2X \left(\frac{X_0}{Z_0} - \sin \alpha_R + \sin \alpha_C \right) - 2Y \frac{Y_0}{Z_0} \right]$$

$$(22) \quad Z_R = Z_0 ; \quad X_R = X_0 - Z_0 \sin \alpha_R + Z_0 \sin \alpha_C ; \quad Y_R = Y_0$$

$$(23) \quad Z_C = -Z_0 ; \quad X_C = X_0 + Z_0 \sin \alpha_R + Z_0 \sin \alpha_C ; \quad Y_C = Y_0$$

Fig. 4



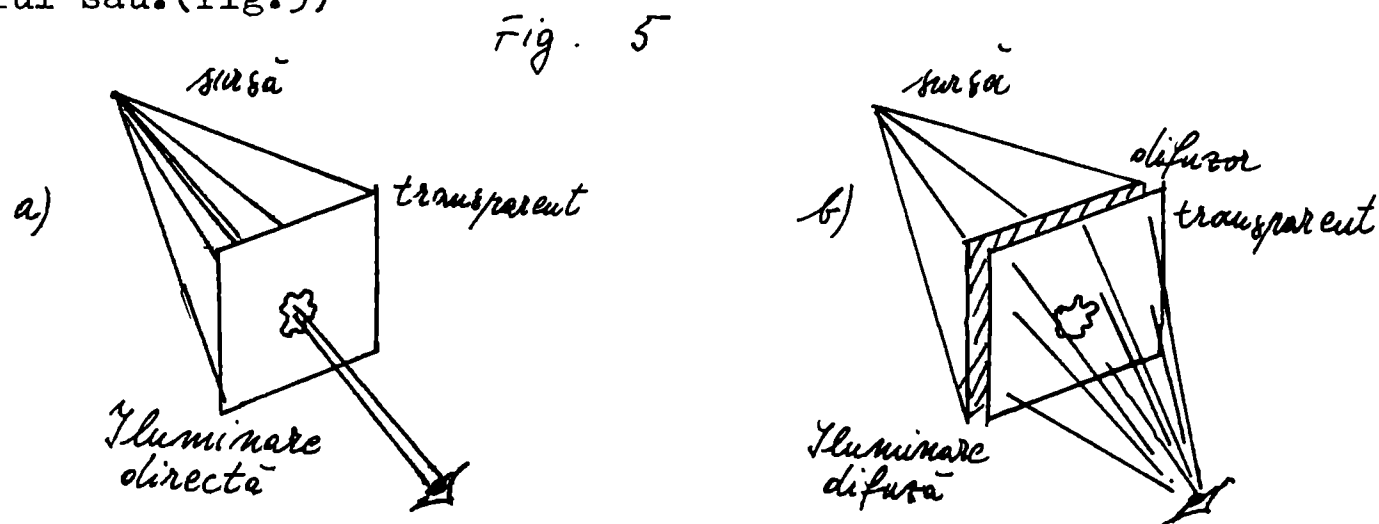
Hologramele pot fi construite și în lumină difuză (dar coerentă) ceea ce produce câteva avantaje importante:

1) Fiecare punct al obiectului radiază o undă sferică, informația ce vine de la el se găsește oriunde pe hologramă de unde o redundanță excepțională.

2) Reconstrucția se face fără elemente optice suplimentare.

În iluminare directă există o corespondență bimivocă între obiect și o porțiune a hologramei (~~shadow~~ ~~program~~) astfel că numai o mică parte a hologramei (dată de secțiunea intersectată de conul de raze care intră în ochi) este vizibilă.

În iluminare difuză observatorul vede întregul obiect dintr-o dată, toate razele de lumină din toate punctele hologramei intrând în ochiul său. (fig.5)



3) Murdăria sau defecțiunile componentelor optice, ca și neliniaritatea plăcii joacă un rol neînsemnat, deoarece lumina este uniform împrăștiată pe toată suprafața plăcii și în filtrajul adaptat de la citire aceste distorsiuni practic dispar.

4) Formarea imaginilor tridimensionale de mare efect deoarece placa este atinsă de raze de lumină reflectate de obiect dintr-o perspectivă largă.

5) Posibilitatea de codare a imaginilor simplă și de mare eficacitate.

2.1.1b. HOLOGRAME FRAUNHOFER - FOURIER

Dacă în (5) putem neglija termenii pătratici și superiori în x_0 și y_0 vorbim despre holograme Fraunhofer - Fourier, iar (5) devine

$$(24) \quad r \simeq z_0 + \frac{x^2 + y^2}{2z_0} - \frac{xx_0}{z_0} - \frac{yy_0}{z_0}$$

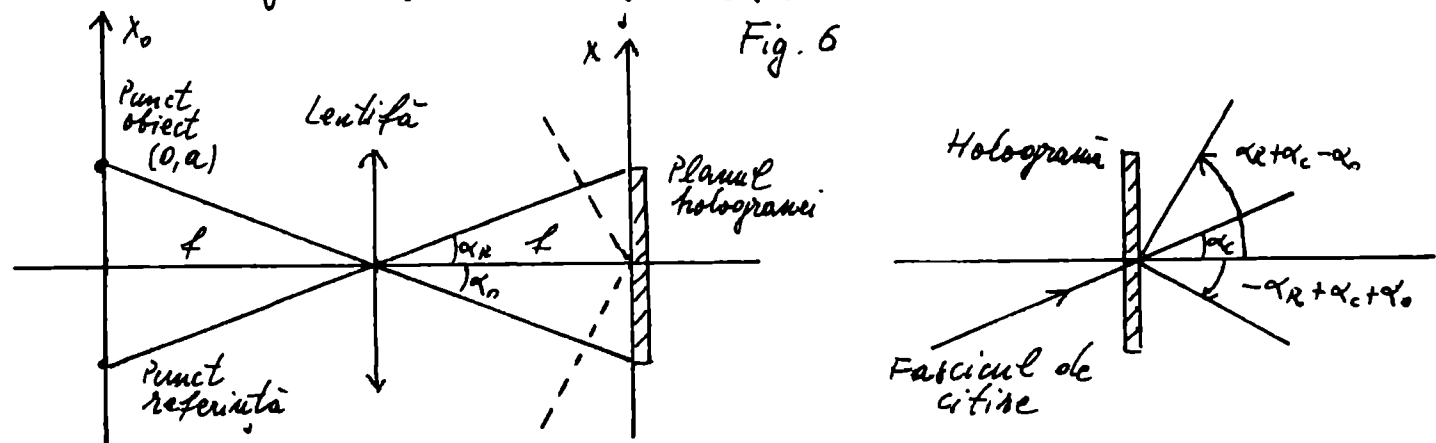
de asemenea (1) capătă forma

$$(25) \quad O(x, y) = \frac{-i}{2\lambda z_0} e^{ikz_0} e^{iK \frac{x^2 + y^2}{2z_0}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(x_0, y_0) e^{-\frac{ik}{z_0}(xx_0 + yy_0)} dx_0 dy_0$$

Distribuția de amplitudini din planul hologramei situată la o distanță mare de obiect este transformată Fourier (pînă la un factor lent variabil cu $\frac{x^2 + y^2}{2z_0}$ a distribuției din planul obiectului.

Dacă obiectul este un punct la $x_0 = a$ (fig. 6) atunci

$$(26) \quad F(x_0, y_0) = \delta(x_0 - a) \quad \text{și} \quad O(x) \sim e^{-i \frac{K}{f} ax}$$



reprezintă o undă plană ce cade pe placa fotografică sub unghiul $\alpha_0 = \arcsin \frac{a}{f}$

Pentru referință tot undă plană incidentă la α_R diferența de fază va fi:

$$(27) \quad \Delta(x) = \varphi_R(x) - \varphi_0(x) = Kx(\sin \alpha_R - \sin \alpha_0)$$

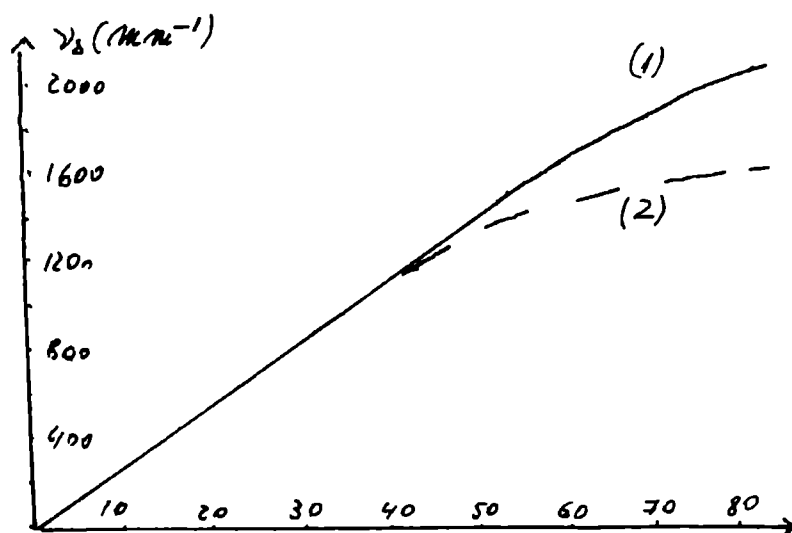
Franje luminoase sînt la $\Delta = 2m\pi$, $m \in \mathbb{Z}$ de unde

$$(28) \quad x = \frac{m \frac{2\pi}{K}}{\sin \alpha_R - \sin \alpha_0}$$

Deci un obiect punctiform produce un set de franje drepte echidistante la:

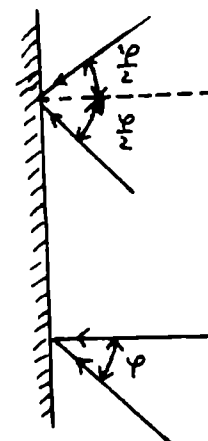
$$(29) \quad \Delta x_f = \frac{\lambda}{\sin \alpha_R - \sin \alpha_0} = \frac{1}{\nu_s}$$

cu: $\nu_s \equiv$ frecvența spațială



$$(1) \nu_s = \frac{2 \sin \frac{\varphi}{2}}{\lambda}$$

$$(2) \nu_s = \frac{\sin \varphi}{\lambda}$$



Pentru mai multe puncte, holograma e formată din mai multe rețele sinusoidale suprapuse coerent

Cîmpul total la hologramă, într-o singură dimensiune:

$$(30) H(x) = O_o(x) e^{i\varphi_o(x)} + R_o(x) e^{i\varphi_r(x)} = O_o(x) e^{-iKX \sin \alpha_o} + R_o(x) e^{-iKX \sin \alpha_r}$$

$$(31) I(x) = |H(x)|^2 = O_o^2 + R_o^2 + O_o R_o e^{-iKX(\sin \alpha_o - \sin \alpha_r)} + O_o R_o e^{-iKX(\sin \alpha_r - \sin \alpha_o)}$$

Dacă iluminăm holograma cu o undă plană

$$(32) C(x) = C_o(x) e^{i\varphi_c(x)} = C_o(x) e^{-iKX \sin \alpha_c}$$

atunci unda transmisă are forma

$$(33) \Psi(x) = \beta \{ C_o O_o^2 e^{-iKX \sin \alpha_c} + C_o R_o^2 e^{-iKX \sin \alpha_c} + C_o O_o R_o e^{-iKX(\sin \alpha_o - \sin \alpha_r + \sin \alpha_c)} + C_o O_o R_o e^{-iKX(-\sin \alpha_o + \sin \alpha_r + \sin \alpha_c)} \}$$

Dacă $\alpha_r = \alpha_c$ al treilea termen al (33) reprezintă unda obiect reconstituită.

Fig 8 și fig. 9 reprezintă montaja practice de realizare a hologramelor Fraunhofer - Fourier.

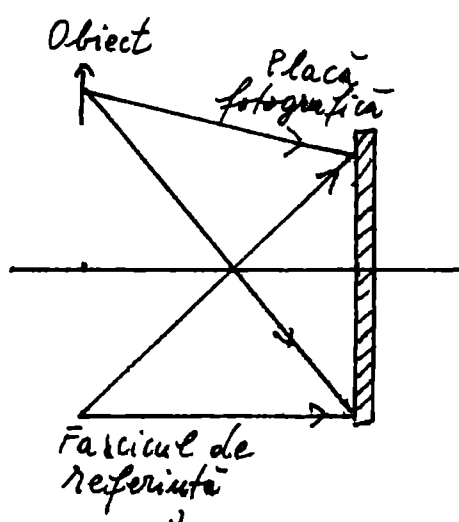
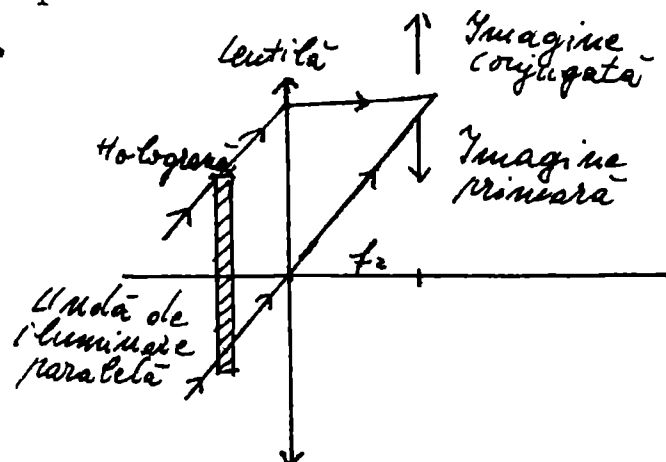
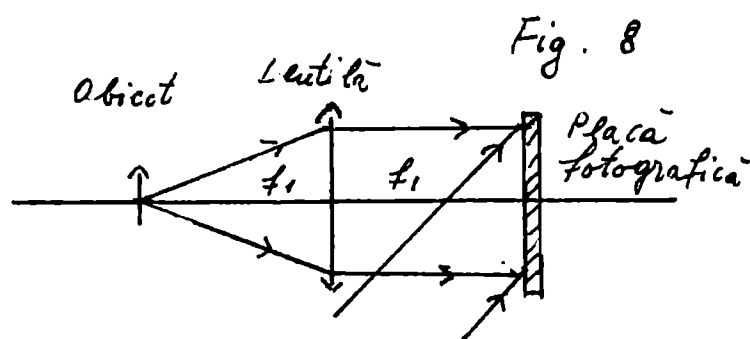
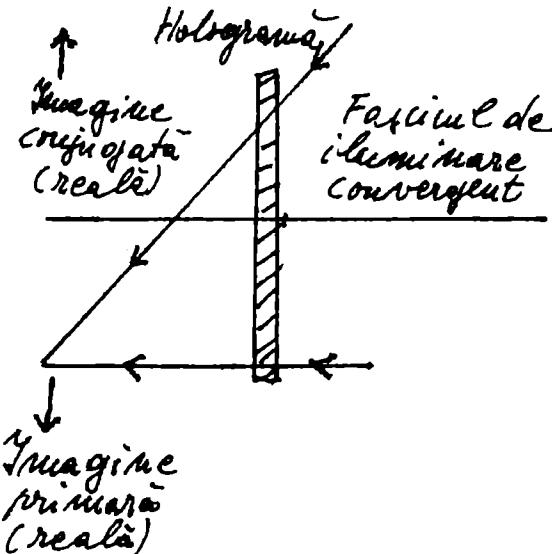
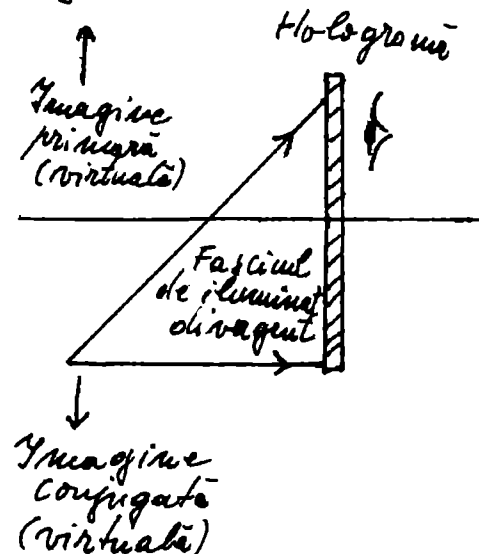


Fig. 9



Pentru montajul sugerat în fig 8 imaginile primară și conjugată se formează în planul focal al lentilei f_2 mărite în raportul $\frac{f_2}{f_1}$

Pentru montajul sugerat în fig 9 trebuie luate următoarele precauții: obiectul și sursa punctiformă de referință să fie în același plan și distanța între planul obiect și planul plăcii foto să fie suficient de mare în raport cu dimensiunile obiectului.

2.1.2 HOLOGRAME IN VOLUM

Pentru grosimi ale mediilor de înregistrare de același ordin de mărime sau mai mari decât interfranjele figurii de interferență dintre undele $O(x,y,z)$ și $R(x,y,z)$ studiem cazul hologramelor în volum.

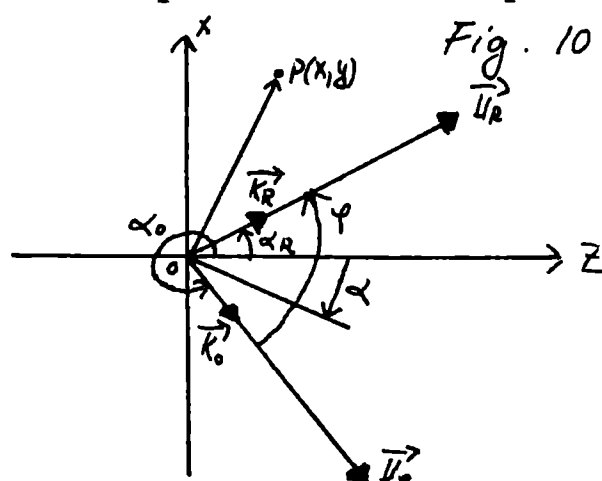
$$(34) \quad \Delta \geq d \sim \frac{\lambda}{\sin \varphi}$$

$d \equiv \text{interfranja}$
 $\lambda \equiv \text{lungimea de undă}$
 $\varphi \equiv \text{unghiul între undele } O \text{ și } R$

Relația (34) este satisfăcută aproape în toate cazurile practice de lucru cu emulsii fotografice (groase de ordinul a $20 \mu m$ în general)

Hologramele în volum conțin franje în grosimea materialului fotosensibil cu direcție și spațiere dependentă de localizarea și separarea unghiulară a punctelor obiect și referință.

Pentru simplitate considerăm interferența a două unde plane (orice undă poate fi descompusă într-o serie de unde plane).



$$\begin{aligned}
 k' &= \frac{2\pi}{\lambda'} \\
 \lambda' &\equiv \text{lungimea de undă în material} \\
 \vec{k}'_O &= \vec{k}_O \cdot k' \\
 \vec{k}'_R &= \vec{k}_R \cdot k'
 \end{aligned} \quad (35)$$

Notînd cu $\vec{r}$ vectorul de poziție al unui punct $P(x,z)$ din mediul de înregistrare, cele două unde vor fi:

$$\begin{aligned}
 (36) \quad U_O &= a_O e^{i \vec{k}'_O \cdot \vec{r}} = a_O e^{i \varphi_O(x,z)} \\
 U_R &= a_R e^{i \vec{k}'_R \cdot \vec{r}} = a_R e^{i \varphi_R(x,z)}
 \end{aligned}$$

cu :

$$\begin{aligned}
 (37) \quad \varphi_O(x,z) &= \vec{k}'_O \cdot \vec{r} = k' z \cos \alpha_0 + k' x \sin \alpha_0 \\
 \varphi_R(x,z) &= \vec{k}'_R \cdot \vec{r} = k' z \cos \alpha_R + k' x \sin \alpha_R
 \end{aligned}$$

Defazajul între cele două unde este:

$$(38) \Delta(x, z) = \varphi_R(x, z) - \varphi_0(x, z) = k'z(\cos\alpha_R - \cos\alpha_0) + k'x(\sin\alpha_R - \sin\alpha_0)$$

Franjele luminoase se vor forma acolo unde:

$$\Delta(x, z) = 2m\pi, \quad m \in \mathbb{Z}$$

Din (37), (38), generalizînd și pe y , observăm că franjele luminoase vor fi plane echidistante ale căror urme pe $X-Z$ sînt drepte:

$$(39) \quad x = \left(- \frac{\cos\alpha_R - \cos\alpha_0}{\sin\alpha_R - \sin\alpha_0} \right) z + \frac{m\lambda'}{\sin\alpha_R - \sin\alpha_0}$$

Interfranja în direcția X este:

$$(40) \quad \Delta x = \frac{\lambda'}{\sin\alpha_R - \sin\alpha_0}$$

și frecvența spațială corespunzătoare

$$(41) \quad \nu_s = \frac{1}{\Delta x} = \frac{\sin\alpha_R - \sin\alpha_0}{\lambda'} = \frac{2}{\lambda'} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \alpha$$

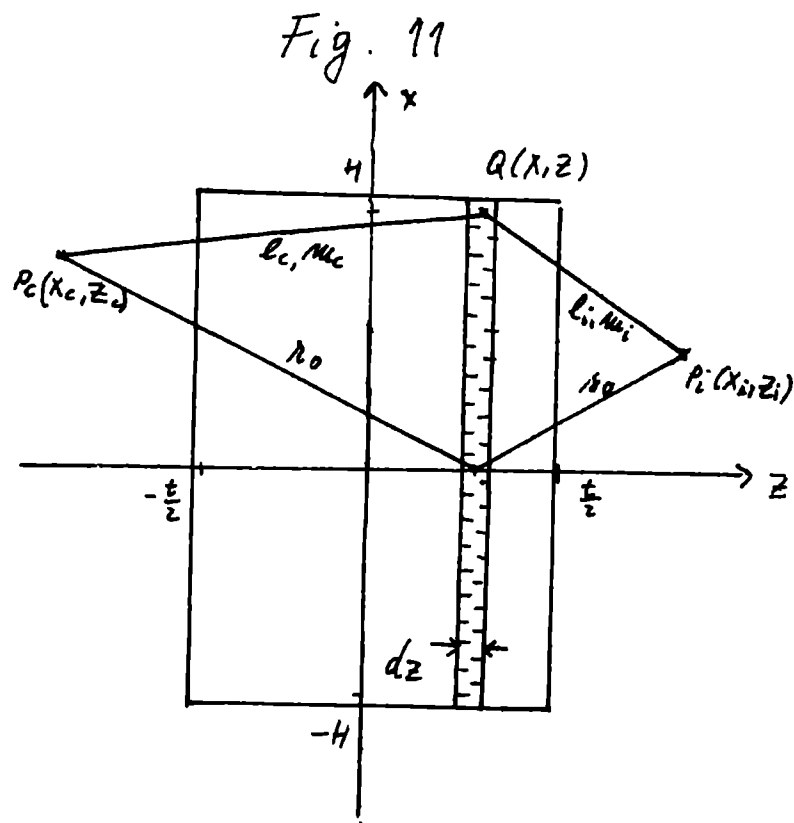
unde am notat:

$$(42) \quad \varphi = 2\pi - \alpha_0 + \alpha_R \quad \text{și} \quad \alpha = \alpha_R - \frac{\varphi}{2} = \arctg \left(- \frac{\cos\alpha_R - \cos\alpha_0}{\sin\alpha_R - \sin\alpha_0} \right)$$

α este unghiul pe care îl fac franjele cu axz .

Reconstrucția în holografia în volum este rezultatul difracției unei de iluminare pe rețeaua tridimensională formată de franjele tridimensionale.

Analiza se face cu ajutorul unei aproximații a integralei Fresnel - Kirchhoff pentru difracție slabă (sumarea contribuțiilor difracțiilor Fraunhofer pe o succesiune de aperturi infinit de subțiri



Cîmpul produs de sursa de iluminare $P_c(x_c, z_c)$ în punctul imagine $P_i(x_i, z_i)$ este (fig. 11)

$$(43) \quad U(l_i, m_i) \sim \int_{-H-\frac{t}{2}}^{H+\frac{t}{2}} \int G(x, z) e^{-ikx(m_i - m_c)} e^{-ikz(l_i - l_c)} dx dz$$

cu notațiile

$$(44) \quad l_i = \frac{z_i}{f_o}; \quad l_c = -\frac{z_c}{f_o}; \quad m_i = \frac{x_i}{f_o}; \quad m_c = -\frac{x_c}{f_o}$$

$G(x, z)$ este funcția pupilară, care ține seama de variația spațială a transmitanței în apertură.

În cazul nostru funcția pupilară va fi proporțională cu distribuția de intensitate din figura de interferență produsă de undele U_o și U_R (36) adică:

$$(45) \quad G(x, z) \sim |H(x, z)|^2 = |U_o + U_R|^2 = a_o^2 + a_R^2 + 2a_o a_R \cos[\phi(x, z)] = \\ = a_o^2 + a_R^2 + 2a_o a_R \cos[\omega_o(lx - mz)] = E_o[1 + M \cos \omega_o(lx - mz)] \\ = E_o \left\{ 1 + \frac{M}{2} e^{i\omega_o(lx - mz)} + \frac{M}{2} e^{-i\omega_o(lx - mz)} \right\}$$

cu notațiile (fig. 10) :

$$(46) \quad l = \cos \alpha; \quad m = \sin \alpha; \quad \omega_o = 2k' \sin \frac{\varphi}{2} \\ E_o = a_o^2 + a_R^2 \equiv \text{exponere medie} \\ M = \frac{2a_o a_R}{a_o^2 + a_R^2} \equiv \text{modulația expunerii}$$

Introducînd (45) în (43) vom obține după integrare:

$$(47) \quad U(l_i, m_i) \sim E_o \left\{ \left[t \operatorname{sinc} \frac{t}{2}(kl_i - kl_c) \right] \left[2H \operatorname{sinc} H(km_i - km_c) \right] \right\} + \\ + \frac{ME_o}{2} \left\{ \left[t \operatorname{sinc} \frac{t}{2}(kl_i - kl_c + \omega_o m) \right] \left[2H \operatorname{sinc} H(km_i - km_c - \omega_o l) \right] \right\} + \\ + \frac{ME_o}{2} \left\{ \left[t \operatorname{sinc} \frac{t}{2}(kl_i - kl_c - \omega_o m) \right] \left[2H \operatorname{sinc} H(km_i - km_c + \omega_o l) \right] \right\}$$

cu $\operatorname{sinc} x \equiv \frac{\sin x}{x}$

Condițiile de maxim pentru primele două ordine nu se obțin simultan și ele sînt date de

$$(48) \quad -\frac{l_i - l_c}{m} = \frac{\omega_o}{k} = \frac{m_i - m_c}{l}$$

și

$$(49) \quad \frac{l_i - l_c}{m} = \frac{\omega_o}{k} = -\frac{m_i - m_c}{l}$$

Explicând l_i și l_c (48) devine echivalentă cu legea reflexiei și explicând m_i și m_c (49) devine echivalentă cu legea rețelei, deci satisfacerea simultană a relațiilor (48) și (49) formează condiția Bragg pentru difracția pe o rețea tridimensională.

Pentru a realiza unde sînt localizate imaginile la citirea hologramelor în volum reluăm (41) sub forma:

$$(50) \quad m_R - m_o = 2l \sin \frac{\varphi}{2}$$

Analog obținem:

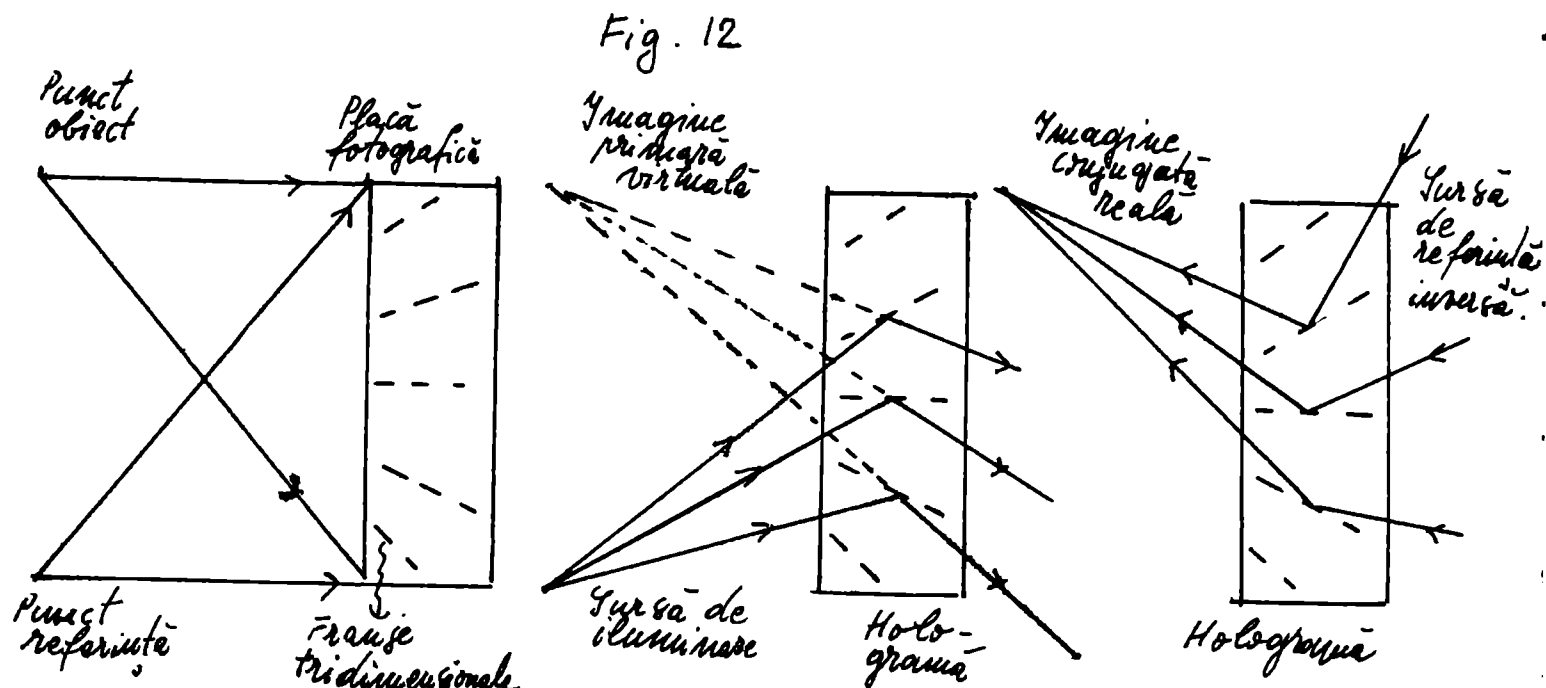
$$(51) \quad l_R - l_o = -2m \sin \frac{\varphi}{2}$$

Utilizînd (50) și (51) aducem (48) la :

$$(52) \quad \frac{l_i - l_c}{l_R - l_o} = \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{m_i - m_c}{m_R - m_o}$$

și prin aceeași metodă (49) devine:

$$(53) \quad \frac{l_i - l_c}{l_R - l_o} = -\frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{m_i - m_c}{m_R - m_o}$$



Dacă lungimile de undă la înregistrare și citire sînt egale ($\lambda = \lambda'$) observăm că:

a) (52) + ($l_c = -l_R$) $\Rightarrow l_i = -l_o$, imagine conjugată (fig. 12c)

b) (53) + ($l_c = l_R$) $\Rightarrow l_i = l_o$, imagine primară (fig. 12b)

Generalizînd la un front de undă oarecare observăm că termenul al doilea din (47) corespunde unei imagini conjugate (reale) pentru o iluminare la citire inversă față de iluminarea la referință iar termenul al treilea din (47) corespunde unei imagini primare (virtuale) situată în locul obiectului original, pentru o iluminare la citire identică cu iluminarea referinței.

O caracteristică importantă a hologramelor este eficiență la difracție ca raportul între intensitatea difractată care contribuie la reconstituirea frontului de undă original și intensitatea fascicului de citire incident pe hologramă:

$$(54) \quad \eta = \frac{|I|^2}{|C|^2}$$

Cu I amplitudinea undei difracte și C amplitudinea undei de citire incidente.

În tabelul următor sînt date teoretice și experimentale despre diverse tipuri de holograme, inclusiv despre cele tratate anterior, privind eficiența la difracție:

Material fotoseusibil	Subtire (bidimensional)		Gros (tridimensional)			
	Transmisie sau reflexie		Transmisie		Reflexie	
Lumina difractată apare prin:	Transmitanță		Constante de absorție		Constante de absorție	
Reteaua formată prin variația:	Faze		Indicele de refracție		Indicele de refracție	
Eficiența teoretică maksimă (%)	6,25	33,9	3,7	100	7,2	100
Eficiența observată experimental (%)	5	27	3,0	60	3,8	100

De remarcat că eficiențele maxime date mai sus se obțin acceptînd distorsiuni neliniare mari în imaginile reconstituite holografic.

Pentru domeniul liniar de reconstituire eficiențele posibile sînt în general limitate la jumătate din valoarea eficiențelor maxime.

2.2. INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA

După cum am menționat în capitolul 1, interferometria optică metodă de măsură de la foarte precisă, a fost fundamental îmbunătățită de apariția surselor de lumină coerentă dezvoltându-se din ea interferometria holografică cu avantajele esențiale enumerate.

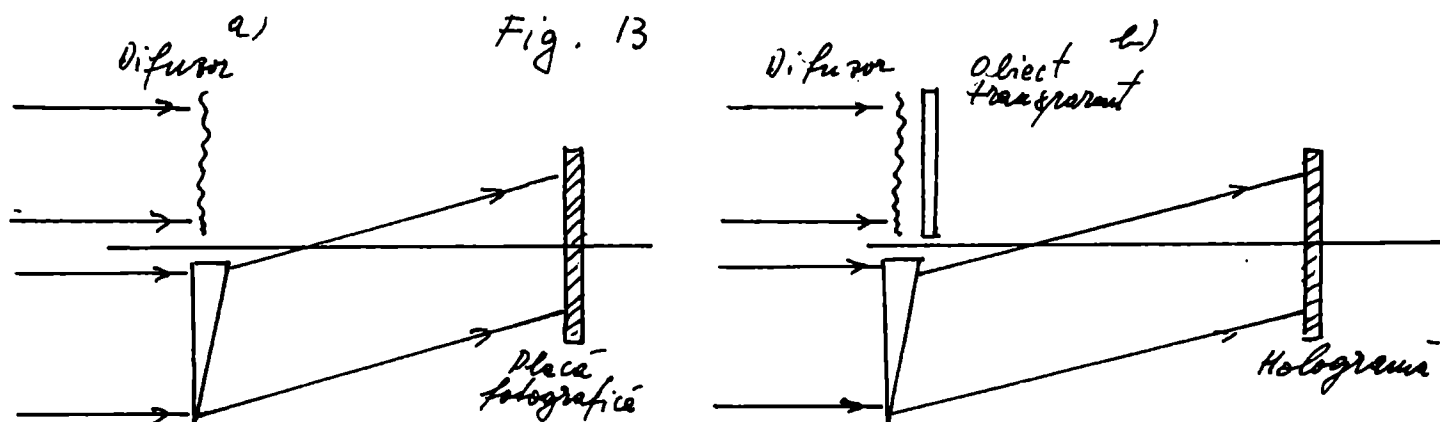
Există mai multe metode de obținere a interferogramelor holografice, teoriile propuse pentru localizarea și interpretarea franjelor nesatisfăcând decât unele cazuri particulare impunând din păcate prezentarea explicațiilor simple, calitative.

2.2.1. INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA IN TIMP REAL

Această metodă constă în înregistrarea hologramei unui obiect considerat etalon. După dezvoltare, holograma etalonului se re poziționează foarte exact, astfel încât imaginea obținută la reconstrucție să se suprapună exact peste unda obiect (iluminat și el de laser), care evoluează acum în timp într-un mod oarecare sau tinzând spre identitate cu etalonul. Suprapunerea celor două unde va produce un câmp de interferență macroscopică, care va evolua odată cu deformațiile undei obiect față de imaginea etalon și care va indica în timp real mărimea și localizarea acestor deformații.

Presupunem că formăm holograma obiectului etalon $O(X)$ cu unda de intensitate:

$$(55) \quad |H(X)|^2 = O_o^2(X) + R_o^2(X) + O_o(X)R_o(X) \left[e^{i(\varphi(X) - kX \sin \gamma_R)} + e^{-i(\varphi(X) - kX \sin \gamma_R)} \right]$$



După dezvoltare, iluminând această hologramă cu unda (fig. 13)

$$(56) \quad C(X) = O'(X) + R(X)$$

Cu $O'(X)$ frontul de undă puțin ^{de} format,

$$(57) \quad O'(X) = O_o(X) e^{i\varphi_o'(X)}$$

Unda transmisă de hologramă va fi

$$(58) \quad \varphi(X) = C(X) |H(X)|^2 = O_o(X) e^{i\varphi_o'(X)} \{ [O_o^2 + R_o^2] e^{i\varphi} + R_o^2 \} + \text{alți termeni} = \varphi_1(X) + \text{alți termeni.}$$

Intensitatea pe care o vede ochiul va fi:

$$(59) \quad |\Psi(x)|^2 = O_0^2 \{ [O_0^2 + R_0^2]^2 + R_0^4 + 2 R_0^2 [O_0^2 + R_0^2] \cos(\varphi'_0 - \varphi_0) \}$$

și se sesizează într-o serie de fraje suprapuse peste obiectul nedeformat.

Franjele vor fi localizate pentru a satisface relația

$$(60) \quad \varphi'_0(x) - \varphi(x) = \text{constant}$$

Fig. 13 ilustrează metoda printr-un experiment de determinare a neomogenităților optice, marginile și variațiilor de grosime ale ~~unui~~ unei lame de sticlă.

Alte aplicații ale interferometriei holografice în timp real vizează microdeplasările, regimurile termice ale dispozitivelor electronice, diagnosticarea plasmelor, etc.

2.2.2. INTERFEROMETRIA HOLOGRAFICA MEDIATĂ ÎN TIMP

Metodă de înregistrare a evoluției unui front de undă chiar în timpul acestei evoluții.

Inregistrarea holografică fiind în principiu un experiment de interferență a două unde, o variație cu T în diferența de fază a celor două unde va deplasa poziția franjelor în planul de înregistrare cu jumătate de interfranjă, avînd ca efect o stergere a franjelor în zona respectivă, dacă variația are loc în timpul expunerii.

Pentru a trata problema mișcării obiectului în timpul expunerii, vom scrie expunerea în punctul x al plăcii foto ca

$$(61) \quad E(x) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |H(x,t)|^2 dt$$

cu $|H|^2$ intensitatea totală în planul hologramei și T timpul de expunere.

Cum

$$(62) \quad H(x,t) = R(x) + O(x,t)$$

(61) devine:

$$(63) \quad E(x) = E_R + E_O + R(x) \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} O^*(x,t) dt + R^*(x) \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} O(x,t) dt$$

al plăcii foto ca

$$(61) \quad E(x) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |H(x,t)|^2 dt$$

cu $|H|^2$ intensitatea totală în planul hologramei și T timpul de expunere.

Cum

$$(62) \quad H(x,t) = R(x) + O(x,t)$$

(61) devine:

$$(63) \quad E(x) = E_R + E_S + R(x) \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} O^*(x,t) dt + R^*(x) \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} O(x,t) dt$$

Ultimul termen din (63) produce imaginea primară E_p

$$(64) \quad E_p = R^*(x) \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} O(x,t) dt = R^*(x) \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) O(x,t) dt$$

Considerînd perechile de transformate Fourier temporale

$$(65) \quad \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1 & \text{pt. } t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right] \\ 0 & \text{pt. } t \notin \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right] \end{cases} \xleftrightarrow{\mathcal{F}} T \text{sinc}(\pi T f)$$

și

$$(66) \quad O(x,t) \xleftrightarrow{\mathcal{F}} \tilde{O}(x,f)$$

și utilizînd teorema Parseval vom scrie (64) ca:

$$(67) \quad E_p = T R^*(x) \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi f T) \tilde{O}(x,f) df$$

(67) poate fi interpretată astfel : efectul mișcării obiectului în înregistrarea holografică este echivalent cu un filtraj temporal liniar al imaginii avînd funcția de transfer sinc $(\pi T f)$

Considerînd transmitanța în amplitudine a hologramei liniară cu expunerea și unda de citire identică cu referința, câmpul luminos

././.

în primul ordin va avea distribuția :

$$(68) \quad \psi_r(x) \sim |E(x)|^2 \int_{-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi f T) \tilde{O}(x, f) df$$

și observatorul va vedea

$$(69) \quad I_r(x) = |\psi_r(x)|^2$$

Pentru cazul vibrațiilor sinusoidale

$$(70) \quad I_r \sim \left| J_0 \left[\frac{2\pi}{\lambda} d (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] \right|^2$$

cu d amplitudinea vibrației unui punct oarecare al obiectului, θ_1 unghiul între direcția mișcării punctului și direcția de observare, θ_2 unghiul între direcția mișcării și direcția de iluminare a obiectului.

În imaginea primară va apărea un sistem de franje ce va caracteriza regiunile de egală amplitudine.

Dacă în imagine este prezentă o regiune nodală (interferență staționară) amplitudinea de vibrație într-un punct al suprafeței obiectului se poate deduce pe baza unei relații aproximative deduse din (70)

$$(71) \quad d_n \simeq \frac{n \lambda}{4 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}$$

unde n este numărul de ordine al maximului sau minimului de intensitate în figură pornind de la cea mai apreciată linie nodală, d_n este amplitudinea de vibrație pe franjă corespunzătoare.

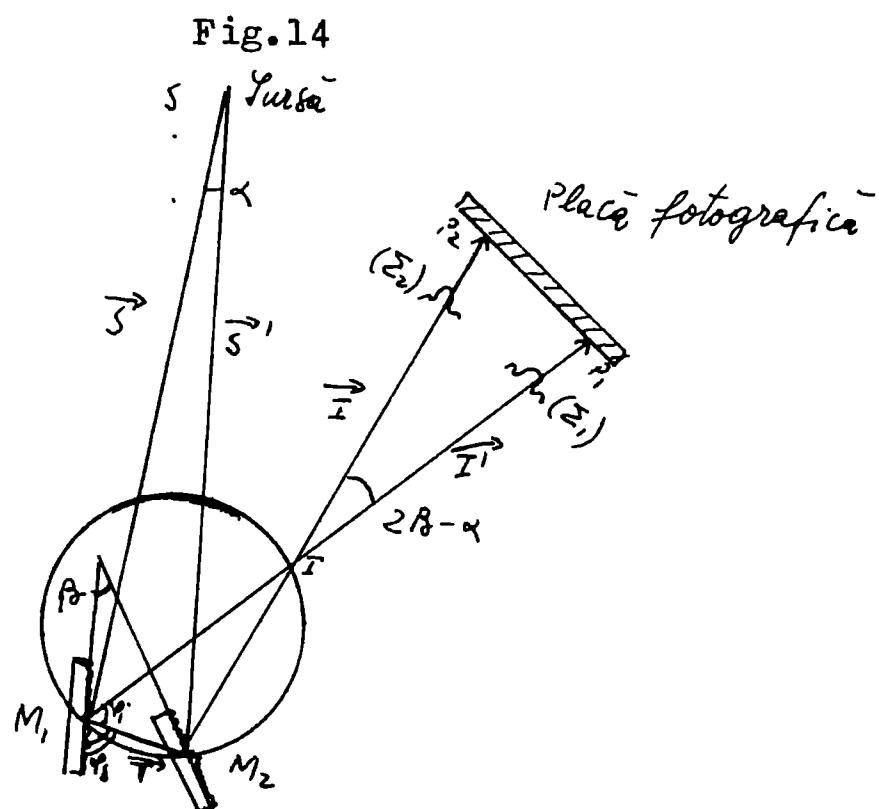
În continuare, dintre numeroasele alte metode de interferometrie optică folosite vom prezenta doar una, folosită în cadrul lucrării de față.

2.2.3. Interferometria holografică cu dublă expunere

Acest tip de interferometrie holografică este o înregistrare permanentă a variațiilor unui obiect între două expuneri pe aceeași placă fotografică, este deci necesară înregistrarea a două holograme pe aceeași placă fotografică.

La reconstrucție una din aceste holograme produce o imagine primară, constituind unda de comparație, iar cea de-a doua hologramă suprapune peste ea o imagine a obiectului deformat. Între cele două fronturi de undă apare un fenomen de interferență macroscopică ce pune în evidență diferențele de drum optic apărute între expuneri.

Obținerea relațiilor generale între perturbația suferită de obiect și mărimile caracteristice câmpului de macrofante este prezentată după Viénot în continuare.



Dacă în fig.14 considerăm că fronturile de undă (Σ_2) și (Σ_1) provin de la un obiect a cărui mișcare între cele două expuneri este caracterizată de o translație $\vec{T} = \overline{M_1 M_2}$ și o rotație de unghi β , atunci cu ipotezele:

a) frontul de undă coerent incident pe o suprafață, după difuzie și difracție pe suprafață, se transformă într-un nou front de undă în relație bijectivă cu suprafața, purtând deci structura fină a acesteia.

b) Interferența celor două frânturi de undă în IHDE la reconstrucție, ce produce sistemul de macrofanje, este dată de raze omologe, (fig.14 M_1P_1 și M_2P_2) și este observabilă acolo unde structurile lor fine se confundă.

Avem:

$$(72) \quad \vec{T} = \vec{I} - \vec{I}' = \vec{S}' - \vec{S}$$

Notînd $s = |\vec{S}|$, $s' = |\vec{S}'|$, $i = |\vec{I}|$, $i' = |\vec{I}'|$, diferența de drum va fi:

$$(73) \quad \Delta = s + i - (s' + i')$$

În cazul simplu al unei rotații pure de unghi β , razele omologe se vor intersecta pe suprafața de studiu, franjele fiind localizate pe ea.

Din considerente geometrice :

$$(74) \quad d = \frac{\lambda}{2(\cos \varphi_i - \cos \varphi_s)}$$

unde d este interfranja.

La mișcarea complexă de rotație și translație apar franje localizate la distanța i de frontul de undă reconstituit. Aplicînd legea sinusurilor în fig.14 obținem:

$$(75) \quad i = \frac{t \sin \varphi_i}{2\beta - \alpha}$$

$$(76) \quad \alpha = \frac{t \sin \varphi_s}{s}$$

și cum $d = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{2\beta - \alpha}{2}}$ vom avea din (75)

$$(77) \quad d \approx \frac{\lambda i}{t \sin \varphi_i}$$

Relațiile (75), (76) și (77) formează un sistem de trei ecuații cu necunoscutele t , β și α , rezolvabil dacă se cunosc experimental φ_i , φ_s , i și d sau echivalent cunoașterea lui $\vec{T}$ a priori, ceea ce nu prea este convenabil, în practică $\vec{T}$ fiind rezultatul

ce interesează. Deși există un mare număr de studii pentru localizarea și interpretarea franjelor în IHDE până în prezent nu s-a ajuns la o teorie suficient de generală, compatibilă cu toate rezultatele experimentale și capabilă să le verifice integral.

Din cele expuse mai sus reținem ca foarte important sistemul de franje produs de o rotație pură (74), franje paralele echidistante.

2.3. Interferometria holografică aplicată în controlul nedistructiv.

Dezvoltarea interferometriei holografice de aproximativ 10 ani a dotat controlul nedistructiv cu o nouă tehnică de mare importanță.

Cu această tehnică se pot soluționa numeroase probleme de inspecție și măsurare a materialelor și pieselor industriale:

- detectarea defectelor de continuitate (fisuri, pori) și a anizotropiei materialelor (recristalizări, incluziuni)
- inspecția diferitelor materiale prelucrate (lamine, structuri sudate sau intuite, palete de turbine, cilindri, cauciucuri, etc.).

Un număr mare de lucrări au fost dedicate în literatura de specialitate metodelor de testare holografice pentru diferite probleme practice și pentru corelarea structurii franjelor de interferență cu deplasările sau deformările specimenului investigat.

2.3.1. Metode generale pentru punerea în evidență a defectelor în controlul nedistructiv holografic.

Metodele de analiză holografică ne permit să determinăm deformări ale suprafeței în domeniul aproximativ de $3 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ - $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}$.

././.

Pentru a efectua testarea unei piese în vederea punerii în evidență a unor defecte ale acesteia sau măsurării unor parametri mecanici, este necesară găsirea unor solicitări adecvate. Acestea vor produce deformări ale obiectului, respectiv ale suprafeței acestuia. Holografic vom măsura mărimea deformării fiecărui punct al suprafeței și modificări locale tipice anumitor defecte.

Solicitările trebuie alese în funcție de structura piesei, de mărimea ce trebuie măsurată, de accesibilitatea piesei (în cazul în care face parte dintr-un sistem complex) și le putem împărți în patru categorii:

1. Solicitări mecanice statice. Aplicarea unor forțe mecanice statice (sau cupluri de răsucire, încovoiere) adecvate ca direcție și intensitate ne ajută în special la calcularea mărimilor corespunzătoare (modul de elasticitate, moment de încovoiere, etc.) din mărimea deformării fiecărui punct al suprafeței.

Determinarea defectelor existente (mărime minimă și adâncime maximă) depinde în special de coeficientul de elasticitate al materialului și necesită în general un control riguros al franjelor (eliminarea franjelor datorate deformării globale este partea experimentală a lucrării de față).

2. Solicitări de presiune. Metoda este însă restrânsă la piesele a căror construcție o permit. Pentru structuri laminate se pot determina defecte cu dimensiuni de peste 10 mm și la adâncimi până la 1,2 mm.

3. Solicitări termice. În funcție de condițiile tehnologice se poate inspecta piesa în timpul răcirii sau prin aplicarea unui gradient termic pentru încălzire. Deformarea suprafeței este datorată variației coeficientului de dilatare termică și în special conductibilității termice, ce conduce la variația temperaturii în piesă și ca atare la deformări.

Aceste variații pot fi datorate și unor defecte (de exemplu fisuri). Pentru structuri laminate este suficient un gradient termic de câteva grade și se pot determina defecte cu dimensiuni peste 10 mm și la adâncimi până la 6 mm.

4. Solicitări mecanice dinamice, Piesa este supusă unei solicitări sonore sau ultrasonice ca frecvență și intensitate adecvate scopului și se măsoară amplitudinea de vibrație, a suprafeței corpului. Se pot face măsurători de material (de exemplu măsurarea grosimii plăcilor) sau punerea în evidență a unor defecte (exfolieri, crăpături). Pentru laminate, folosind frecvențe de 5-75 KHz, se pot pune în evidență defecte cu dimensiuni peste 6 mm și la adâncimi până la 1,2 mm.

Structurile ce pot fi analizate prin interferometrie holografică nu impun nici o restricție principială. Fiecare reper necesită însă o analiză separată pentru determinarea solicitării adecvate și a metodei holografice optime. De asemenea această analiză urmărește stabilirea metodologiei de lucru pentru o interpretare cât mai ușoară a rezultatelor.

În această direcție este practic imposibil de dat rețete generale. Pe de altă parte, este dificil de stabilit exact domeniul de aplicare pentru care metodele holografice sînt efectiv preferabile celorlalte.

2.3.2. Interpretarea franjelor în interferometria holografică problemă centrală a controlului nedistructiv.

Interpretarea datelor în interferometria holografică în termenii continuității de material comportă rezolvarea a două probleme inverse (tip, cunoscînd efectul, să se determine cauza).

a) cunoscînd structura franjelor de interferență să se determine deformarea suprafeței;

b) cunoscînd deformarea suprafeței, să se determine continuitatea de material sau alți parametri ai piesei controlate.

Problema (b) intră în domeniul teoriei elasticității și ea necesită o analiză laborioasă, chiar pentru cazurile simple. Deși o considerăm foarte importantă o vom ocoli, luînd în considerație numai informația semicantitativă dată de deformația unui sistem de franje etalon. Aceasta ne va permite să accentuăm asupra problemei (a), specifică holografiei și să sintetizăm principalele rezultate obținute în acest domeniu.

Din anul 1965, cînd a apărut interferometria holografică, și pînă acum au apărut sute de lucrări referitoare la interpretarea franjelor. Mulți autori tind să elaboreze propriile lor metode de interpretare pentru diferite probleme particulare, care prin diversitate stîrnesc confuzie. Echivalența sau contradicțiile acestor metode sînt greu de demonstrat.

În pofida acestor dificultăți, putem clasifica majoritatea metodelor de interpretare a franjelor în patru categorii principale:

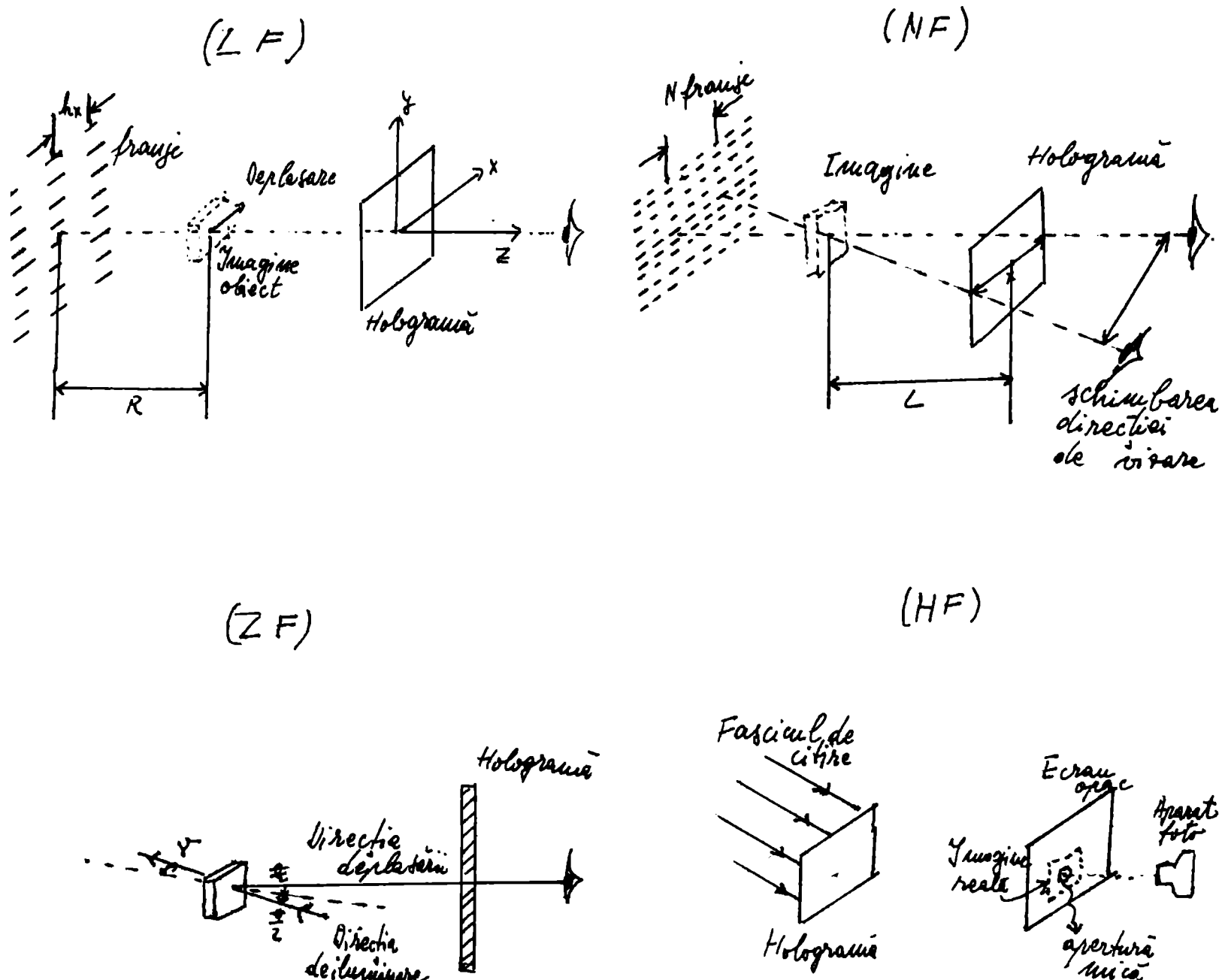
- (1) Tehnica localizării franjelor (LF)
- (2) Tehnica numărării franjelor (NF)
- (3) Tehnica găsirii franjei de ordin zero (ZF)
- (4) Tehnica analizei franjelor Haidinger (HF)

Primele două tehnici sînt echivalente, datorită faptului că localizarea franjelor bazată pe vizibilitatea lor maximă (LF) este echivalentă cu localizarea franjelor prin paralaxă (NF). În acest moment trebuie să remarcăm că holografia este o tehnică de înregistrare a unei imagini tridimensionale pe o placă foto bidimensională; în general, franjele unei interferograme holografice trebuie să reprezinte atunci mișcarea tridimensională a obiectului între două stări înregistrate.

Dacă aceste franje sînt văzute dintr-o singură poziție, ele se prezintă observatorului ca o configurație bidimensională, ceea

ce produce o ambiguitate în interpretare.

S-a observat, încă de la începuturile interferometriei holografice, că franjele de interferență sînt tridimensionale și, în consecință, nu sînt localizate obligatoriu pe suprafața obiectului investigat. Planul de localizare al franjelor în raport cu imaginea este folosit în tehnicile LF și NF pentru interpretarea interferogramelor holografice. Datorită acestui fapt, vom sintetiza în tabela următoare proprietățile de localizare și forma franjelor produse de diferite tipuri mecanice uzuale, așa cum au rezultat din diverse experimente.



Tipul mișcării	Tipul deformării	Localizarea	Descrierea fenomenului
Traslația în plan normală pe linia de vîrtej	Divergență colimată	În toate imaginii la infinit	Drepte paralele echidistante, precum și obiect proporțional cu deplasarea.
Traslația longitudinală (pe linia de vîrtej)	Divergență colimată	Prost definită la infinit	Concurente.
Flexiune (rotație în jurul unei axe care rămîne ortocentru	Divorț	Pe imagine	Drepte paralele echidistante precum și obiect proporțional cu unghiul de rotație.
Rotație în plan	Divorț	a) Pe imagine. b) Pe un unghi înclinat. c) Pe o dreaptă în plan. d) Numai în b - un punct staționar.	Drepte paralele echidistante, precum și obiect proporțional cu unghiul de rotație.
Deformație în plan (întrindere)	Divorț	a) Pe imagine b) Pe un unghi înclinat	Neregulate, precum și proporțional cu deplasarea și funcție de geometria corpului.
Deformație pe linia de vîrtej	Divorț	Pe imagine	Neregulate, precum și proporțional cu gradientul deplasării și funcție de geometria corpului.

În afara tipurilor de mișcare simplă descrise în tabelă au fost analizate și combinații ale acestora: mișcări de pivotare (rotație în jurul unei axe perpendiculare pe axa de vizare dar nu în planul obiectului), de înșurubare (tranzlație de-a lungul axei de rotație) etc.

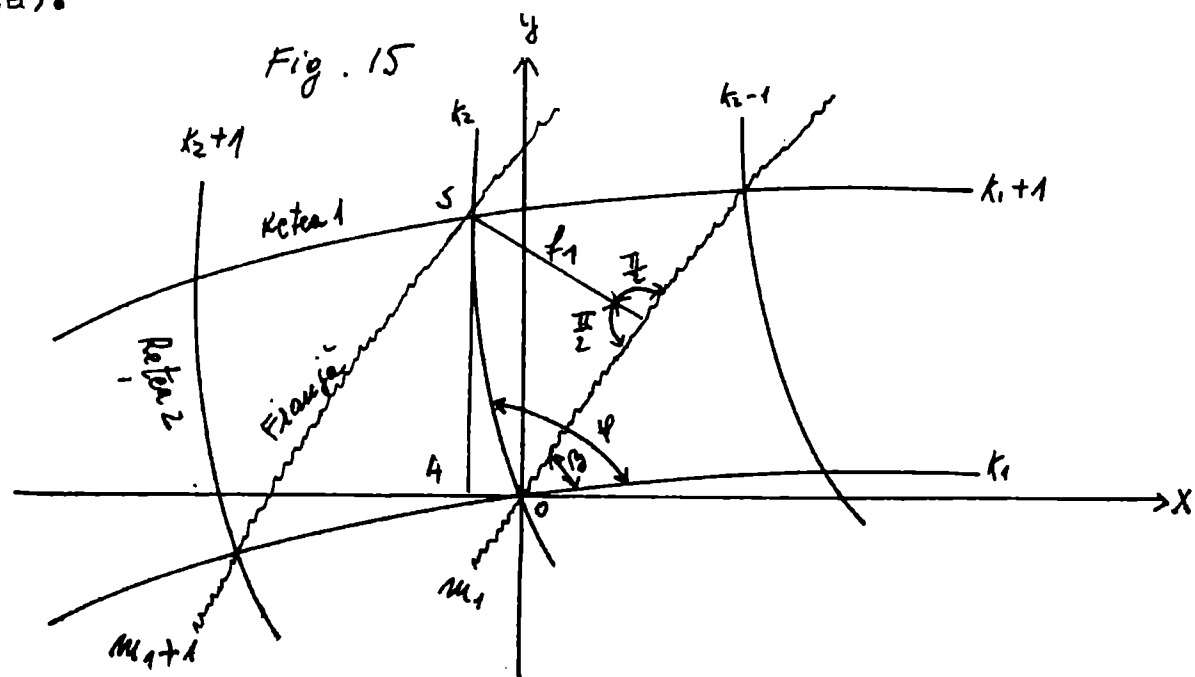
Astfel de mișcări combinate dau naștere la sisteme de franje complexe, dificil de localizat și interpretat.

Acest lucru este valabil în special în cazul deformațiilor complexe, de tipul celor care apar în problemele de analiza tensiunilor. Totuși, printr-o analiză adecvată, atent aleasă, este posibilă interpretarea celor mai complexe distribuții de franje și în continuare, vom încerca să sistematizăm caracteristicile celor patru tehnici de interpretare, arătate anterior, și să stabilim criteriile de opțiune pentru una dintre ele în funcție de particularitățile experimentale.

Alegerea unei tehnici de interpretare depinde de mai mulți factori: precizia cerută, timpul disponibil pentru analiză, natura și caracteristicile obiectului, puterea laserului, tipul de deplasare sau deformare măsurat, cunoașterea deplasării, posibilitățile de calcul existente, etc.

Caracteristicile principalelor tehnici de interpretare a franjelor sînt date în tabelul următor:

Tehnică Caracteristici		L F	N F	Z F	H F
Metoda	Localizarea franjelor	Paralaxa franjelor	Bătăutul diferitelor ale drumului optic	Diagramarea imaginii sau obiectului	
Parametrul măsurat	Componența în planul obiectului	Componența în planul obiectului	Componența în direcția de vizare	Toate componențele	
Formula de bază	$dx = \frac{\lambda R}{\pi x}$ (fig.)	$dx = \frac{N \lambda L}{x}$ (fig.)	$\Delta = m \lambda$ $d\frac{\phi}{2} = \frac{m \lambda}{2 \cos \frac{\phi}{2}}$ $dZ = m \frac{\lambda}{2}$ (fig.)	$dx = \frac{\lambda L}{\pi x}$ $dZ = \frac{2 m \lambda L^2}{8 m^2} = \frac{2 \lambda L \delta}{\pi x 18^2}$ (fig.)	
Numărul observațiilor ne- cesare pentru o componentă	1	liniar continuu	1	1 pentru fiecare punct al imaginii	
Numărul fotogramelor ne- cesare pentru măsurarea 3D	1 (în principiu)	1 (în principiu)	3	1	
Numărul observațiilor	2 (în principiu)	2 linii în planul fotogramelor (în principiu)	3	1	
Dificultăți practice	- Localizarea - Construcția de măsurări	- Dimensiunea limitată a fotogramelor	- Identificarea fran- jei de ordin zero - Analiza în general	- Intensități mici - Construcția de timp - Dimensiunea limitată a fotogramelor	
Precizia	Toate limitate	Limitată	Bună	Toate bune	



O metodă comodă de tratare teoretică a fenomenului este propusă de Durelli și analizează franjele ca pe curbe parametrice (fig.15).

Astfel fie prima rețea purtătoare F_1 și a doua rețea modulatorie F_2 :

$$(78) \quad F_1(x, y) = k_1, \quad F_2(x, y) = k_2$$

La privire ochiul va urmări și intersecțiile curbelor pe direcțiile diagonalelor paralelogramelor, curbilinii formate, sesizând încă două familii de curbe (franjele Moiré):

$$(79) \quad \begin{aligned} M_1(x, y) &= F_1(x, y) - F_2(x, y) = k_1 - k_2 = m_1 \\ M_2(x, y) &= F_1(x, y) + F_2(x, y) = k_1 + k_2 = m_2 \end{aligned}$$

Datorită particularităților vederii umane (urmărirea preferențială a frecvențelor spațiale mari) în fiecare regiune a figurii de interferență va fi sesizată doar una din familiile de curbe (79), respectiv cea pentru care diagonala de urmărire este mai scurtă (frecvență spațială mai mare a punctelor de intersecție).

Interfranja f_1 este din fig.15:

$$(80) \quad f_1 = OS \sin(\varphi - \beta)$$

Tot din fig. 15 avem

$$(81) \quad OS = \left[\left(\frac{\partial x}{\partial m} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial m} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$(82) \quad \tan \beta = \left[\frac{\partial F_2(x, y)}{\partial y} \right] \cdot \left[\frac{\partial F_2(x, y)}{\partial x} \right]^{-1}$$

$$(83) \quad \tan \varphi = - \left(\frac{\partial y}{\partial m} \right) \left(\frac{\partial x}{\partial m} \right)^{-1}$$

Eliminând în (80) unghiurile φ și β cu (82), (83) explicitând OS cu (81) și ținând cont de relația matematică

$$(84) \quad \frac{\partial M_1(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial m} + \frac{\partial M_1(x, y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial m} = 1$$

obținem

$$(85) \quad f_1 = \frac{\delta m}{\left[\left(\frac{\partial M_1(x, y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M_1(x, y)}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}}$$

Deoarece avem curbele date parametric cu salturi discrete pentru numerotare $\sum m = 1$ și (85) trece în

$$(86) \quad f_1 = \left[\left(\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial x} - \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial y} - \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

ținând cont de (79)

Similar obținem

$$(87) \quad f_2 = \left[\left(\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial x} + \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial y} + \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Aplicînd același raționament utilizat la deducerea (86) și (87) obținem pentru pasul rețelelor F_1 și F_2

$$(88) \quad \rho_1 = \left[\left(\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

$$(89) \quad \rho_2 = \left[\left(\frac{\partial F_2(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_2(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

Zona de frontieră ce delimitează franje Moiré vizibile date de M_1 de franje Moiré vizibile date de M_2 este caracterizată de intersecția F_1 cu F_2 sub unghiurile drepte, sau echivalent:

$$(90) \quad \frac{\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial y}}{\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial x}} \cdot \frac{\frac{\partial F_2(x,y)}{\partial y}}{\frac{\partial F_2(x,y)}{\partial x}} = -1$$

Ecuatia zonă de frontieră este

$$(91) \quad \psi(x,y) = \frac{\partial F_1(x,y)}{\partial y} \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial y} + \frac{\partial F_1(x,y)}{\partial x} \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial x}$$

Introducînd în (86) (87) expresiile (88), (89) și (91) obținem pentru interfranja Moiré expresia

$$(92) \quad f_{1,2} = \frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1^2 + \rho_2^2 \mp \psi \rho_1 \rho_2)^{\frac{1}{2}}}$$

Ținând cont de (88), (89), (91) obținem pentru $\psi \rho_1 \rho_2$

$$(93) \quad \psi \rho_1 \rho_2 = \left\{ 1 + \left[\frac{\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial y} - \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial F_1(x,y)}{\partial x}}{\frac{\partial F_1(x,y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial y} + \frac{\partial F_1(x,y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial F_2(x,y)}{\partial x}} \right]^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} =$$

$$= (1 + \tan^2 \theta)^{-\frac{1}{2}} = \cos \theta$$

Cu (93) vom obține pentru (92) forma:

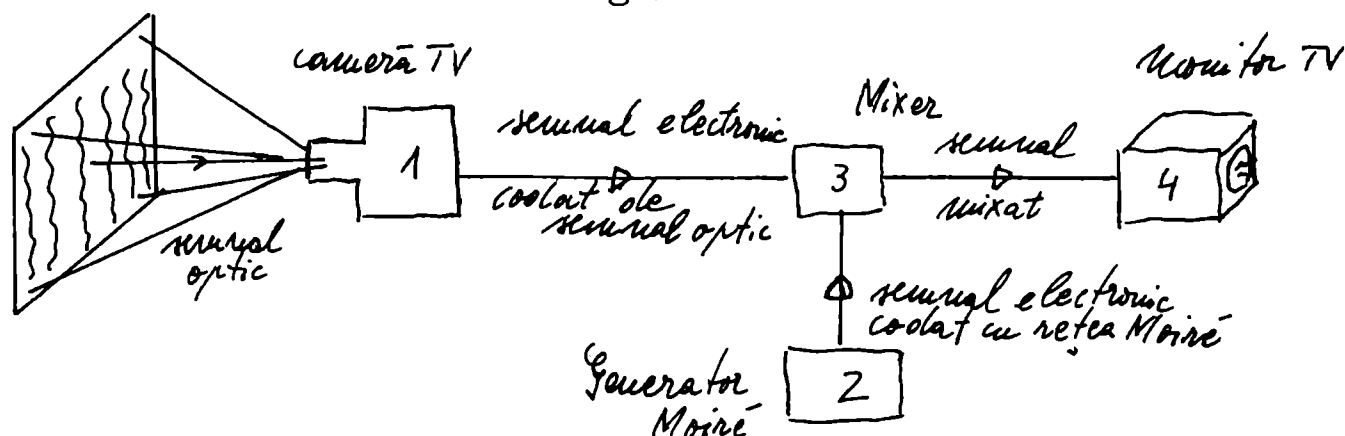
$$(94) \quad f_{1,2} = \frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1^2 + \rho_2^2 \mp \rho_1 \rho_2 \cos \theta)^{\frac{1}{2}}}$$

3.1.2. Producerea fenomenului Moiré.

Cu toate că fenomenul este cunoscut încă din secolul trecut (1859, Foucault propune o metodă de verificare a sistemelor optice cu Moiré), producerea lui constituie o problemă. Prin interferență geometrică se cer rețele perfect paralele sau cu geometrii simetrice și cu un număr foarte mare de linii ($\sim 10^2 \text{ cm}^{-1}$), condiție care costă mult și astăzi, ținând cont și de numeroasele tipuri de rețele necesare.

Generarea electronică a unui semnal video care să formeze o rețea de drepte paralele echidistante este o soluție elegantă a acestei probleme. În plus montajul electronic poate ușor genera o gamă foarte largă de frecvențe spațiale de diverse înclinări și factori de umplere, de unde o *VERSATILITATE* remarcabilă a metodei.

Fig.16



În fig.16 este sugerat un montaj practic, în care imaginea rețelei de macrofranje dată de o interferogramă holografică este preluată de o cameră TV (1) și transformată într-un semnal video.

În montajul electronic (3) acest semnal este mixat cu semnalul electroc provenit de la generatorul electronic de rețele Moiré (2) și trimis la intrarea video a unui monitor TV.

Pe ecranul acestuia vor apărea franje Moiré rezultate din interferența semnalelor electronice purtând codată informația optică, procesul fiind echivalent cu o interferență optică obișnuită.

Datorită neliniarității camerei, monitorului și componentelor electronice, atât rețeaua de macrofranje cât și cea generată electronic pot fi șterse de pe ecran, efectul Moiré fiind deosebit de clar.

Variația în limite largi a parametrilor imaginii obținute este posibilă datorită performanțelor electronice ale montajului: contrast cameră TV, contrast monitor TV, mixaj electronic (modificarea raportului luminozităților imaginii macrofranjelor și imaginii rețelei generate electronic).

În aceste condiții avantajoase de lucru se pot obține rezultate concludente ușor și mai repede ca în tehnicile mai vechi, ceea ce va face ca această metodă de producere a franjelor să se impună în curând.

3.2. Interpretarea imaginii obținute prin Moiré - generat electronic.

Fie un solid rigid cu o deformare de ordinul mm studiat printr-o metodă interferometrică holografică.

Sistemul de franje parazite, date de o mișcare de ϕ ilt,

././.

modulat de sistemul de franje utile, este de forma:

$$(95) \quad \Delta_R + \Delta_U = (2u+1) \frac{\lambda}{2}, \quad u \in \mathbb{N} + \{0\}$$

Sistemul auxiliar de franje, cu maximele numerotate prin $m, m \in \mathbb{Z}$ este

(96) $G(x, y) = m$

Suprapunînd franjele (95) și (96) obținem franje Moiré localizate acolo unde este îndeplinită condiția:

$$(97) \quad (u - u) = 1$$

sa u

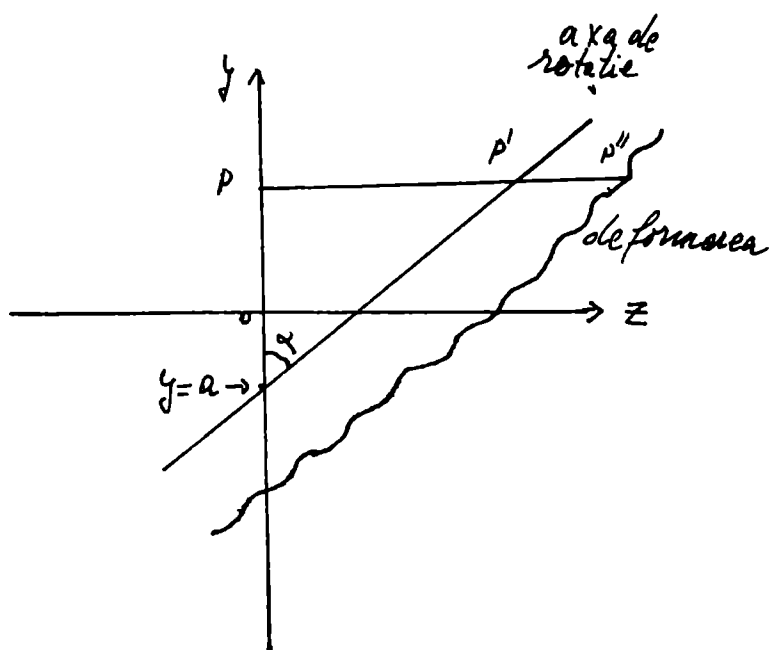
$$(98) \quad \Delta U = (2u+1)\frac{\lambda}{2} - \Delta \rho = (2\ell+1)\frac{\lambda}{2} + \lambda G(x,y) - \Delta \rho$$

Dacă structurile sistemului auxiliar de franje corespund structurii sistemului de franje parazite și mărimea este aleasă corespunzător (98) devine:

$$14 = (2\ell + 1) \frac{1}{2}$$

adică sistemul de franje Moiré reprezintă franjele de interferență datorate deformării pure.

Fig. 17



În fig.17 este sugerată formarea Moiré-urilor pentru o mișcare de înclinare (tilt) cu următoarea convenție: indicele m se alege astfel încât franja care reprezintă cea mai mică deformare în figura Moiré să aibă indicele $l = 0$.

$$(99) \quad \Delta r = (y - a) f_r \lambda, \quad f_r = \frac{\tan \alpha}{\lambda}$$

Rețeaua auxiliară pentru demodulare: $\mu = 1, 2, 3, \dots$

$$(100) \quad y = m d_s + \varphi, \quad m \in \mathbb{N} + \{0\}, \quad d_s = \frac{1}{f_s}$$

$$G(x, y) = (y - \varphi) f_s = m$$

Tinând cont de (98) avem din (99) și (100) :

$$(101) \quad \Delta u = (2l + 1) \frac{\lambda}{2} + (f_r - f_s) y \lambda + (a f_r - \varphi f_s) \lambda$$

Cazul 1. În absența deformației, franjele parazite și cele auxiliare coincid:

$$f_s = f_r \quad \text{și} \quad a = \varphi$$

$$(102) \quad \Delta_0 = (2l + 1) \frac{\lambda}{2}$$

Franjele Moiré reprezintă franje de interferență datorate deformării pure.

Cazul 2 $f_s = f_r$ și $a = \varphi + \delta \varphi$

$$(103) \quad \Delta_0 = (2l + 1) \frac{\lambda}{2} + f_s \lambda \delta \varphi$$

cu eroare maximă pentru $\delta \varphi = \frac{d_s}{2}$

$$(104) \quad \Delta_0 = (2l + 1) \frac{\lambda}{2} \pm \frac{\lambda}{2}$$

Cazul 3 $f_s = f_r + \delta f_r$; $a = \varphi + \delta \varphi$

$$(105) \quad \Delta_0 = (2l + 1) \frac{\lambda}{2} + f_s \lambda \delta \varphi + (\varphi - \varphi) \lambda \delta f_r$$

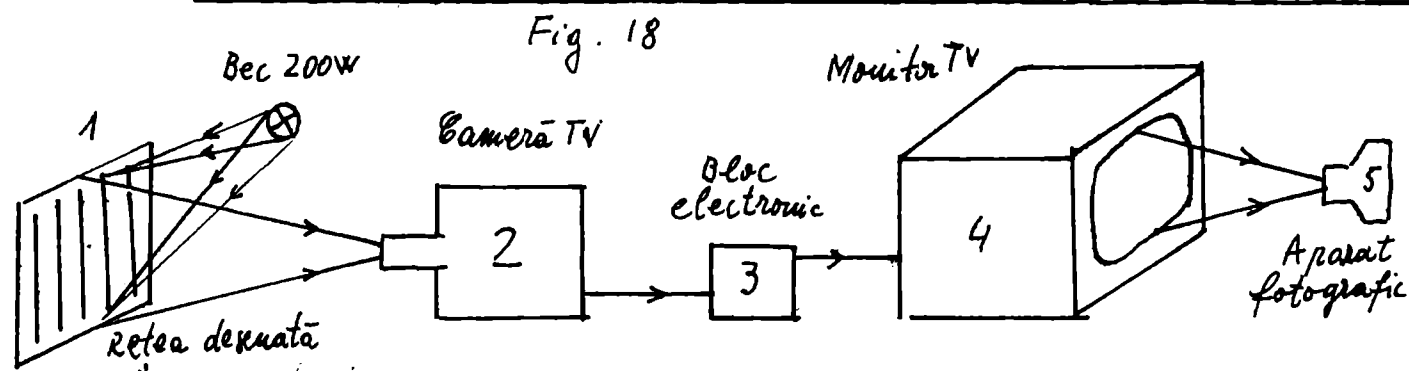
CAPITOLUL 4

4.1. Descrierea aparaturii folosite în eliminarea franjelor parazite din interferometria holografică și rezultate experimentale.

Lucrarea a fost efectuată în laboratoarele LETAR. sub îndrumarea competentă și de cele mai multe ori cu ajutorul îndrumătorului științific.

În prima fază am verificat posibilitatea obținerii franjelor Moiré prin tehnica descrisă în 3.1.2. în felul următor.

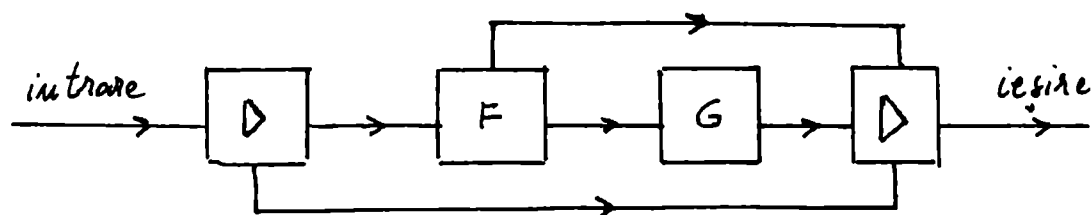
4.1.1. Franje Moiré obținute prin interferență geometrică între o rețea desenată și o rețea generată electronic.



În fig. 18, (1) reprezintă o rețea tipărită pe o revistă de optică, iluminată de la aproximativ 1 m de un bec de 200 W. Imaginea este preluată de o cameră TV tip CCTV Video (2), formarea imaginii fiind asigurată de obiective cu $f_1 = 25 \text{ mm}$, $f_2 = 45 \text{ mm}$, $f_3 = 70 \text{ mm}$ de tip normal și superangular (2). La ieșire camera poate furniza un semnal, modulat de imagine, direct pentru etajele de baleiere a fasciculului electronic din tubul cinescop (tipul CCTV Video) sau două tipuri de semnale, cel menționat anterior plus un semnal modulat de imagine pe o purtătoare de înaltă frecvență în canalul 2 TV (tipul CCTV Video Lux).

Semnalul furnizat de (2) intră în (3) care este un montaj electronic cu următoarea schemă bloc.

Fig.18.3.



După ieșirea din primul etaj amplificator semnalul trece pe două căi: prin F este extras semnalul de sincronizare ce intră în blocul 6. Aici se formează semnalul ce va apare pe monitor ca o rețea de drepte paralele. Blocul 6 are următoarele reglaje: 1) gradul de modulare a semnalului (reglează raportul intensităților imagine venită pe cale optică, imagine generată electronic) ; 2) diferența de timp în producerea impulsurilor ce modulează o linie (reglează frecvența liniilor) 3) diferența de timp între două impulsuri analoage ce modulează două linii (reglează înclinarea rețelei) 4) numărul impulsurilor următoare celui ce stabilește frecvența liniilor rețelei (reglează factorul de umplere al rețelei)

În ultimul amplificator intră semnalul de intrare amplificat liniar de primul amplificator, semnalul provenit de la blocul 6 și un semnal de sincronizare dat de F.

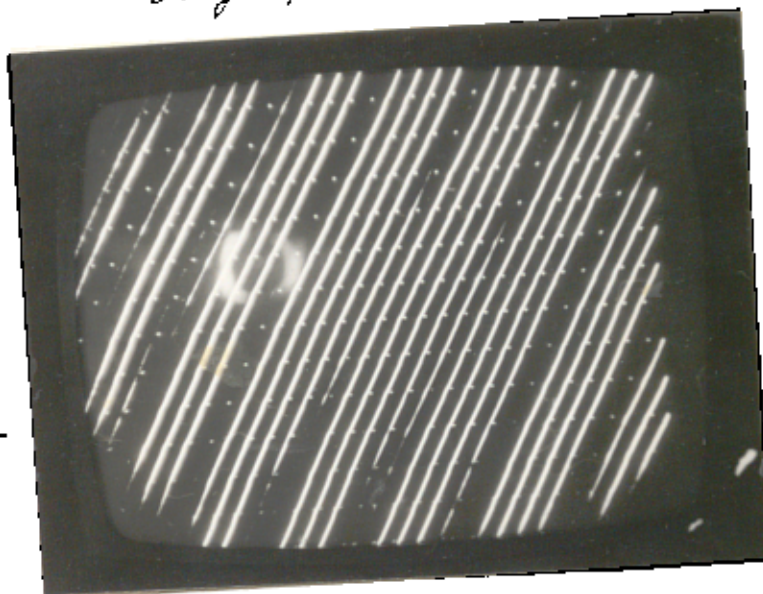
Monitorul (4) este un TV obișnuit, tip Sport (producție Românească), atacat de semnalul furnizat de (3) direct pe blocul de amplificare pentru bobinele de deflexie și grila de comandă a tubului cinescop.

Imaginea furnizată de (4) este înregistrată pe peliculă fotografică (27DIN) cu un aparat foto tip Pentacon Six.

După tatonări privind luminozitatea imaginii și modificări în generatorul electronic 6 la reglajul raportului intensităților am obținut franjele Moiré dorite (vezi fotografia 1).

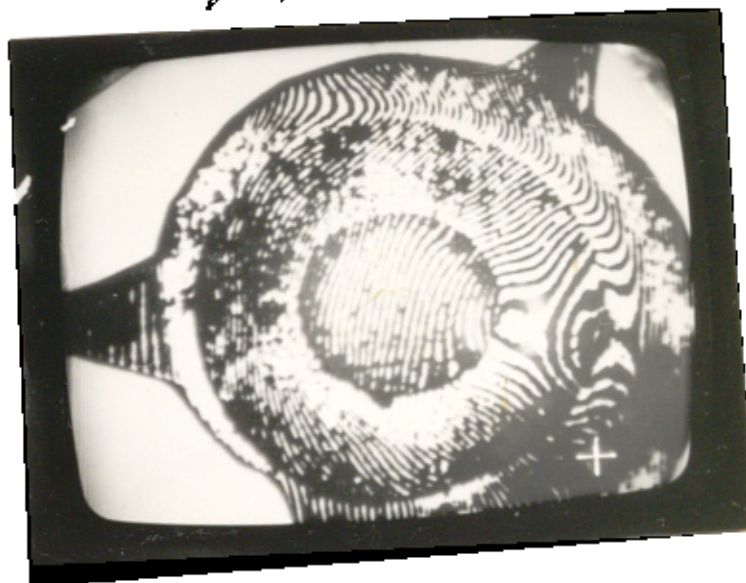
Fotografia 1

1. Fenomenul Moré,
produs de mixarea elec-
tronică a semnalului de
la camera TV, semnal codat
cu imaginea unei rețele de
drepte desenate pe hirtie,
cu semnalul generat electro-
nic în blocul G.



Fotografia 2

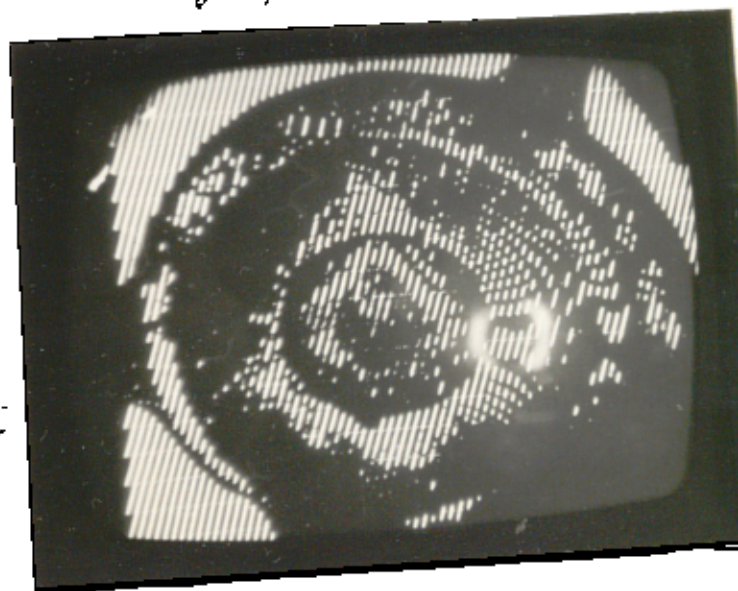
2. Fotografia unei I.H.O.E.
efectuată unui corp de
pompa după unele presiuni.
Fracje vizibile sînt
rezultatul unei microrotații
parazite, fracje utile olato-
rate concentratorilor de efor-
turi nu apar



Fotografia 3

3. Rezultatul eliminării fra-
cilor parazite din fotografia 2.

Se remarcă, în centrul fi-
gurii, fracjele ce apar în
jurul concentratorilor de efort
(patru bolturi), fracje ce
descriu de formările suprafeței
din $3 \cdot 10^{-7}$ m în $3 \cdot 10^{-8}$ m. (inter-
pretare cu metoda ZF)



4.1.2. Eliminarea franjelor parazite de pe o interferogramă holografică reprodusă pe o fotografie.

Următoarea fază a fost verificarea posibilității de eliminare a franjelor parazite apărute în interferometria holografică.

Pentru aceasta am luat fotografia unei interferograme holografice reprezentînd un corp de pompă supus la o solicitare, interferogramă cu franje parazite, și am încercat să ajungem cu metoda de Moiré la o interferogramă fără franje parazite. Drept etalon am folosit interferograma fără franje parazite a aceluiași corp de pompă supus solicitării.

Montajul de lucru a fost același din fig.10, dar rezultatele neconcludente. Analizînd mai atent fenomenul de formare a imaginii am constatat că fenomenul nu se produce datorită rezoluției limitate a diverselor componente optice.

Astfel: a) fotografia cu care au lucrat era de dimensiuni 3 cm x 4 cm cu rezoluție de cel mult 10 $\frac{\text{linii}}{\text{mm}}$, b) obiectivul cu $f_{\text{minim}} = 25 \text{ mm}$ forma o imagine a fotografiei de cel mult $\frac{1}{25}$ din suprafața traductorului opto-electronic c) traductorul are o rezoluție de cel mult 10 $\frac{\text{linii}}{\text{mm}}$ pentru contrast maxim și contur bine definit.

În aceste condiții, imaginea inițială (de pe fotografie) pierde prea multă informație în lanțul de transformare pînă la ecranul monitorului.

În afară de aceasta, constatăm și o diferență de frecvențe spațiale între liniile interferogramei și ale rețelei Moiré prea mare pentru a fi micșorată prin reglajele electroce ale blocului 6.

Pentru a rezolva această problemă am modificat optica camerei TV în așa fel încît să obținem pe tubul vidicon o imagine egală ca suprafață cu cea a traductorului.

Practic am pus un distanțor obiectivului camerei, imaginea nemai formându-se în planul focal, ci la o distanță determinată după acesta. Mărirea obținută este supravimțată în detrimentul punerii la punct care se face între plane foarte apropiate (3+5 cm).

După aceste modificări am fost nevoiți să mărim luminozitatea fotografiei, camera fiind la cîtiva cm. de fotografie, și să îmbunătățim partea electronică de formare a semnalului pentru a obține o imagine satisfăcătoare și obținerea Moiréului dorit.

Pentru eliminarea franjelor parazite am procedat astfel: am măsurat pe ecranul monitorului TV frecvența franjelor ce apăreau pe fotografia interferogramei, în diverse locuri, precum și factorul de umplere (alb, negru) al franjelor, după care am generat electronic o rețea avînd o frecvență egală cu media ponderată a frecvențelor franjelor interferogramei și un factor de umplere egal cu cel al franjelor.

Suprapunînd cele două rețele (electronic) am obținut rezultatul din fotografia 3.

Se remarcă ușor diferența între centrul fotografiei 2 (imaginea bidimensională a interferogramei IHDE unui corp de pompă supus presiunii) și centrul fotografiei 3.

Noua imagine (foto 3) poate fi ușor interpretată acum cu metodele descrise în capitolul 2, dînd informații concrete pentru controlul holografic nedestructiv.

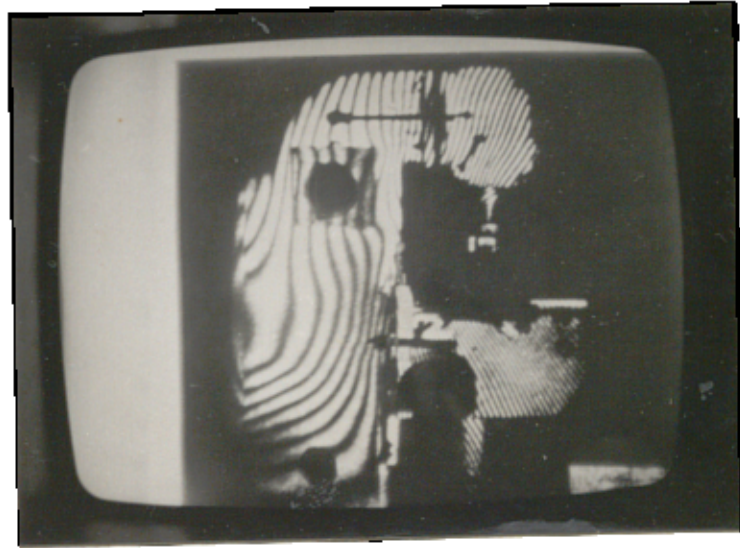
Problema ce rămîne în continuare este dacă imaginea din fotografia 3 este într-adevăr cea căutată, respectiv dacă franjele ce au apărut descriu deformarea reală a corpului de pompă.

O posibilitate, din păcate pur teoretică, este de a analiza deformarea pe un model matematic. Forma complicată și prezența concentratorilor de eforturi fac imposibilă această alternativă.

Fotografia 4

4. Fotografia unei interferograme holografice efectuată unei mașini unelte în regim de funcționare.

Franjele ce apar sînt rezultatul unei mișcări nedorite în timpul expunerii.



Fotografia 5

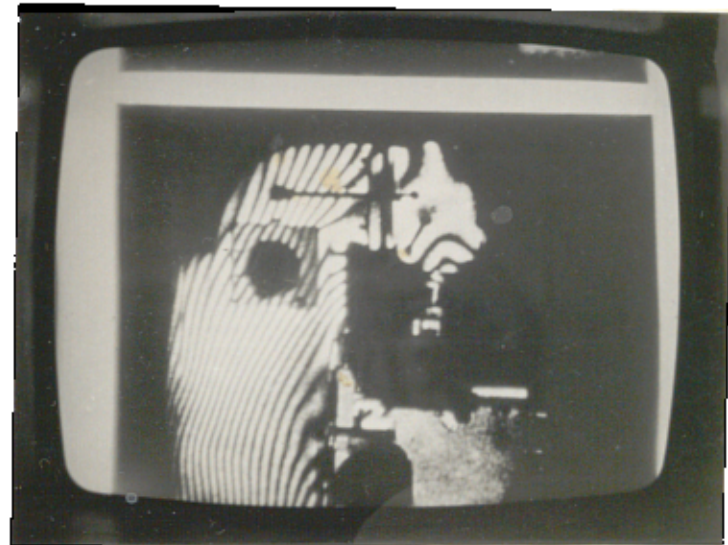
5. Rezultatul eliminării franjelor parazite din foto 4 cu metoda de Moiré generat electronic. Interesează partea dreaptă sus, franjele descriu curbele de egali deformare pe direcția de vizare.

Interfranja $\sim 3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ (ZF)



Fotografia 6

6. Rezultatul eliminării franjelor parazite din foto 4 cu metoda sandwich, structura părții dreapta sus similară celei din foto 5



Am ales atunci o cale de a verifica corectitudinea metodei ca atare, prin compararea rezultatelor obținute cu alte metode similare.

Astfel, în fotografia 4, avem înregistrată imaginea bidimensională a unei interferograme holografice (O mașină unealtă la care interesează comportarea părții dreapta sus). Din cauza condițiilor de obținere tocmai regiunea vizată are numeroase franje parazite ce fac imposibilă interpretarea interferogramei. Autorii articolului din care am preluat fotografia 4 au "curățat" de franje parazite interferograma prin metoda "sandwich", rezultatul fiind fotografia 6, și au dat noul sistem de franje pentru interpretare, ca fiind cel real.

Rezultatele obținute prin metoda Moiré cu fotografia 4 sînt prezentate în fotografia 5 și se pot compara imediat cu cele din metoda "sandwich" (fotografia 6). Similaritatea este evidentă, pînă la identitate neputîndu-se ajunge datorită distorsiunilor fotografiei precum și rezoluției mediocre a acestăia - în comparație cu hologramele pe care au fost făcute fotografiile.

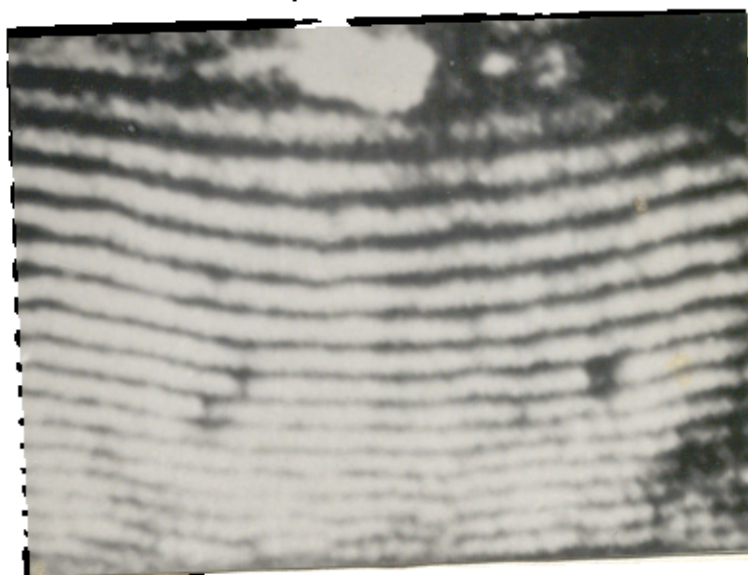
Pentru o comparare mai completă a metodei Moiré am apelat și la fotografia 7, reprezentînd forma bidimensională a unei interferograme holografice făcute unei vertebre. Franjele parazite ce apar împiedică interpretarea celor utile, astfel că, printr-o metodă de Moiré clasic, autorii articolului din care am luat fotografia 7 au "curățit-o" transformînd-o în ceea ce se vede în fotografia 9.

În laborator, cu montajul prezentat anterior, am obținut prin tehnica Moiré de eliminare a franjelor parazite fotografia 8.

Diferențele între rezultate sînt minore și se datoresc în principal lipsei de rezoluție a fotografiilor 7 și 9, mult mai mici decît rezoluția unei interferograme holografice, și diferențelor

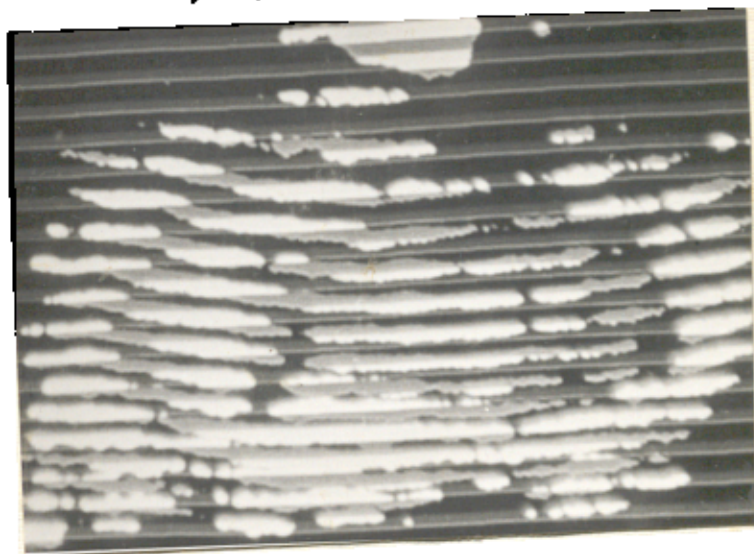
Fotografia 7

7. Fotografia unei interfe-
rograme holografice efectuată
unei vertebre. Fraujele
sunt rezultatul unei incli-
nări parazite (mai mică de
un grad μra) a ratelei
în timpul expunerii.



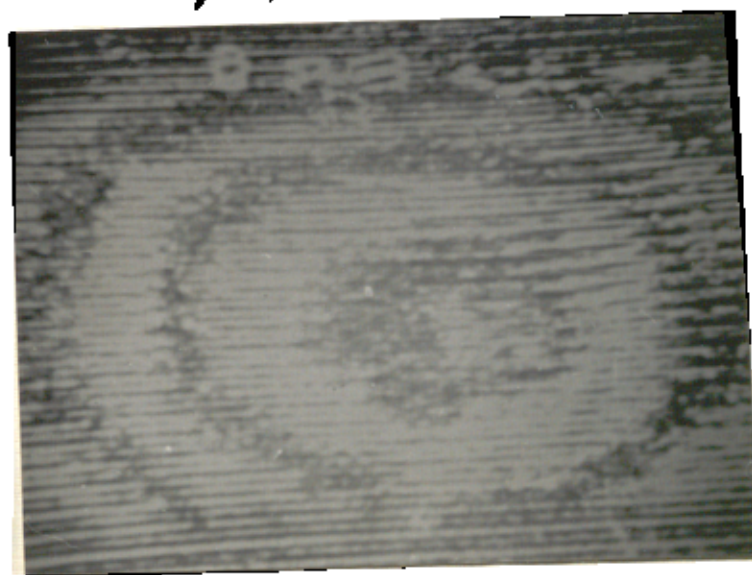
Fotografia 8

8. Rezultatul eliminării
fraujelor parazite din foto-
grafia 7 cu metoda de
Moiré generat electronic



Fotografia 9

9. Rezultatul eliminării
fraujelor parazite din foto-
grafia 7 cu o metodă de
Moiré clasic. Contrastul
îmbunătățit este datorat
unui filtraj spațial și proce-
dentui tricromatic.



între imaginile celor 7 și 9 inițiale, preluate alb negru de camera TV, și imaginea de pe monitorul TV care a fost alb-negru.

Concluzia la care am ajuns după comparația cu aceste metode a fost favorabilă metodei Moiré de eliminare a franjelor parazite, respectiv franjele ce apar după aplicarea ei sînt într-adevăr cele căutate.

În continuare am luat imaginea bidimensională (fotografia 10) a unei IHDE făcute unui corp paralelipipedic metalic supus unei presiuni, IHDE realizată în laborator. Interpretarea ei este imposibilă datorită sistemului de franje parazite ce apar și în mod normal ar fi fost inutilizabilă.

Pentru eliminarea franjelor parazite am procedat similat cazurilor anterioare, respectiv am generat electronic o rețea cu frecvență și factor de umplere cît mai apropiate de frecvența și factorul de umplere al franjelor existente.

Rezultatul este fotografia 11, franjele ce au apărut fiind considerate de noi ca cele necesare pentru interpretarea ulterioară a interferogramei (vezi și 4.1.3.a; 4.1.3.b)

4.1.3. Eliminarea franjelor parazite din interferogramele holografice

În paragrafele anterioare ale acestui capitol am prezentat experimentele ce au fost efectuate pentru confirmarea justetei metodei propuse.

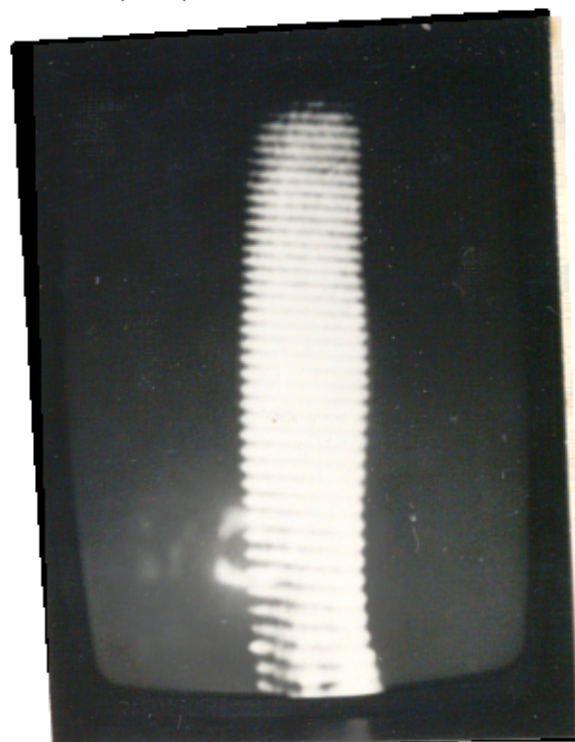
Din descrierea instalației experimentale și a modului de lucru propriu zis s-a putut sesiza ușor că nu s-a lucrat direct pe interferograme holografice ci pe copii pe hîrtie fotografică ale acestora.

Dezavantajele acestui mod de lucru sînt următoarele: 1) Fotografiera unei interferograme holografice presupune un proces

Fotografia 10

10. Fotografia una I.H.O.E. efectuată unui paralelipiped metalic, ucrat pe direcția dimensiunii cele mai lungi.

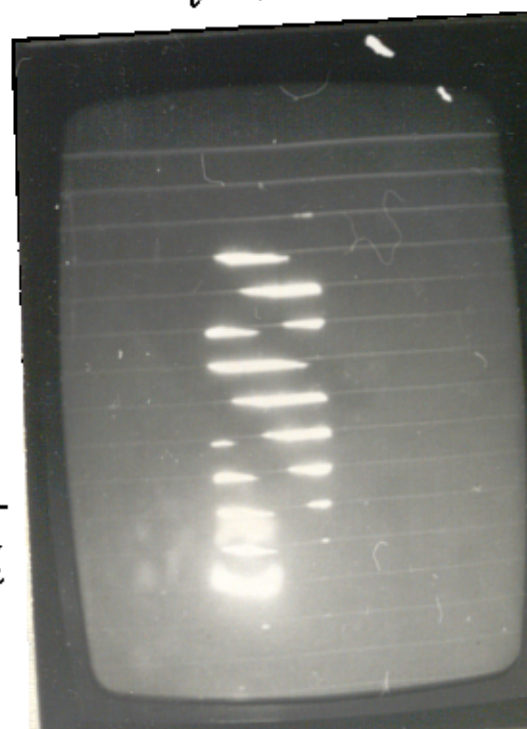
Franjele vizibile sînt rezultatul unei microrotații parazite apărute la aplicarea efortului.



Fotografia 11

11. Rezultatul eliminării franjei parazite din fotografia 10 cu metoda de Moiré generat electronic.

Franjele ce apar, segmente de cercuri concentrice, descriu o deformare pe direcția de vizare (flambaj). Interfranja, $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ m, desparte linii de egală deformare (metoda ZF).

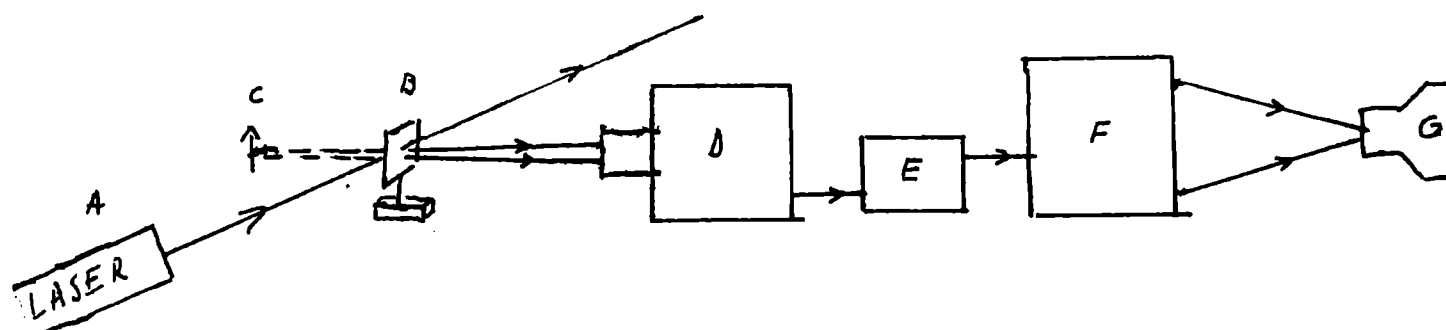


intermediar care necesită timp suplimentar, muncă suplimentară.
 2) Rezoluția imaginii finale scade la nivelul rezoluției hîrtiei fotografice, mult sub rezoluția plăcii fotografice pe care este înregistrată interferograma, 3) Se pierde unul din avantajele esențiale ale interferometriei holografice, anume posibilitatea de a urmări din mai multe unghiuri figura de interferență, impunându-se fotografii multiple pentru o singură interferogramă holografică.

Deci, în mod normal, următorul pas al experimentelor a fost preluarea pe camera TV direct a figurilor de interferență de pe interferogramele holografice.

4.1.3.a. Imagini primare (virtuale) de interferograme holografice.

Fig.19



Montajul experimental sugerat în fig.18 conține: A laser He-Ne de 5 mW sau 50 mW, B hologramă rezultată din IHDE, C imagine primară obținută prin iluminarea hologramei B cu fasciculul laser (imagine virtuală), D cameră TV, E bloc electronic de mixaj imagine dată de camera D cu rețea generată electronic, F monitor TV și G aparat fotografic.

Holograma B a fost obținută prin IHDE efectuată unui corp paralelipipedic supus la un efort (presiune).

Preluarea imaginii virtuale primare pe camera TV a fost relativ dificilă, datorită luminozității slabe a imaginii C. Eficiența la difracție a hologramelor plane cu variația transmitanței este practic în jurul a două trei procente, astfel că iluminată cu un laser de 5 mW imaginea primară nu poate fi preluată de camera TV

Am folosit un laser de 50 mW cu He-Ne pentru a trece peste limita de sensibilitate a camerei TV.

O altă dificultate peste care nu am mai putut trece a fost luminozitatea foarte diferită a diverselor porțiuni ale imaginii primare.

Astfel, dacă ochiul poate deosebi în lumină diurnă aproximativ 50 nivele de contrast diferit în alb și negru, camera TV este limitată doar la 5 nivele de gri. În aceste condiții unele părți ale imaginii trec în regiunile de subexpunere și supraexpunere ale traductorului (tubul vidicon) apărând fals negre sau albe). Neajunsul nu poate fi înlăturat prin procedeele obișnuite, (*mutarea* caracteristicii vidiconului prin limitare electronică sau închidere deschidere a diafragmei obiectivului) decât pe porțiuni mici ale imaginii.

În aceste condiții singurul reglaj disponibil a rămas gradul de modulare a semnalului electronic (vezi 4.1.1.) cu ajutorul căruia am reușit să obținem o porțiune relativ mare a imaginii primare pe care să o "curățăm" de franje parazite.

Astfel în fotografia 12 este imaginea primară a unei interferograme holografice obținute prin IHDE preluată de camera TV și fotografiată pe monitorul TV.

După măsurarea frecvenței spațiale a franjelor și a factorului de umplere și generarea electronică a unei rețele de drepte paralele echidistante de frecvență spațială și factor de umplere

(raport alb negru) corespunzătoare am obținut franjele reale în fotografia 13.

Interpretarea lor cu metodele prezentate în capitolul 4 este posibilă, fiind utilă în controlul nedestructiv.

Cercul vizibil parțial indică o translație longitudinală (pe linia de vizare), iar interpretarea lui cu metoda ZF dă mărirea acestei deplasări, respectiv $\sim 3 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

Constatăm că la presiune paralelipipedul metalic s-a deformat flambînd cu cîteva fracțiuni de micron pe direcția de vizare. Din păcate nu putem prezenta fbtografic hologramele în această lucrare pentru a prezenta diversele sisteme de franje ce apar:

- drepte paralele echidistante D.P.E. în spatele imaginii fiind rezultatul translației în plan (după o compresie).
- DPE pe imagine ca rezultat al înclinării (compresie neuniformă) sau al unei rotații în plan (cuplu de răsucire).

Eliminarea lor s-a făcut, practic, în felul următor: am obținut pe monitorul TV o imagine cît mai clară și de luminozitate cît mai uniformă a interferogramei, imagine pe care am măsurat cu hîrtie milimetrică pasul (inversul frecvenței spațiale) franjelor paralele și gradul de umplere alb negru.

Am generat electronic o rețea de drept echidistante cu înclinare foarte apropiată de a franjelor, cu frecvență apropiată și factor de umplere.

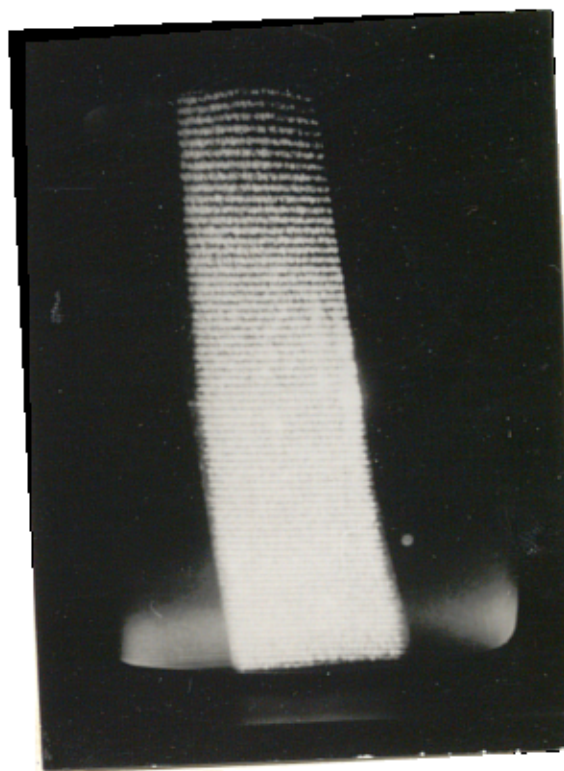
Pentru a realiza condițiile de egalitate riguroasă de înclinare, frecvență și factor de umplere (condiții în care franjele parazite să dispară, vezi cap.3) am procedat după cum urmează:

Variația frecvenței rețelei electronice în jurul frecvenței franjelor produce sisteme de franje variabile (în cazul nostru concret familii de conice) tinzînd spre o configurație lent variabilă cu frecvența: dacă variația se face chiar pe intervalul de "aproximativ egal": $f_s \in (f_n - \varepsilon, f_n + \varepsilon)$.

Fotografia 12

12. Imaginea primară (invertită) a unei interferograme holografice cu dublă expunere efectuată unui paralelipiped metalic supus la presiune.

Franjele vizibile sînt rezultatul unei microrotații parazite a paralelipipedului la aplicarea efortului, între cele două expuneri.



Fotografia 13

13. Rezultatul eliminării franjei parazite din imaginea primară a interferogramei holografice cu metoda de Moiré electronic generat.

Franja vizibilă, un segment de cerc, observat o deplasare pe direcția de vizare (flautaj).

Mărimea deformării $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ m (metoda ZF)

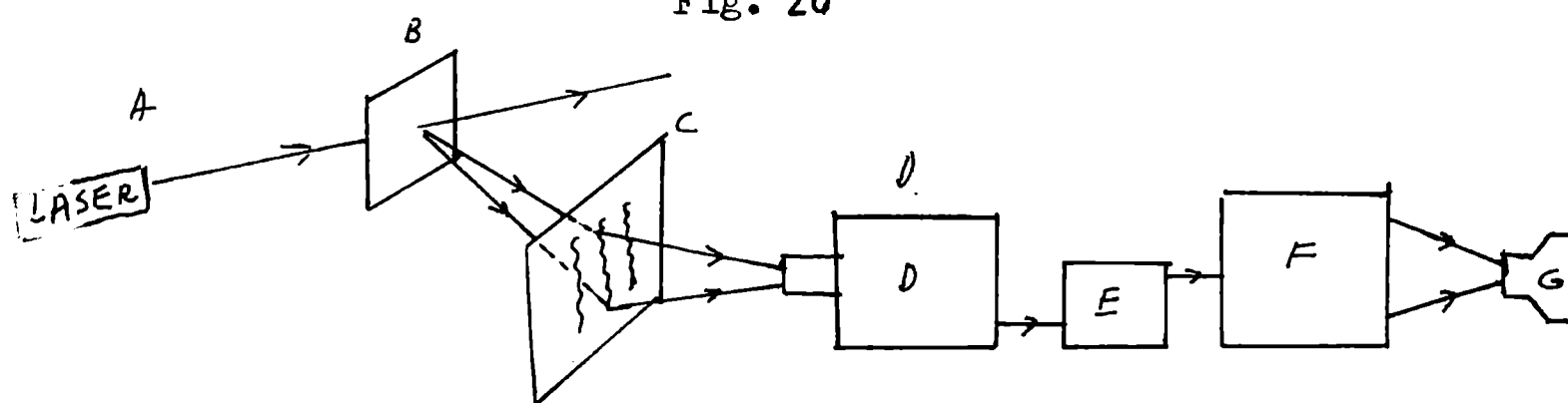


Variația înclinării rețelei electronice, are rezultate asemănătoare, fiind practic mai dificil de realizat (reglaje multiple corelate), dar strict necesară.

Variind succesiv frecvența și înclinarea spre a obține o configurație cât mai stabilă, tip "vale", am obținut în cazul nostru transformarea familiilor de conice în cercuri concentrice, fotografia 13, interpretarea lor fiind dată mai sus.

4.1.3.b. Imagini conjugate (reale) de interferograme holografie

Fig. 20



Montajul experimental arătat în fig. 20 conține: A laser de 50 mW, B hologramă, C ecran transparent de calc pe care se formează imaginea conjugată (reală), D cameră TV, E bloc electronic, F monitor TV, G aparat fotografic.

Holograma B a fost obținută prin IHDE efectuată unui corp paralelipipedic supus la un efort (presiune).

Preluarea imaginii conjugate (reale) formată pe ecranul transparent (calc) a fost prin transmisie.

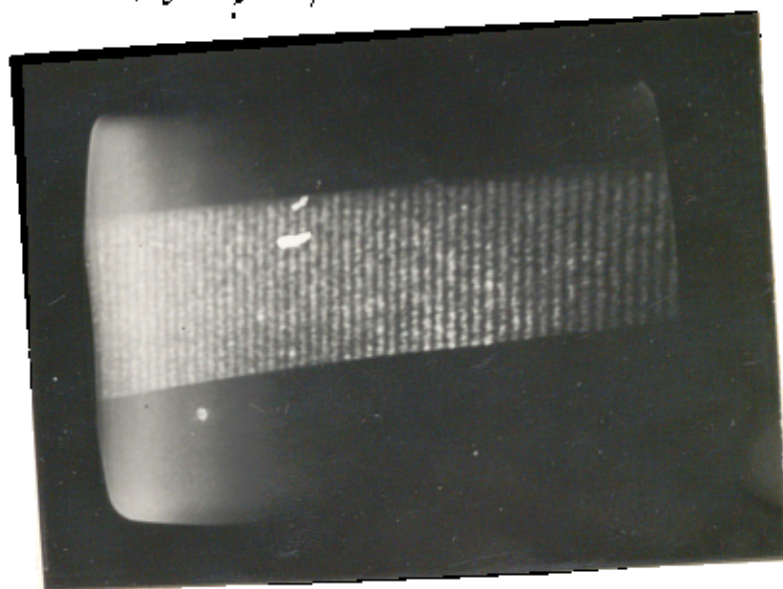
Problema luminozității neuniforme, greu de înlăturat la imaginile primare, a fost rezolvată mult mai ușor, prin înclinarea diferită a planelor hologramei, ecranului și camerei.

Urmărirea din diverse unghiuri a imaginii a fost posibilă schimbând unghiul fasciculului de citire față de planul hologramei (variație comod de efectuat într-un plan orizontal).

Fotografia 14

14. Imaginea conjugată (reală) a unei I.H.O.F. efectuată unui paralelipiped metallic presat.

Fraujele vizibile sînt rezultatul unei microrotații paravite a paralelipipedului între cele două expuneri



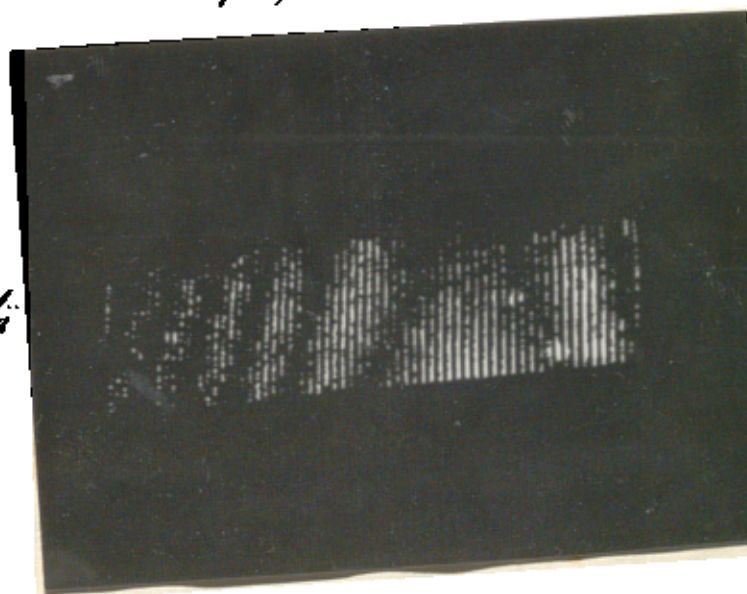
Fotografia 15

15. Rezultatul eliminării fraujilor paravite din imaginea conjugată a interferogrammei holografice cu metoda de Moiré generat electronic. Fraujile aparute (segmente de cerc) datorită deformarea (flambaj) pe direcția de vizare. Interfrunză $\sim 3 \cdot 10^{-2} \mu$ (metoda ZF)



Fotografia 16

16. Etapă intermediară de lucru în eliminarea fraujilor paravite. Frecvențele spațiale și înclinările înegale produc familia de cruce.



Vizualizarea diverselor planuri (în profunzime) s-a făcut mutînd ecranul de calc pe direcția de emergență a fasciculului difractat de hologramă.

De remarcat protejarea tubului vidicon, față de fasciculul nedifractat $Co(Oo^2 + Ro^2)$ foarte intens, de ecranul de calc, protecție utilă în timpul manevrelor de punere la punct a diverselor imagini, față de intrarea nedorită a fasciculului laser intens în obiectivul camerei (urmată de deteriorarea tubului).

Una dintre imaginile hologramei B obținută pe ecranul monitorului TV în condițiile de mai sus este prezentată în fotografia 14. Se remarcă, prin comparație cu fotografia 12, contururile mai bine definite ale franjelor precum și luminozitatea lor mult mai uniformă (partea luminoasă din stînga ecranului se datorează particularităților sistemului electronic și poate fi înlăturată fără multe complicații).

Franjele dese, paralele echiidistante, localizate pe imagine, sînt datorate unei înclinări accidentale mici (sub un grad) și fac imposibilă observarea oricărui alt sistem de franje.

Pentru înlăturarea lor am procedat similar cazului discutat în 4.1.3.a. s.4.

În afară de reglajele electronice efectuate (destul de groiere, instalația electronică fiind proiectată anterior experimentelor și urmînd a fi ulterior îmbunătățită după necesități) am avut la dispoziție și următoarele reglaje ale părții optice, mult mai fine:

Modificarea frecvenței franjelor, prin deplasarea înainte-înapoi a camerei TV față de ecranul de calc (camera a fost instalată pe un trepied);

Modificarea înclinării franjelor, prin rotirea camerei în jurul axului optic propriu (configurația de lucru permitea și

această manevră).-

Schimbarea foarte fină a fazei rețelei de franje, prin deplasarea laterală dreapta-stînga a camerei T.V.

Structurile de franje, ce apăreau la diverse variații ale parametrilor celor două rețele, erau familii de conice (vezi fotografia 16).

Căutînd din nou obținerea condițiilor de "ștergere" a franjelor parazite, respectiv frecvență, înclinare, fază și factor de umplere riguros egale, am obținut sistemul de franje utile din fotografia 15.

Cu toate că la prima vedere par a fi drepte paralele, sînt segmente de cercuri concentrice, cercuri a căror rază depășește mult dimensiunile figurii.

Interpretarea lor se face ca și în paragraful 4.1.3.a., respectiv paralelipipedul presat (pe dimensiunea cea mai mare) a flambat, cercurile definind curbele de egală deplasare (diferența de deformare între două frabje succesive fiind $\sim 3 \cdot 10^{-7} \text{m}$).

Recomandăm această ultimă metodă de eliminare a franjelor parazite prin metoda Moiré ca fiind cea mai ușor de folosit și cu rezultatele cele mai bune.

Ca mențiuni, în tot cursul experimentelor am neglijat distorsiunile produse de:

- 1) Hologramă;
- 2) Formarea imaginilor tridimensionale holografice
- 3) Formarea imaginilor de camera TV (ondulații ale hîrtiei fotografice, ondulații ale ecranului de calc).

- 4) Formarea imaginilor pe monitorul TV (neliniaritățile tubului cinescop și distorsiunile de liniaritate verticală, orizontală) ca fiind cu un efect perturbator de ordine de mărime mai mic decît efectul util.

CAPITOLUL 5

C O N C L U Z I I

Controlul nedistructiv al diverselor componente de instalații precum și al instalațiilor a devenit o necesitate a stadiului actual de dezvoltare a industriei și economiei în general.

Controlul holografic nedestructiv este o nouă metodă, cu rezultate excepționale în majoritatea domeniilor în care poate fi aplicată. Apariția relativ recentă (mai puțin de un deceniu) impune cercetărilor în acest domeniu un ritm foarte rapid, pentru a realiza tehnologii, metode, instalații aplicabile în industrie sau alte domenii.

Interferometria holografică este procedeul practic de la care au plecat metodele de control nedistructiv.

Derivată din interferometria optică (și aceasta cu rezultate excepționale în domeniul măsurărilor), ca o îmbunătățire fundamentală a ei, interferometria holografică este deasemeni un domeniu nou de studiu, cu numeroase probleme nerezolvate încă.

Astfel, informațiile stocate pe o hologramă, obținută să presupunem prin interferometria holografică cu dublă expunere, pot fi total acoperite de efectul perturbator accidental sau inevitabil al unei mișcări nedorite a uneia din componentele montajului. În aceste condiții, pentru a putea avea o interferogramă care să prezinte numai informațiile dorite, utile, trebuie sau să eliminăm toate fenomenele perturbatoare ce apar precum și toate mișcările relative ale diverselor componente ale sistemului optic, sau să găsim un procedeu de eliminare a efectelor perturbațiilor pe holograme.

././.

Cum prima alternativă impune condiții de lucru foarte severe, de cele mai multe ori practic irealizabile, se încearcă cealaltă cale, respectiv eliminarea franjelor parazite din figurile de interferență realizate prin interferometrie holografică.

Considerînd figura de interferență ca rezultatul modulării rețelei de franje parazite de către rețeaua de franje utile, am încercat să demodulăm această figură, extrăgînd printr-un procedeu de Moiré rețeaua de franje utile.

Spre deosebire de tehnicile tradiționale de Moiré, presupunînd un mare număr de rețele desenate, trasate, fotografiate etc., care să acopere domeniile de frecvențe spațiale, factori de umplere necesari, am folosit o nouă tehnică, neexperimentată pînă acum, de generare electronică a rețelelor necesare.

Diversele etape ale experimentelor, descrise în capitolul 4, au confirmat pe rînd producerea fenomenului Moiré cu rețea generată electronic, posibilitatea demodulării figurilor de interferență prin această nouă metodă de Moiré, posibilitățile foarte variate de aplicare a metodei (fotografii de interferograme holografice, imagini primare virtuale tridimensionale ale interferogramelor holografice, imagini conjugate reale bidimensionale ale interferogramelor holografice).

Versatilitatea metodei este datorată multiplelor posibilități de reglare oferite atît de componentele electronice (camera TV, monitor TV, bloc electronic de generare rețele și mixaj) cît și de componentele optice (montaj holografic, obiective cameră TV, posibilități de modificare a diverselor unghiuri între componente) precum și de posibilitățile de aplicare în numeroase domenii ale interferometriei holografice.

Rezultatele experimentale obținute (în fotografiile prezentate în lucrare sînt arătate numai cîteva dintre ele) au permis

interpretarea comportării unor ~~corpuri~~ cu sau fără concentratori de eforturi în condiții de funcționare sau solicitare cu eforturi adecvate, comportare a cărei cunoaștere este necesară controlului nedestructiv.

Comparînd rezultatele obținute fie cu cele ale altor metode de eliminare a franjelor parazite, fie cu montajele în care nu apar fenomene perturbatoare, constatăm o superioritate a acestei noi metode în ceea ce privește posibilitățile ei de aplicare, ușurința de mînuire, prețul de cost, timpul afectat experimentelor (controlului), protecția personalului de fasciculul laser, superioritate ce o recomandă pentru aplicare în practică.

Toate experimentele fiind făcute în laboratoarele de holo-grafie ale I.F.T.A.R. cu aparatele și materialele existente acolo, țin să mulțumesc încă o dată pentru amabilitatea și îndrumarea competentă acordată de șeful acestor laboratoare, doctor V.I.Vlad.

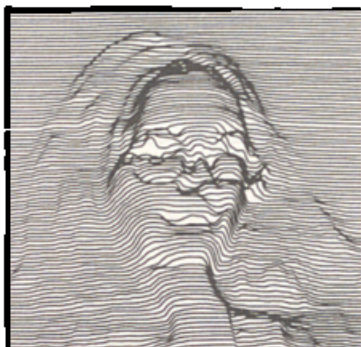
B I B L I O G R A F I E

1. M. Born, E. Wolf - Principles of optics, Pergamon, Oxford 1974.
2. D. - 54, 1949.
3. E.N. Levan, -
4. V.I. Vlad, - Introducere în holografie, Edit. Acad., București, 1973.
5. V.I. Vlad, R. Zăciu, N. Miron, I. Maurer, D. Sporea, - Prelucrarea optică a informației, Edit. Acad., București 1976.
6. V.I. Vlad, - Raport anual T.H.N.D., contract I.F.A., Intreprinderea de pompe, București, 1976.
7. V.I. Vlad, - Controlul holografic nedestructiv, Primul simpozion național de tensometrie, Iași, 1977.
8. V.I. Vlad, - Proiectarea și calibrarea vibratorilor electromecanici utilizând I.H. și D.O.H., Primul simpozion național de tensometrie, Iași, 1977.
9. V.I. Vlad, R. Zăciu, V. Căpățînă, D. Axinte, - Eliminarea franjelor produse de mișcarea solidului rigid în interferometria holografică prin generarea electronică a franjelor Moiré, în Lucr. ses. șt. "Progresele fizicii", București 14-15 iunie 1979.
10. R.I. Collier, C.B. Burckhardt, L.H. Lin, - Optical Holography, Academic Press, New-York, 1971.
11. I. Ch. Viénot, - Holographie optique, Développements, Applications, Dunod 1971.
12. H.M. Smith, - Principles of holography, Willey, New-York, 1969.
13. G.W. Stroke, - An introduction to coherent optics and holography, Academic Press, New-York, 1969.

.//.

4. I.W.Goodman, - Introduction to Fourier optics, Mc Graw Hill, 1968.
5. A.Papoulis, - Systeme and Transforms with Applications in Optics, Mc. Graw Hill, New-York,1968.
6. G.Cartianu, - Modulația de frecvență, Edit.Acad., București 1966.
7. A.I.Durelli, V.I.Parks, - Moiré fringes at parametric *curves*, Experimental Mechanics, Nr.3, 1977.
8. D.R.Mocanu, - Fenomenul Moiré și aplicațiile lui în tensometrie, Edit.Tehn., București 1978.
9. N.Abramson, - In D.Casasent, Ed.,Optical data processing Springer Verlag, Berlin 1978.
10. K. Piwernetz, - Optica acta, 24, No.3, 201,1977
11. R.K.Erf., - Holographic Nondestructive Testing, Academic Press, New-York, 1974.

REDUCE VIDEO DATA

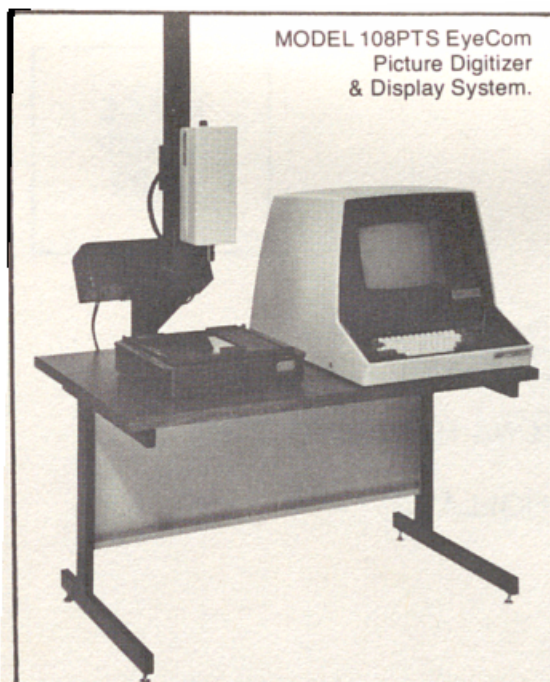


The TV camera is a versatile data acquisition instrument that can generate the equivalent of 100 million bits of information per second.

The CVI Model 321 Video Analyzer reduces video data quickly and economically. Sampled waveforms are displayed directly on a TV monitor and low frequency video signals are made available for external A/D conversion. Movable cross-hairs provide X-Y coordinate signals, and a point sampling output operates with a standard X-Y plotter for precise signal analysis, line-selectable, for permanent, low-cost file copy, as pictured here.

The 321 may be used for many diverse operations. Mail this card for specifications and applications notes.

Name & Title _____
 Dept. _____ Mail Stop _____
 Company _____
 Address _____ P.O. Box _____
 City _____ State _____ Zip _____



MODEL 108PTS EyeCom
 Picture Digitizer
 & Display System.

IMAGE PROCESSING & ENHANCEMENT

X-ray images or any image can be computer processed to sharpen and define large or small areas.

Fast, accurate image analysis for
**SCIENCE, PHOTOGRAPHY, GEOLOGY,
 BIOLOGY, RADIOLOGY, METALLURGY,
 ASTRONOMY, GEOGRAPHY & many others.**

Fill in and mail for complete information.

Name/Title _____
 Company _____
 Address _____
 City _____
 Country _____

SPATIAL DATA SYSTEMS, INC.

PLACE
STAMP
HERE

Optical Spectra®

C/O KLM PUBLICATIONS HANDLING DEPT.
P.O. BOX 75200
1117 ZT SCHIPHOL, HOLLAND

OPC 10/79

PLACE
STAMP
HERE

Optical Spectra®

C/O KLM PUBLICATIONS HANDLING DEPT.
P.O. BOX 75200
1117 ZT SCHIPHOL, HOLLAND

OPC 6/79

①

Eliminarea franjelor parazite din I.H. prin-o metoda de Moiré generată electronic.

- Introducere -

Apariția franjelor parazite în I.H. este nedorită, interpretarea fenomenului studiat fiind dificilă, dacă nu chiar imposibilă.

Fenomenele perturbatoare ce produc franje parazite pot fi înlăturate doar în unele situații, și atunci cu un hardware optic complex dublat de experimente sugzite.

În aceste condiții rămânând ca ultimă alternativă eliminarea franjelor parazite. Au fost propuse diverse metode, impunându-se cele care obțin rezultatul dorit cu minimum de complexitate, de timp, de pier.

Printre acestea, metoda de Moiré clasică care prin oleagolizarea rețelei de franje utile și parazite, obține rețeaua de franje utile. Dezavantajele metodei: numărul mare de rețele (desenate, gravate, fotografate, etc.) necesare, timpul consumat pentru a ajunge la rezultatul dorit.

În lucrarea de față va fi prezentată o nouă metodă de Moiré care are mai are dezavantajele celor clasice, rețelele fiind generate electronic într-o gamă largă de variație a parametrilor lor și timpul consumat pentru obținerea rezultatului dorit fiind mai mic.

- Teorie -

1. Moiré obținut prin interferență geometrică (mecanică).

Fenomenul Moiré este produs prin suprapunerea a două rețele de curbe (1) $F_1(x,y) = K_1$ și $F_2(x,y) = K_2$ și constă în apariția încă două rețele de curbe (2) $M_1(x,y) = F_1(x,y) - F_2(x,y) = K_1 - K_2 = M_1$ și $M_2(x,y) = F_1(x,y) + F_2(x,y) = K_1 + K_2 = M_2$, rețele descrise doar prin punctele de intersecție ale F_1 cu F_2 . Datorită proprietăților fiziologice ale vederii umane (urmărirea preferențială a frecvențelor spațiale mari) doar una din rețelele M_1, M_2 va fi vizibilă, respectiv cea pentru care interferința (frecvența spațială) este mai mică. Concret, avem frecvențele rețetelor F_1 și F_2

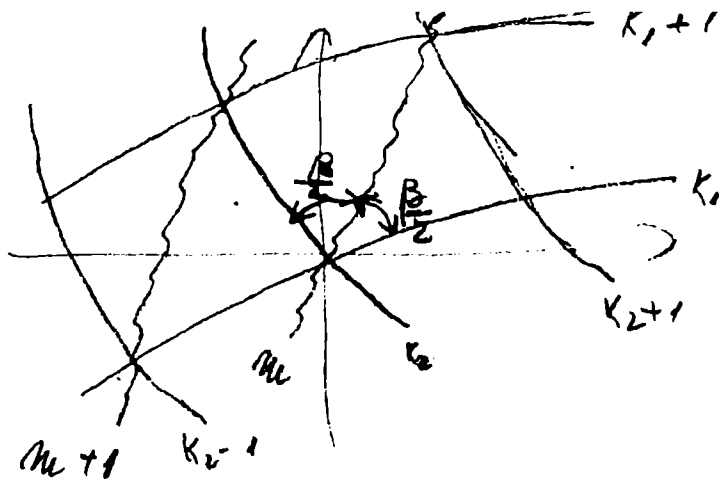
$$(3) \quad f_1^F = \left[\left(\frac{\partial F_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_1}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{și} \quad f_2^F = \left[\left(\frac{\partial F_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_2}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

de unde pentru frecvențele rețetelor M_1 și M_2 obținem cu (2):

$$(4) \quad f_1^M = \left[\left(\frac{\partial F_1}{\partial x} - \frac{\partial F_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_1}{\partial y} - \frac{\partial F_2}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{și} \quad f_2^M = \left[\left(\frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_1}{\partial y} + \frac{\partial F_2}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

②

Fig. 1

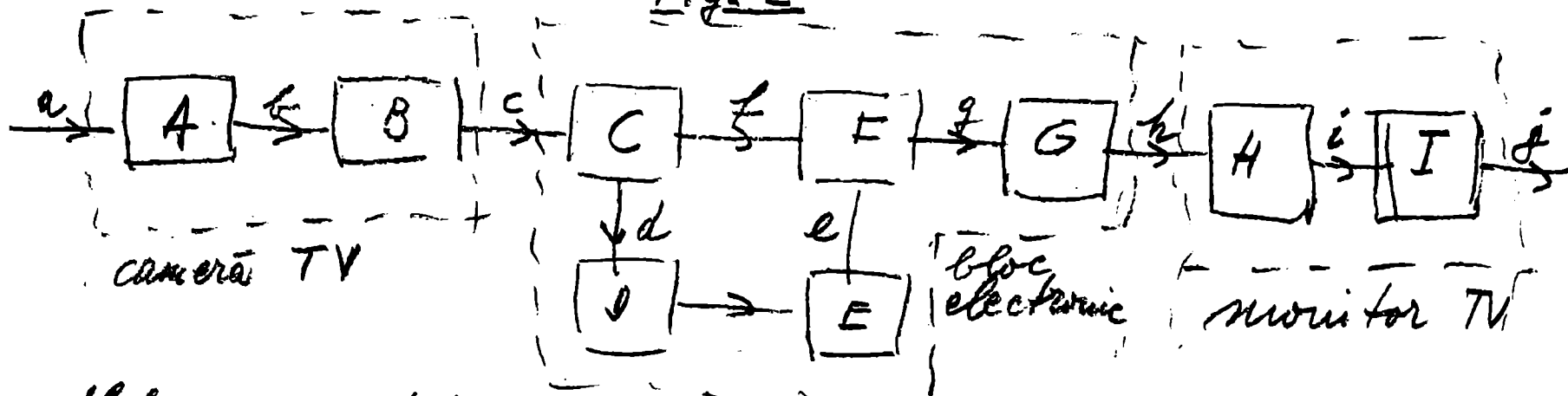


Ținând cont de (vezi fig. 1) (5) $\lg B_2 = \frac{\frac{\partial F_1}{\partial y}}{\frac{\partial F_2}{\partial y}}$ obținem din (3) și (4)

(6) $f_{12}^M = \left[(f_1^F)^2 + (f_2^F)^2 + f_1^F f_2^F \cos B_2 \right]^{\frac{1}{2}}$, relație ce explică în mod analitic dependența rețelei M_1 sau M_2 de rețelele F_1 și F_2 .

2. Înlocuirea interferenței geometrice cu mixaj electronic.

Fig. 2



Schema prezentată în fig. 2. are următoarele blocuri funcționale:

A traductor opto-electric; B traductor electric 20-electronic 1T;
C amplificator liniar; D filtru externe semnal sincronizare;
E generator semnal electronic; F mixer electronic; G amplificator liniar;
H traductor electronic 1T electric 20; I traductor electric 20-optic 20.

Conexiunile între blocuri sunt codate astfel:

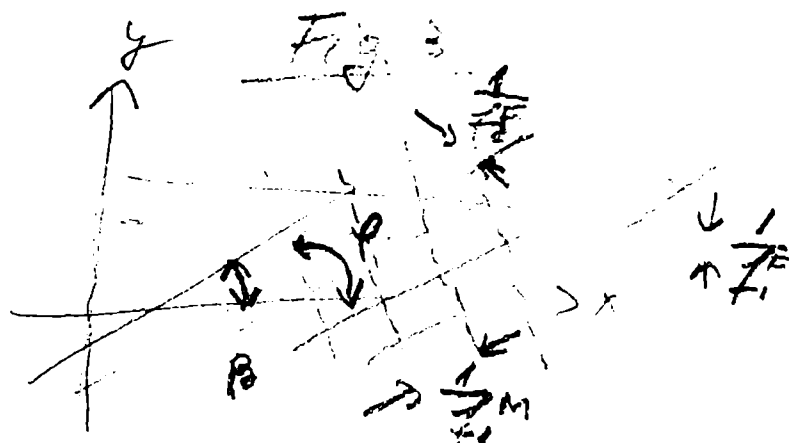
a optic 20; b electric 20; c, d, e, f, g, h, electronic 1T, i electric 20, j optic 20

Interferența între semnalele optice 20 codate de rețelele F_1 și F_2 este înlocuită cu mixajul semnalelor electronice 1T codate de rețeaua F_1 (după transformarea optic 20 electronic 1T) respectiv de blocul E!

3. Eliminarea franjei parazite, condiții teoretice

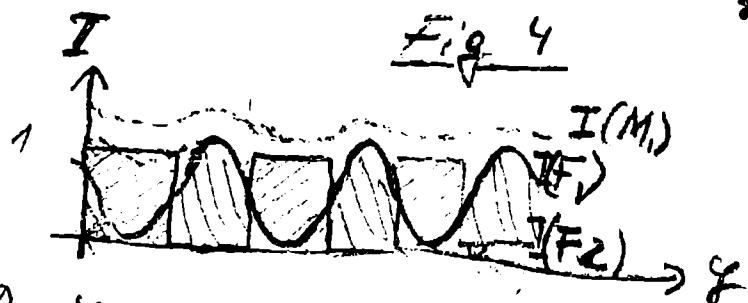
Maioritatea mișcărilor parazite ale componentelor montajului holografic (translația în plan normală pe linia de vizare, înclinarea, rotația în plan precum și combinații ale lor) produc franje parazite echidistante

③



Fie rețeaua de franje parase (7) $K_1 = F_1(x, y) = f_1^F y$
 și rețeaua generată electronic (8) $K_2 = F_2(x, y) = f_2^F (y \cos \beta - x \sin \beta)$
 Frajele Moiré vor fi (9) $M_1 = M_1(x, y) = f_1^F y - f_2^F (y \cos \beta - x \sin \beta)$
 dreptele paralele înclinate la (10) $\varphi = \arctg \frac{f_2 \sin \beta}{f_1 - f_2 \cos \beta}$

Pentru $f_1^F = f_2^F = f$ avem (11) $\varphi = \frac{\pi - \beta}{2}$ și $f_1^M = 2f \sin \frac{\beta}{2}$
 La $\beta \rightarrow 0$ (11) deci $\sin \frac{\beta}{2} \rightarrow \frac{\beta}{2}$ și $f_1^M \rightarrow 0$

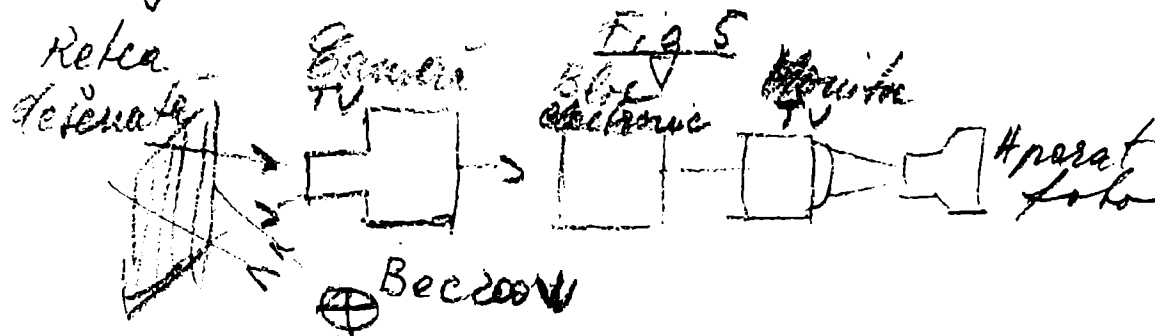


Pentru $\begin{cases} f_1^F = f_2^F = f \\ \beta \rightarrow 0 \end{cases}$ (13)

Dacă avem (12) înlocuim "stergerea" F_2 se produce (Fig 4)
 pentru factor de umplere $[I(F_1), I(F_2)]$ cât mai apropiați
 și fază decalată cu $\frac{\pi}{2}$.
 Pe fondul aproximativ uniform iluminat vor apărea
 franje colorate $F_3(x, y)$.

Experimental

1. Verificarea echivalenței interferenței geometrice cu
 mixaj electronic.



Am folosit ca rețea preluată optic o rețea de dreptele
 echidistante desenate pe hârtie. Blocul electronic
 permite reglaj în mărimea F_1 cu F_2 : Raportul amplitudinilor
 frecvență F_2 , înclinare (β) F_2 , factor de umplere F_2 , fază F_2 .

⑨ b) Eliminarea fraujilor parazite de pe imaginile primare (virtuale) ale interferogramelor holografice.

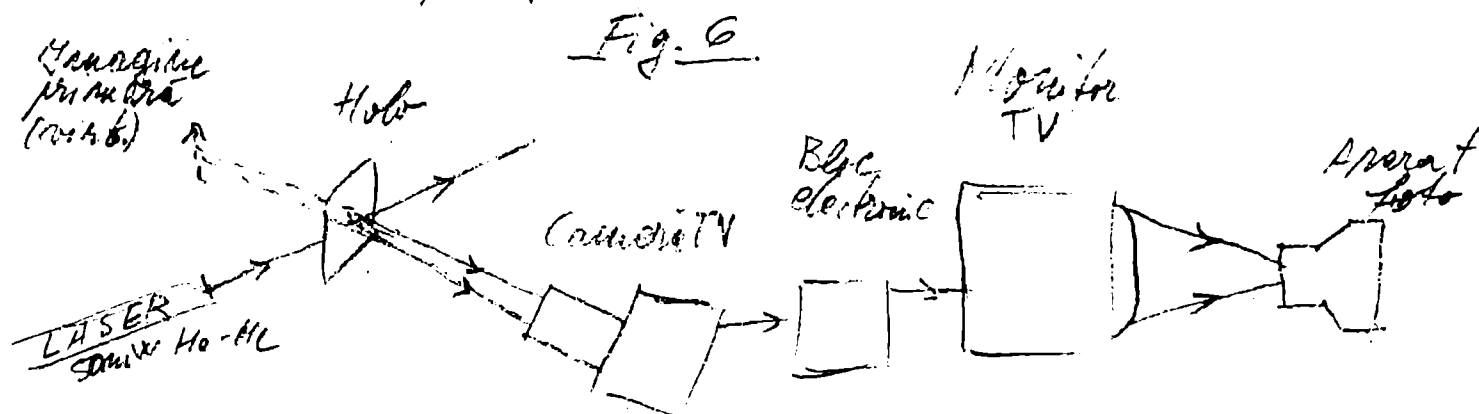


Foto 10 prezintă imaginea primară (virtuală) a unei HDE făcută unui paralelipiped metallic compact supus la presiune.

(Foto 11 prezintă rezultatul eliminării fraujilor parazite din HDE. Segmentele de cerc vizibile descriu punctele de egală deformare pe direcție de vizare, interferanță $\sim 3 \cdot 10^{-7} \text{m}$. Paralelipipedul se comprimă pe direcție de aplicare a presiunii și flambază pe direcțiile perpendiculare pe aceasta.

c) Eliminarea fraujilor parazite de pe imaginile conjugate (reale) ale interferogramelor holografice

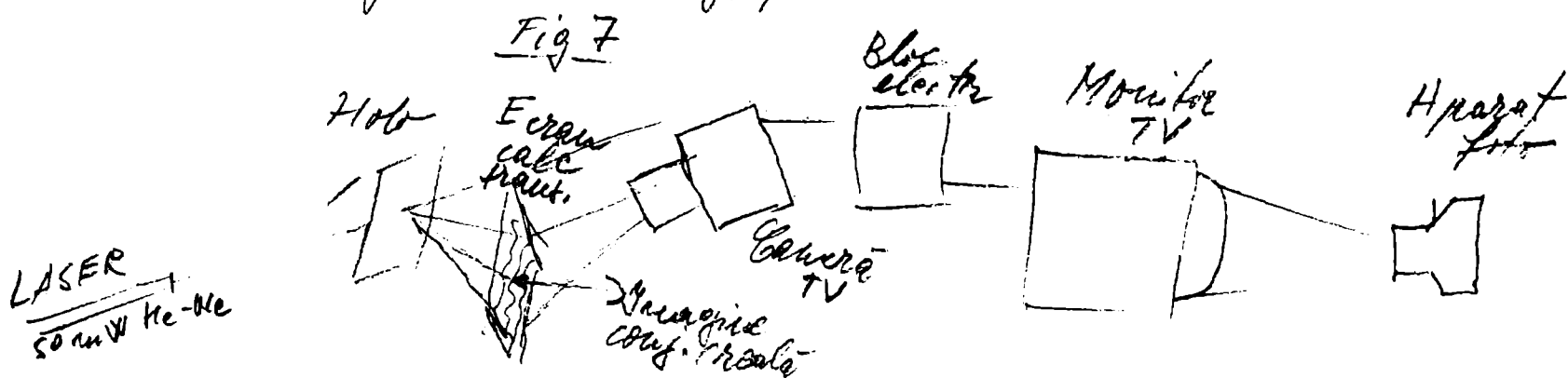


Foto 12 prezintă imaginea conj. (reală) a unei HDE făcută unui paralelipiped metallic compact supus la presiune. Fraujile parazite vizibile se datorază unei mișcări parazite apărute între expuneri.

Foto 13 prezintă...

Mențiuni: În aprecierea rezultatelor am neglijat, ca fiind în ordine de mărime mai mici față de rezultatele utile, distorsiunile optice (hîrtie foto, plăci holografice, imagini intermediare, obiective TV, foto) și distorsiunile electronice (cameră TV, monitor TV, bloc electronic).

5) Acele reglaje posibile electronice: contrast camera TV, monitor TV
Reglaje optice: iluminare (intensitate F_0), obiective interstidim
babile (frecvență F_1), posibilități de deplasare camera TV
(frecvență F_2 , înclinare F_3 , fază F_4).

Rezultatele obținute (foto 1) confirmă echivalența
interferenței optice cu mixaj electronic.

2. Verificarea corectitudinii metodei prin compararea rezultatelor
obținute cu cele ale altor metode.

Foto 2 prezintă IHDE făcută unei rețele de solite
la mecanic. Sistemul de franje vizibile este datorat
unei rotații medii mici ($\sim 90^\circ$), apărute după expuneri.

Foto 3 prezintă rezultatul eliminării franjelor parazite
prin metoda de Moiré clasică.

Foto 4 prezintă rezultatul eliminării franjelor parazite
prin metoda prezentată anterior. Diferențele între rezultate
se datoresc rezoluția diferite (foto 3 de pe hologramă,
foto 4 de pe foto 2) și procedeele diferite (foto 3 tricromă,
foto 4 monocromă).

Foto 5 prezintă IHDE făcută unei matrii moarte în regim
de funcționare. Sist. de franje vizibile este datorat unei
microdeformații medii mici apărute după expuneri.

Foto 6 prezintă rezultatul eliminării franjelor parazite
prin metoda sandwich.

Foto 7 prezintă rez. eliminării franj. par. prin Moiré elect.

3. Posibilități de aplicare, rezultate.

a) Eliminarea franjelor parazite de pe fotografii făcute
interferogramelor holografice.

Cu montajul prezentat în fig. 5 am preluat imaginea
unei IHDE făcute unui corp de pompă supus la presiune (foto 8).

După eliminarea franjelor parazite am obținut foto 9.

Franjele vizibile în centrul foto 9 sînt linii de egale
deformare pe direcția de vizare, interfranjă $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ m (ZF).

Punctele de discontinuitate a derivatei franjelor corespund
concentrațiilor de efort de pe suprafața corpului de pompă.

Concluzii

Metoda de eliminare a fr. par. din I.H. cu Moiré gen. electr. poate fi aplicată: fotografia după I.H.; imaginilor pr (virt.) asamblate I.H. (echivalentul unei I.H. cu o muchitudine de interferogramă) recomandăm folosirea imaginilor pr. și conj. pentru lucru. Protecție suplimentară (cameră TV și experimentator în conj. precum și condiții de lucru mai bune.

Versatilitatea remarcabilă a metodei este asigurată de posibilitățile de aplicare enumerate precum și de limitele largi de variație a: parametrilor rețelei de frangi de pe holo-gramă (partea optică a montajului); cu posibilitate de libertate în mișcarea față de imaginea oferită de holo sau foto); parametrilor rețelei de frangi generată electronic (partea electronică a montajului și bloc electronic generând diverse rețele, cameră TV, monitor TV).

Comparativ cu alte metode de obținere a I.H. (cele care elimină mișcările parazite sau cele care elimină frangiile parazite) care să nu conțină efecte parazite, cea propusă mai sus este mai puțin complicată, mai rapidă și etc. etc.

REFERAT

asupra lucrării de diplomă a absolventului Axuțe Vasile-Doru
"Control nedistructiv holografic. Eliminarea frauzelor parazite
din I.H. printr-o metodă de Moiré generat electronic".

Lucrarea de diplomă a tov. Axuțe conține rezultatele
obținute în activitatea deșă la IFTR-S. Laseni, Colectivul
Holografie, în tot anul universitar 1978/79. După o documentare
temeinică în probleme de holografie, control holografic nedistructiv
și tehnici Moiré, autorul a abordat problema de primă importanță
a eliminării frauzelor parazite din I.H.

Lucrând cu o aparatură pusă la punct aută, tov. Axuțe a evidențiat atât posibilitățile ei remarcabile,
cât și o serie de îmbunătățiri care ar trebui să se aducă
pentru o operă mai simplă și mai precisă.

Experimentele de eliminare a frauzelor parazite
din I.H. prin metoda de Moiré generat electronic (propusă de noi)
au fost efectuate pentru:

- rețele simple;
- fotografii de interferogramă holografice;
- imagini produse de I.H. (virtuale și reale);

Lucrarea de diplomă este realizată în grijă, conținând
principalele rezultate experimentale obținute, schemele de principii
ale montajelor realizate, interpretarea rezultatelor și comentarii
interesante.

Rezultatele obținute de tov. Axuțe Doru au fost încheșe
într-o lucrare științifică, care va fi prezentată la Simp. "Progrese
fizice" (Hâgureli, 21.06.79) și publicată într-o revistă de prestigio.
Ele servesc și la îmbunătățirea aparatului de control nedistructiv
industrial prin metode holografice, care se realizează în IFTR.

Ca urmare a considerațiilor expuse, suntem de
părere că lucrarea de diplomă a tov. Axuțe este realizată la
un nivel ridicat, dovedind calitățile autorului de competență,
precizie și perseverență. Propunem acordarea calificativului „bun”.

12.06.79



INSTITUTUL DE
FIZICA ATOMICA
BUCURESTI