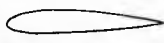
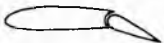



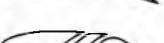




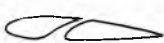
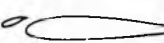







RAZLIČITI UREĐAJI ZA STVARANJE HIPERPOTISKA

Uređaj za hiperpotisak	Povećanje uzgona, %	Kritični kut	Napomena	Shema uređaja
Osnovni aeroprofil		15°	Učinak uređaja za hiperpotisak ovisi o obliku aeroprofila	
Krilce krivine	50	12°	Hiperpotisak zbog povećanja krivine aeroprofila	
Potkrilce	60	14°	Hiperpotisak zbog povećanja krivine, ali se povećava i otpor	
Potkrilce Zap	90	13°	Hiperpotisak zbog povećanja krivine i povećane površine	
Krilce s procijepom	65	16°	Hiperpotisak zbog povećanja krivine i upravljanja graničnim slojem	
Krilce s dvostrukim procijepom	70	18°	Mijenja se krivina uz uvođenje kinetičke energije na gornjaku	
Zakrilce Fowler	90	15°	Povećava se krivina i površina uz upravljanje graničnim slojem	
Dvostruko zakrilce Fowler	100	20°	Isto kao i u prethodnom slučaju, ali sa složenijim uređajem	
Pretkrilce Krueger	50	25°	Nosno pretkrilce povećava krivinu i površinu	
Krilo s procijepom	40	20°	Upravljanje graničnim slojem na gornjaci	
Fiksno pretkrilce	50	20°	Upravljanje graničnim slojem na gornjaci	
Pokretno pretkrilce	60	22°	Mijenja se krivina i kontrolira otcjepljenje strujnica	
Pretkrilce i krilce s procijepom	75	25°	Povećava se krivina i kontrolira strujanje na gornjaci	
Pretkrilce i dvostruka zakrilca Fowler	120	28°	Iskorišteni svi faktori	
Pokretna napadna ivica, kočnica i dvostruko zakrilce			Povećava se znatno krivina i otpor s kočnicom	
Uvođenje energije mlaza na gornjaku profila			Sustav Coanda, krilo s dvostrukim zakrilcem	
Uvođenje energije mlaza na donjaku profila			Krilo s dvostrukim zakrilcima	

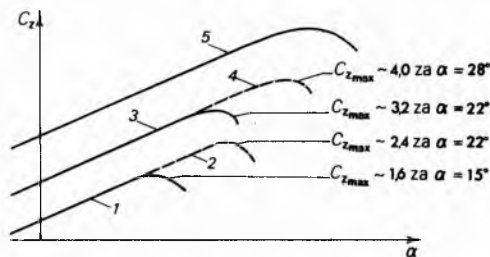
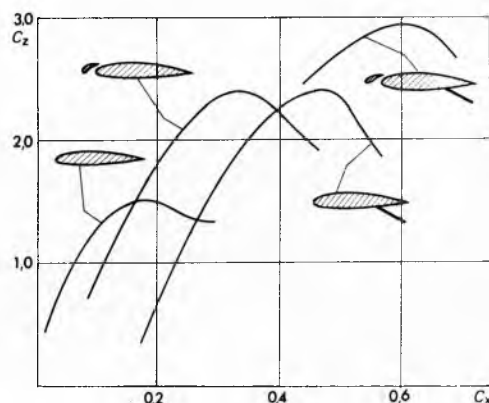


Sl. 19. Transportni avion NASA/DHC-8 Buffalo s uređajem za uvođenje energije ispušnih plinova na donjaku krila

tangencijalno uz neku površinu, prijanja uz površinu i dalje struji priljubljen uz nju (v. *Fluidika*, TE5, str. 474).

Oba sistema služe za transportne zrakoplove velike nosivosti i ekstremno malih staza polijetanja i slijetanja.

Strujanje ispušnih plinova iza izlaznog presjeka mlaznice motora izvodi se tako da bi ono oplakivalo što veću površinu krila. Ako se radi o Coanda sistemu oplakivanja gornjake, onda se već na startu razvija znatan potpritisak koji djeluje na uvećanu površinu gornjake, obično na središnjem

Sl. 20. Krivulje $C_z = f(\alpha)$ za karakteristične uređaje hiperpotiska. 1 krilo s osnovnim profilom, 2 povećanje uzgona zbog utjecaja pretkrilaca, 3 utjecaj pretkrilaca, odnosno krilaca krivine ili zakrilaca, 4 utjecaj zakrilaca i pretkrilaca, 5 krilo uz iskorišćenje dodatne energije ispušnih plinova

Sl. 21. Polare karakterističnih uređaja hiperpotiska

dijelu krila. Zahvaljujući još i efektu krivine zbog dvostrukih zakrilaca, dobiva se još i kombinacija klasičnog hiperpotiska s okretanjem vektora vučne sile mlaznog motora nagore. Zapravo, ovim sistemom dobivaju se izuzetno povoljni efekti kombinacijom klasičnog hiperpotiska, dodatnog smanjenja pritiska na gornjaci (što uvećava uzgon) i okretanja smjera vektora vučne sile mlaznog motora (što također uvećava uzgon).

LIT.: M. Nenadović, Osnovi aerodinamičkih konstrukcija. Aeroprofil. Prvi deo. Naučna knjiga, Beograd 1948. — W. J. Duncan, Control and stability of aircraft. Cambridge 1952. — S. Milutinović, Konstrukcije aviona. Građevinska knjiga, Beograd 1970. — M. Шульженко, Конструкция самолётов. Машиностроение, Москва 1971. — А. Бадягин и др., Проектирование самолётов. Машиностроение, Москва 1972. — A. Kermode, Mechanics of flight, Pitman, Nairobi 1972.

M. Momirski

HOLOGRAFIJA ili postupak rekonstrukcije valne fronte optički je postupak koji je obrazložio engleski fizičar D. Gabor još 1948. godine (za što je 1971. dobio Nobelovu nagradu). Pravi je interes za ovu disciplinu nastupio mnogo kas-

nije, tek iza 1960. godine, kada su načinjeni visokokoherentni laserski svjetlosni izvori kakvi su potrebni za ostvarenje holografskog efekta. To je optičko zapisivanje informacija koje u potpunosti opisuju oblik, veličinu i boju promatranog objekta. Fenomen se zasniva na interferenciji dvaju svjetlosnih snopova, referentnog i objektnog snopa. Rezultat optičke interferencije zapisuje se na fotografskoj ploči; takav se zapis naziva hologram (*ἄλλος ὅλος sav, γράφειν grafein pisati*), i on je, zapravo, rezultat sveukupnog preslikavanja svih točaka objekta na sve točke ploče. U drugoj fazi, prosvjetljavanjem holograma pogodnim elektromagnetskim zračenjem, nastupa rekonstrukcija izvorne valne fronte, čime se zbog difrakcije svjetlosti preko holograma dobivaju virtualna i realna slika promatranog objekta, kao neka vrsta fotografije bez primjene leće.

Taj se postupak može u principu provoditi zračenjem ma koje valne duljine, od mikrovalova i infracrvenog zračenja, pa do rendgenskog i gama zračenja, pri čemu u fazama snimanja i rekonstrukcije holograma zračenja ne moraju biti istovjetna. Na primjer, snima se elektronskim valovima, a rekonstruira se vidljivim svjetlom.

Nagli razvoj laserske tehnike dao je veliki impuls razvoju holografije i usmjerio je na primjene u nizu raznorodnih disciplina (fizika, tehnika, medicina, informatika i dr.).

Idejno je holografija nastala na bazi dviju tehničkih disciplina, koherentne optike i radio-tehnike, odnosno teorije komunikacija, jer je poznato da se u optici izučava prolaz prostornih spektara i likova objekata kroz optički uređaj čime se ostvaruje linearna transformacija tih prostornih likova, a u elektrokommunikacijama se izučavaju zakoni prolaza vremenskih signala kroz elektroničke uređaje, gdje se djelovanjem odgovarajućih modulatora vremenski signali transformiraju nelinearno. U holografiji su oba ta aspekta zastupljena na naročit način, pa to daje široke mogućnosti za raznovrsne postupke i primjene.

D. Gabor je poslije prvog informativnog članka objavio još dva iscrpna rada gdje detaljno razrađuje teoriju fenomena rekonstrukcije valne fronte s aspekta potreba mikroskopije. Novi se autori javljaju tek 20 godina kasnije, među prvima Y. N. Denisjuk u Sovjetskom Savezu i grupa fizičara na sveučilištu u Ann Arboru (Michigan, SAD). Među njima prvi su E. Leith i J. Upatknies radili na usavršavanju Gaborovog tipa holografske aparature primjenjujući svjetlosne snopove koji pod različitim kutovima padaju na fotografsku ploču, pa su u nizu radova iznijeli kompletnu teoriju holografije i upozorili na mnoge mogućnosti primjena. Osim njih, fundamentalne doprinose dali su njihovih suradnici B. P. Hildebrand, K. A. Haines, A. Kozma, G. W. Stroke, zatim u Francuskoj J. Ch. Viñot sa suradnicima, kao i mnogi drugi. Primjenu holografske interferometrije, kao baze za veoma široke mogućnosti u holografiji, među prvima su razvili R. L. Powell i K. A. Stetson (SAD).

Široku primjenu našla je holografija u eksperimentalnom ispitivanju konstrukcija i materijala. Prve radove o primjeni holografije u fotoelastimetriji objavili su Fournay, Hovanessian, V. Brčić, R. L. Powell, J. Ch. Viñot, u analizi deformacija K. A. Haines i B. P. Hildebrand, a kasnije W. Schumann, C. A. Sciammarella i mnogi drugi, u analizi ravninskih i prostornih problema. Istodobno objavljeni su brojni radovi o primjenama holografije u različitim granama tehnike (strojarstvo, radio-tehnika, građevinarstvo) kao i u mnogim područjima medicine i fizike. U tim primjenama upotrebljavaju se različite varijante holografskih postupaka, među ostalim akustička i mikrovalna holografija, holografska interferometrija, nekoherentna holografija itd. Holografija je još i danas u veoma intenzivnom razvoju.

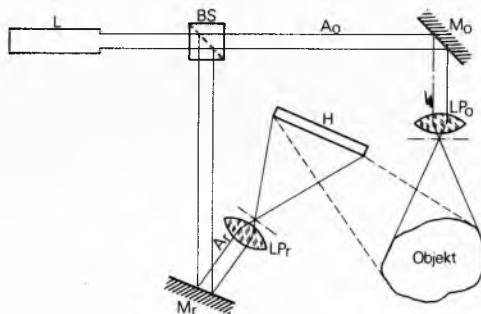
TEORETSKA OSNOVA HOLOGRAFIJE

Pojam holografije odnosi se na proces pomoću kojeg se snima modulacija *amplitude* i *faze* elektromagnetske valne fronte raspršene s promatranog objekta i interferirane s referentnom valnom frontom. Rezultat interferencije snima se na fotografskoj ploči kao optički zapis objekta, ostvarujući zapisivanje modulacija amplitude i faze. Kasnije, u bilo kom trenutku, može se prosvjetljavanjem holograma ostvariti rekonstrukcija izvorne valne fronte, čime se dobiva vjerna slika objekta. Da bi interferencija bila moguća, potrebno je da svjetlosni izvor bude visoko koherentan, kako je to, npr., kod lasera (koherentna svjetlost je strogo monokromatska svjetlost vremenski ustaljene frekvencije, s izrazito konvergentnim svjetlosnim snopom).

Svjetlosni snop je potpuno karakteriziran svojom kompleksnom amplitudom i fazom. Pri rekonstrukciji valne fronte ne smije se izgubiti ni amplituda ni faza, što se, npr., događa kod uobičajenog snimanja na fotografskoj ploči gdje se faza gubi, jer je fotografska emulzija osjetljiva samo na apsolutnu vrijednost amplitude svjetla. Poznato je, međutim, da je procesom

interferencije faza sačuvana (v. *Optika*), pa je to postupak koji se primjenjuje u holografiji.

Dva su bitna koraka holografskog procesa: *snimanje* i rekonstrukcija holograma. Snop koherentne laserske svjetlosti dijeli se razdvajanjem svjetla (sl. 1) na dva snopa koji se sustavom posebnih zrcala tako usmjeravaju da se na kraju sastaju na fotografskoj ploči. Pri tome jedan snop putuje direktno (*referentni snop*), a drugi preko objekta (*objektni snop*). Potrebno je da razlika optičkih putova tih dvaju snopova bude unutar duljine prostorne koherentnosti primijenjenog svjetla. Svjetlost pri tome prolazi kroz prostorne filtre, eventualno i kroz polarizatore, kako bi se sačuvala puna koherentnost i polariziranost. Na fotografskoj ploči formira se interferencijska slika obaju svjetlosnih snopova. To je difrakcijska mrežica modulirana informacijom dobivenom od objekta koji se snima. Ravan val koji dolazi od lasera djeluje kao neka vrsta nosača elektromagnetskog zračenja moduliranog signalom od objekta.



Sl. 1. Shematski prikaz snimanja holograma. L laser, BS razdvajач svjetla, A₀ objektni snop, A_r referentni snop, M₀ i M_r zrcala, LP₀ i LP_r kružni otvori i prostorni filtri, H holografska ploča

Holografska ploča je fotografska ploča sa specijalnom spektrografskom emulzijom (npr. Kodak 649F), sa svojstvom visoke moći razdvajanja. Nakon ekspozicije i fotografske obradbe hologram je na ploči fiksiran, a ima izgled neke naoko nepravilne mrlje. Zapravo, to je optički zapis objekta, podacima znatno bogatiji nego obična fotografija. Procesom interferencije svaka je točka objekta preslikana u sve točke ploče, tako da svaki, pa i veoma maleni dio holograma daje podatke o cijelom objektu (odatle naziv *holografija*, tj. sveukupno pisanje).

S gledišta optike hologram je interferogram. S gledišta komunikacija ili elektrotehnike procesom snimanja holograma ostvaruje se modulacija sadržaja kompleksne prostorne frekvencije objektnog snopa na referentnom snopu; ta se modulacija snima na fotografsku ploču.

Proces *rekonstrukcije* holograma ostvaruje se prosvjetljavanjem snimljenog holograma koherentnim snopom (obično laserskim svjetlom). Pri tom procesu hologram djeluje kao difrakcijska mrežica, pa se kao difrakcijske slike prvog reda dobivaju realna i virtualna slika objekta, uključujući njegov oblik, veličinu i boju. Visokofrekventna interferencijska slika holograma uzrokuje sistematsku difrakciju svjetla zbog koje se svjetlosne zrake tako pregrupiraju da daju sliku originalnog objekta. Za promatrača tako osvijetljena holografska ploča izgleda kao neki prozor kroz koji se vidi prostorna slika objekta.

Matematička analiza snimanja i rekonstrukcije holograma. Fenomen holografije nastaje zbog interferencije dvaju svjetlosnih snopova tako da se pri tome zapisuje modifikacija amplitude i faze objektnog snopa.

Ako za objektni i referentni snop vrijede izrazi

$$u(x, y) = a(x, y) \cdot e^{-i\varphi(x, y)} \quad (1a)$$

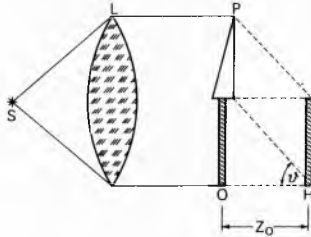
$$U(x, y) = A(x, y) \cdot e^{-i\psi(x, y)}, \quad (1b)$$

tada je intenzitet nakon interferencije

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |a(x, y) + A(x, y)|^2 = \\ &= |a(x, y)|^2 + |A(x, y)|^2 + a(x, y) \cdot A^*(x, y) + a^*(x, y) \cdot A(x, y) = \\ &= |a(x, y)|^2 + |A(x, y)|^2 + 2a(x, y) \cdot A(x, y) \cdot \cos[\psi(x, y) - \varphi(x, y)] \end{aligned} \quad (2)$$

(zvjezdicom su naznačene konjugirano kompleksne vrijednosti). Prva dva člana ovise o intenzitetu dvaju valova, a treći o razlici faza, tj. zapisana je informacija o amplitudi i fazi.

Taj se proces može ostvariti na više načina. Prema prvom, Gaborovom prijedlogu, obje valne fronte idu pod istim kutom prema holografskoj ploči, pri čemu mora objekt biti potpuno proziran. E. Leith i J. Upatknieš predložili su da u fazi snimanja postoji između oba snopa neki kut ϑ , i danas je njihov prijedlog za snimanje holograma najuobičajeniji u primjenama (sl. 2).



Sl. 2. Shema holografskog uređaja prema Leith-Upatkniešu. S izvor svjetla, L leća, P prizma, O objekt, H holografška ploča

Željeni kut između dva svjetlosna snopa dobiva se pomoću optičke prizme. Koeficijent propustljivosti objekta u odnosu na amplitudu svjetla jest $t_0(x_0, y_0)$. Ako je referentni snop ravan val, tj. $A(x, y) = A$, nakon interferencije dobiva se na ploči raspored amplituda

$$u(x, y) = A e^{-i2\pi\alpha y} + a(x, y), \quad (3)$$

gdje je prostorna frekvencija referentnog vala $\alpha = (\sin \vartheta)/\lambda$ (λ je valna duljina svjetlosti). Raspored je intenziteta na ploči

$$I(x, y) = A^2 + |a(x, y)|^2 + A \cdot a(x, y) e^{i2\pi\alpha y} + A \cdot a^*(x, y) e^{-i2\pi\alpha y}. \quad (4)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz (1a), dobiva se

$$I(x, y) = A^2 + a^2(x, y) + 2A \cdot a(x, y) \cdot \cos[2\pi\alpha y - \varphi(x, y)]. \quad (5)$$

Prema tome, amplituda i faza objektnog snopa zapisane su kao amplituda i fazna modulacija referentnog vala frekvencije α . Ako je ta frekvencija dovoljno visoka, može se iz holograma raspored amplituda i faza odrediti jednoznačno.

Rekonstrukcija valne fronte. Poslije uobičajene fotografske obradbe, ploča predstavlja dijapozitiv kome je amplitudni koeficijent propustljivosti proporcionalan ekspoziciji. Amplitudni je koeficijent propustljivosti ploče

$$t_r(x, y) = t_b + \beta'(|a|^2 + A a e^{i2\pi\alpha y} + A a^* e^{-i2\pi\alpha y}), \quad (6)$$

gdje je t_b konstanta propustljivosti uvjetovana samo referentnim snopom, a β' konstanta ovisna o optičkim svojstvima fotografske emulzije.

Ako je hologram okomito osvijetljen jednolikim ravnim valom B (sl. 3), polje vala može se nakon prolaska kroz hologram prikazati u obliku sume od četiri komponente

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4, \quad (7)$$

gdje je

$$U_1 = t_b \cdot B \quad (8a)$$

$$U_2 = \beta' \cdot B \cdot |a(x, y)|^2 \quad (8b)$$

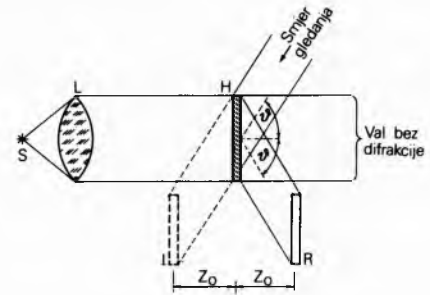
$$U_3 = \beta' \cdot B \cdot A \cdot a(x, y) e^{i2\pi\alpha y} \quad (8c)$$

$$U_4 = \beta' \cdot B \cdot A \cdot a^*(x, y) e^{-i2\pi\alpha y}. \quad (8d)$$

Komponenta U_1 prolazi kroz ploču bez difrakcije, veći dio komponente U_2 također, pa te dvije komponente nisu važne za dalju analizu. Komponente U_3 i U_4 proporcionalne su amplitudi vala α koji dolazi od objekta, pomnoženoj eksponencijalnim članom. Član U_3 daje virtualnu sliku objekta na udaljenosti z_0 od ploče pod kutom ϑ (sl. 3), a član U_4 realnu sliku objekta, simetrično prema virtualnoj slici s obzirom na ravninu ploče. Te su dvije slike međusobno odvojene, a odvojene su i od komponenata U_1 i U_2 . Dijapozitiv (hologram) može se, dakle, promatrati bilo kao pozitiv, bilo kao negativ.

Proces holografije proširuje se uspješno i na prostorne, tro-dimenzijske objekte, uz neke adaptacije primijenjenog optičkog

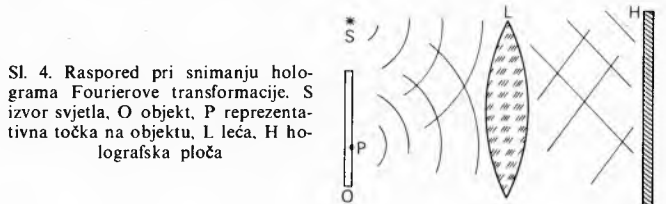
uređaja, primjenjujući pogodan sklop zrcala, razdvajaa svjetla, difuzora, polarizatora i sl.



Sl. 3. Prikaz procesa rekonstrukcije valne fronte. S izvor svjetla, L leća, H holografška ploča, I virtualna slika, R realna slika

Klasifikacija holograma. Osim Gaborovog i Leith-Upatkniešovog tipa holografskog procesa postoje i druge varijante.

Hologram Fourierove transformacije (sl. 4) snima se slično kao prostorni filtar. Kolimacijskom se lećom sferni valovi, koji izlaze iz točkastog svjetlosnog izvora, transformiraju u ravne referentne valove, a svjetlosna se raspodjela, koja dolazi od difuzno osvijetljenog objekta, putem leće transformira kao po Fourierovoj transformaciji. U transformiranoj ravnini transformacija objektna raspodjele jest u konvoluciji s transformacijom stihijske fazne raspodjele, te kao rezultat daje Fourierovu transformaciju objekta. Postoji i varijanta takvog holograma, ali bez primjene leće, nazvana i hologram kvazi-Fourierove transformacije, kojom se dobivaju dvije realne slike objekta.



Sl. 4. Raspored pri snimanju holograma Fourierove transformacije. S izvor svjetla, O objekt, P reprezentativna točka na objektu, L leća, H holografška ploča

Hologram u ravnini slike nastaje ako je objekt sasvim blizu fotografske ploče, a pri snimanju se može primjenjivati i bijelo svjetlo. Informacija nije sada sačuvana u svakom djeliću holograma kao kod svih ostalih tipova holograma.

Fresnelov i Fraunhoferov hologram razlikuju se prema položaju objekta u odnosu prema ploči; kod Fresnelovog holograma objekt je blizak ploči, kod Fraunhoferovog je udaljen od nje.

Višestruko eksponirani hologrami nastaju snimanjem više holograma na istoj fotografskoj ploči, jednog preko drugog. Pri rekonstrukciji te se slike pojavljuju simultano, pa to služi za razvoj i primjenu holografske interferometrije.

Hologrami sa svjetlom u boji i s bijelim svjetlom nastaju snimanjem s koherentnim (tj. monokromatskim) svjetlom, a rekonstruiraju se pomoću bijelog svjetla. Ako se snima pomoću tri valne duljine, mogu se komponirati slike u svim bojama.

Nekoherentni hologrami nastaju snimanjem s nekoherentnim svjetlom. Pomoću takvog holograma dobivenog od dviju slika objekta može se dobiti **holografski stereogram**, tj. prostorna slika objekta kao u fotogrametriji. Ako se snima i konstruira kroz niz gusto poredanih leća, smještenih tik uz fotografsku ploču, postupkom nazvanim **integralna fotografija**, dobivaju se realna i virtualna prostorna slika objekta.

Komputerski formirani hologrami. Za izračunavanje raspodjele svjetla na hologramu može se upotrebljavati i digitalno računalo. Da bi se formirao hologram, mora se učiniti točna analogija s optički snimljenim hologramom. Izračuna se raspodjela na fotografskoj ploči, doda se referentni val, zbroji i kvadrira, a rezultat crta ploterom. Izlazni podatak računala prenosi se na fotografsku ploču kako bi se dobilo stanje kojim je omogućen proces rekonstrukcije valne fronte.

APARATURA I LABORATORIJSKA OPREMA

Za uspješan rad u holografiji potrebna je maksimalna jasnoća slika pri snimanju i pri rekonstrukciji. Zbog toga svjetlosni izvor mora biti visoko koherentan, prostorno i vremenski. To se postiže upotrebom lasera snage 25...50mW. Veoma uspješno se primjenjuje plinski kontinuirani laser s helijem i neonom koji daje svjetlo valne duljine 632,8nm. Laserska svjetlost je linearno polarizirana, a po potrebi se može transformirati i u cirkularno polariziranu. Pri upotrebi difuzora (što je potrebno u mnogim slučajevima) moraju se umetati dodatni polarizatori kako se ne bi kvarila polariziranost svjetla.

Pri radu je potrebno da se do maksimuma izbjegavaju relativna pomicanja pojedinih dijelova aparature i objekta, pa sve mora biti učvršćeno na teškoj podlozi, najbolje mramornoj, pažljivo izoliranoj od vanjskih vibracija.

Da bi svjetlosni izvor bio čist i oštro točkast, dodaju se posebni uređaji koji služe za fino namještanje i prostorno filtriranje svjetla. Svjetlost zbog toga prolazi kroz veoma malen, precizno obrađen kružni otvor (*pinhole*). Optički putovi referentnog i objektnog snopa treba da budu približno jednaki. Razdvajaćima svjetla može se prema potrebi regulirati odnos reflektirane i propuštene svjetlosti.

Prema potrebi može se optički uređaj i izmijeniti radi poboljšanja slike ili radi primjene nekog specijalnog postupka. Pri snimanju je potrebno da radna prostorija bude potpuno zamračena.

Dobro snimljen i fiksiran hologram može godinama služiti za rekonstrukciju.

PRIMJENE HOLOGRAFIJE

Iako holografija postoji tek oko 15 godina, njena je primjena veoma široka i raznovrsna: neke grane optike, različita područja tehnike, medicina, biomehanika, informatika itd.

Hologafska interferometrija. Hologafsku je interferometriju moguće ostvariti na više načina. Jedna od metoda sastoji se u tome da se obrađeni hologram stavi točno u isti položaj u kome je i snimljen, a zatim da se, uz prisutnost objekta, osvijetli referentnim i objektnim svjetlom. Ako je objekt pri tome izložen nekoj maloj promjeni (npr. promjena opterećenja, temperature i sl.), pojavit će se određena familija krivulja, slično kao i u običnoj interferometriji. Na taj se način mogu analizirati naprezanja i deformacije u tijelu nastala uslijed nekog vanjskog utjecaja. Takav postupak naziva se *holografija u realnom vremenu*.

K. A. Stetson i R. L. Powell pokazali su da se jednak efekt može postići i na jednom hologramu, ako se ista ploča dva puta eksponira s objektom u dva različita stanja. Za rekonstruiranje slike nema razlike da li su se tijekom snimanja holograma događaji zbivali simultano ili sukcesivno.

Eksperimentalna analiza napona i deformacije. Hologafski je moguće snimiti pomak na površini opterećenog modela (opterećenog neprozirnog tijela), kao i naprezanja u prozirnom ili neprozirnom tijelu metodom fotoelasticimetrije. Prema načinu rada razlikuju se slijedeći postupci:

Holografija u realnom vremenu nastaje snimanjem u dvije faze. U prvoj fazi snimi se hologram neopterećenog modela. U drugoj fazi model je opterećen i osvijetljen, a promatra se direktno kroz prethodno snimljen hologram. Rezultat interferencije vidi se izravno, i to je, zapravo, slika apsolutne retardacije dvaju svjetlosnih snopova kao u klasičnoj interferometriji.

Jednostruko eksponiran hologram snima se s opterećenim modelom, pa se pri rekonstrukciji dobiva slika relativne retardacije dvaju svjetlosnih snopova, odnosno slika izohroma (familija krivulja konstantnih razlika glavnih napona) kao u klasičnoj fotoelasticimetriji.

Dvostruko eksponiran hologram nastaje tako da se na istom hologramu snimaju dvije ekspozicije, jedna s neopterećenim, a druga s opterećenim modelom. Pri rekonstrukciji dobivaju se kombinirane slike izohroma i izopaha (krivulja jednakih razlika i jednakih suma glavnih napona). Osim toga, u zadnje vrijeme javljaju se prijedlozi holograma sa tri, četiri, pa i više ekspozicija.

Određivanje stanja površinskih pomaka. Problem se rješava primjenom holograma sa dvije i više ekspozicija, ili sa jednim hologramom gledanim iz različitih smjerova. Zbog povratne veze koja postoji između interferencije i difrakcije svjetlosti, pri procesu rekonstrukcije vide se krivulje u smjeru difrakcije prvog reda; tu se kao veoma važan problem javlja precizno određivanje položaja tih krivulja u prostoru, kako bi se pri radu postigli optimalni optički kontrasti. Taj uvjet je formuliran matematički tzv. *uvjetom lokalizacije* (W. Schumann, 1973). Da se odredi totalni vektor pomaka svih točaka na površini promatranog tijela, potrebna su tri dvostruko eksponirana holograma pod različitim smjerovima promatranja, od kojih svaki daje po jednu komponentu traženog totalnog vektora pomaka.

Ako je k_1 valni vektor koji odgovara svjetlosnom snopu, a k_2 , k_3 i k_4 valni vektori koji odgovaraju smjerovima promatranja, dobivaju se za fazne razlike izrazi

$$\Delta\Phi_i = (\vec{k}_i - \vec{k}_1)\vec{u}; \quad \vec{k}_i = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{e}_i \quad (i = 1, 2, 3), \quad (9)$$

u kojima su \vec{u} nepoznati vektor pomaka, a \vec{e}_i jedinični vektori. Također vrijedi

$$\Delta\Phi_i = 2\pi F_{1i} \quad (i = 1, 2, 3), \quad (10)$$

gdje su F_{1i} poznati rangovi krivulja iz snimljenih familija krivulja, dobiveni eksperimentalno. Iz (9) i (10) odmah se dobivaju tri komponente nepoznatog vektora pomaka.

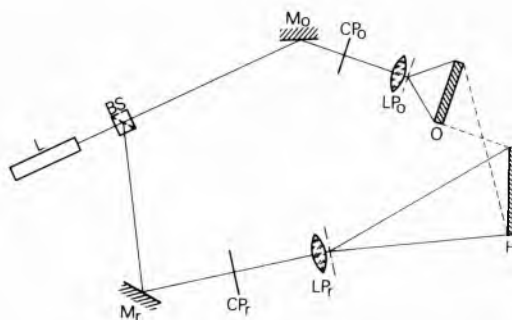
Postoje metode sa tri i četiri ekspozicije kojima se holografski dobiva moiré-slika (s valovitim šarama) koja prikazuje razliku pomaka za dva različita stanja na istom objektu. Ako je jedno od ovih stanja poznato (npr. elastične deformacije nekog opterećenog tijela), može se pomoću tog stanja i snimljene slike odrediti drugo, nepoznato stanje (npr. plastične deformacije na istom tijelu), što bi inače bio veoma teško rješiv problem.

Hologafska fotoelasticimetrija. Ova primjena holografije odnosi se na optičkoaktivne prozirne ili neprozirne modele napravljene od pogodnih optičkoaktivnih materijala kakvi se primjenjuju u fotoelasticimetriji. Na sl. 5 prikazan je tipičan eksperimentalni uređaj kojim se ispituje dvodimenzijanski opterećeni model. U uređaj su umetnuti polarizatori CP_0 i CP_r radi osiguranja potrebne polarizacije svjetlosti. Tada se najčešće primjenjuju hologrami s dvostrukim eksponiranjem. Nakon snimanja i rekonstrukcije dobiva se izraz za amplitudu valne fronte sa četiri karakteristična člana

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4, \quad (11)$$

gdje \vec{E}_1 prikazuje nedifraktiran referentni snop, \vec{E}_2 valnu frontu virtualne, a \vec{E}_3 realne slike. Četvrti član \vec{E}_4 nije u ovoj analizi važan. Dovodeći sliku u vezu s optičkonaponskim zakonom fotoelasticimetrije, može se intenzitet svjetlosti virtualne slike prikazati u obliku

$$I = 1 + 2 \cos \frac{\pi t}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2) \cos \frac{\pi t}{\lambda} (A' + B')(\sigma_1 + \sigma_2) + \cos^2 \frac{\pi t}{\lambda} C(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (12)$$

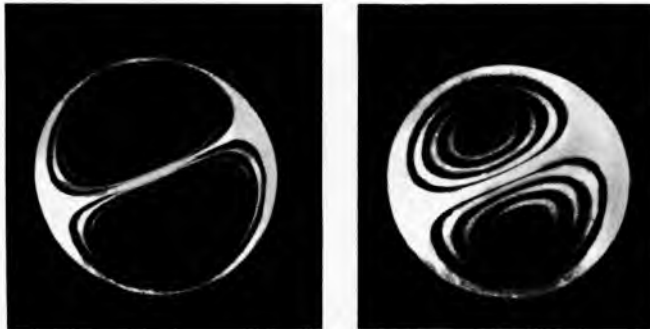


Sl. 5. Shema optičkog uređaja za holografsku fotoelasticimetriju. L laser, BS razdvajajući svjetla, M_0 i M_r zrcala, CP_0 i CP_r polarizatori, LP_0 i LP_r kružni otvori i prostorni filteri, O objekt pod opterećenjem, H hologafska ploča

gdje su σ_1 i σ_2 glavna naprezanja, t debljina modela, a A' , B' i C konstante materijala. Tako se dobiva izravno rješenje ravninskog problema teorije elastičnosti.

Slična analiza primjenjuje se za prostornu fotoelastometriju, za rješavanje termičkih i nelinearnih problema (viskoelastični i plastični materijali), kao i za ispitivanje anizotropnih, nehomogenih i diskontinuiranih materijala. Metoda se može uspješno kombinirati s numeričkom metodom konačnih elemenata.

Dinamički problemi, primjena impulsnih (rubinskih) lasera. Holografika se interferometrija uspješno primjenjuje za proučavanje dinamičkih problema, npr. za određivanje ponašanja objekata pri vibracijama i udaru. Tada se primjenjuju impulsnih (rubinski) laseri, ritam se osvjetljavanja prilagođuje promatranom problemu, a može se primijeniti i kombinacija sa stroboskopskim uređajem. Na holografskom snimku kružne ploče koja vibrira (sl. 6) vide se krivulje koje prikazuju čvorne linije vibracija u različitim tonovima.



Sl. 6. Holografski snimak vibracija kružne ploče

Holografika mikroskopija može služiti za povećavanje holograma ili za snimanje vala poslije povećanja izvršenog običnim mikroskopom. Gaborov je rad baš i proizišao iz studije o usavršavanju elektronskog mikroskopa. Holografika mikroskopija mnogo se primjenjuje u mehanici fluida, za studij polja gibanja i polja brzina u fluidu.

Mikrovalna holografija značajna je u radio-tehnici i radarskoj tehnici. Hologrami se snimaju mikrovalovima, a rekonstruiraju svjetlom. Primjene su raznovrsne, npr. u konstrukciji kombiniranih antena radarskih sistema, pri preciznim snimanjima iz aviona kao i za ispitivanje plazme (istraživanje termonuklearne fuzije).

Akustička holografija primjenjuje se u ultrazvučnoj dijagnostici u medicini i pri ispitivanju materijala i konstrukcija ultrazvukom. Snima se akustičkim valovima, a rekonstruira svjetlom. Akustički hologram može se pogodno dobiti na površini tekućine ako se u njoj posebnim oscilatorom izazovu vibracije. Dobiva se fazno moduliran hologram, a rekonstrukcija se promatra u realnom vremenu. Pri primjeni akustičke holografije, osobito u medicini, može se hologram snimati pomoću posebnog mikrofona kojim se modulira svjetlosni snop, pomoću tekućih kristala i fotografije u boji.

Primjena holografije u biomehanici i medicini. Fotoelastimetrijska holografija našla je široku primjenu u biomehanici, analizirajući direktno ili na modelima funkcionalnost pojedinih dijelova organizma (srce, oko, zglobovi, kosti, koža, zubi, krvotok, kinematika hodanja itd.).

Snimanje ljudskog oka prva je primjena holografije u medicini. Tu se primjenjuje holografika mikroskopija, a iskorištava se svojstvo optičke aktivnosti očne zjenice, čime se holografskim identificiranjem defekata u slici oka dolazi do mogućnosti za dopunsku dijagnostiku očne bolesti. Akustička se holografija primjenjuje za snimanje unutarnjih organa ljudskog tijela koji su inače prozirni za rendgensko zračenje, pa je to izvanredna pomoć dijagnostici. Akustička holografija primjenjuje se i u ginekologiji, mikroskopskoj autoradiografiji, cistoskopiji, citologiji i dr.

Da se holografski dobije prostorni oblik pojedinih organa tijela, primjenjuje se integralna fotografija pomoću rendgenskog zračenja. Tako se, npr., elektronski snima elektrokardiogram duž tri koordinatne osi, kako bi se dobio vektorski dijagram koji predočuje vektor električnog potencijala kroz područje srca. Hologrami se mnogo primjenjuju u nuklearnoj medicini gdje su hologrami Fresnelovog tipa vrlo prikladni.

Holografija u televiziji i kinematografiji. Holografija se mnogo primjenjuje u televiziji, a u posljednje vrijeme i pri izučavanju trodimenzijske televizije uz primjenu rubinskih lasera. Osnovna je poteškoća pri tome snimanje u malom prostoru i sa uskim trakama. Primjenjuju se hologrami Fourierove transformacije. Kamera je bez leće, a prva optička površina je fotokatoda koja zamjenjuje fotografsku ploču u konvencionalnoj holografiji. Informacija je rekonstruirana u prijemniku kao slika akustičkih valova u ultrazvučnom svjetlosnom modulatoru koji djeluje kao pokretni hologram.

Osnovna je poteškoća holografike kinematografije dobivanje jasne slike na velikom ekranu. Problem je i dobivanje kvalitetnih boja. Film se formira pomoću okvira, kao u klasičnoj kinematografiji, kako bi se dobilo sukcesivno snimanje holograma koji se onda sukcesivno prosvjetljavaju.

Primjene holografije u drugim područjima. Danas se holografija sve više primjenjuje u mnogim drugim područjima, posebno u mjernoj tehnici i metrologiji uopće, u analizi prslina i mehanizma loma na konstrukcijama, u fotogrametriji i vojnoj tehnici uopće. Holografija predstavlja izvanrednu mogućnost za stvaranje memorije (pohranjivanje podataka) u kombinaciji s elektroničkim računalom, pa se sve više primjenjuje u informatici, snimanjem većeg broja holograma jednog preko drugog, ili velikog skupa veoma malih holograma. Mogućnosti su izvanredne: može se smjestiti više od 10^6 binarnih jedinica na 1mm^2 . Holografika memorija je osobito pogodna za čuvanje velikog broja permanentnih podataka, npr. memorija s televizijskim programima na plastičnoj traci holograma ili memorija za tiskane materijale (više stotina stranica na 1cm^2).

LIT.: D. Gabor, A new microscopic principle, *Nature*, 161, 777, 1948. — Isti, Microscopy by reconstructed wavefronts, *Proc. Roy. Soc.*, A 197, 454 (1949, 1951). — G. W. Stroke, An introduction to coherent optics and holography, *Acad. Press*, New York-London 1966. — W. Goodman, Introduction to Fourier optics, *McGraw Hill Co.*, 1968. — V. Brčić, Application of holography and hologram interferometry to photoelasticity, *CISM*, Udine 1969. — E. R. Robertson, J. M. Harvey, The engineering uses of holography, *University Press*, Cambridge 1970. — A. F. Metherell i sur., Acoustical holography, *Plenum Press*, New York, Vol. 1, 1968; Vol. 2, 1969; Vol. 3, 1971. — J. Ch. Viénot, P. Smigielski, H. Royer, Holographie optique, développements-applications, *Dunod*, Paris 1971. — E. J. Feleppa, Holography and medicine, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 19, 194-205, 1972. — W. T. Cathey, Optical information processing and holography, *J. Wiley* 1974. — B. II. Гинзбург, Б. М. Степанова, Голография, методы и аппаратура, Советское радио, Москва 1974. — R. K. Erf, Holographic nondestructive testing, *Academic Press*, New York-London 1974.

V. Brčić