

NEKOĽKO POZNÁMOK K LASEROVEJ HOLOGRAFII

ANTON ŠTRBA,* EVA ZÁVODSKÁ,* Bratislava

V článku sú uvedené niektoré experimentálne výsledky dosiahnuté pri zobrazovaní rovinných a priestorových objektov holografickou metódou. Poukazuje sa na možnosť použitia tejto metódy pri zobrazovaní ultrazvukových polí a uvádzajú sa výsledky získané pri zobrazovaní stojatej ultrazvukovej vlny frekvencie 1 MHz v priehľadnej planoparalelnej vrstve izotrópnej kvapaliny.

I. ÚVOD

Od svojho vzniku [1] sa optická holografia ako fyzikálna metóda rozšírila do mnohých odborov fyziky. Nahradza klasické metódy všade tam, kde je potrebné získať úplnejšie informácie o vlastnostiach svetelného poľa. Dôležitým medzníkom pre rozvoj holografie bol objav lasera, ktorý ju postavil na kvalitatívne vyššiu úroveň. Vlastnosti laserového žiarenia umožňujú rozšíriť holografiu aj tam, kde sa klasické zdroje svetla vzhľadom na malú koherenčnú dĺžku nedali použiť. Veľkým prínosom je rozpracovanie dvojúčovej metódy [2], ktorá odstránila mnohé nedostatky pôvodnej Gáborovej holografie.

V článku uvádzame niektoré jednoduché optické schémy holografie a experimentálne výsledky, ktoré sa pomocou týchto schém dosiahli.

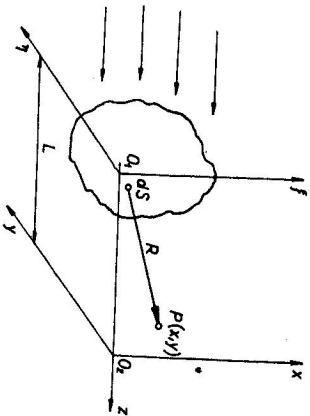
II. VZNIK A REKONŠTRUKCIA HOLOGRAMU

Význačnou vlastnosťou holografie je jej schopnosť úplnejšie zaregistrovať priestorovú štruktúru svetelnej vlny. Na rozdiel od fotografie, ktorá zachytáva len intenzitné pomery svetelného poľa, holografia umožňuje získať informácie o amplitúdových, ako aj o fázových pomeroch vo svetelnom poli. Holografia uskutočňuje teda úplné merania, a to pomocou interferencie tzv. signálneho

* Katedra experimentálnej fyziky Prírodovedeckej fakulty UK, BRATISLAVA, Šmeralova 2.

vlnenia, ktoré vzniklo ohybom na pozorovanom objekte a porovnávacieho, resp. referenčného vlnenia, ktoré sa šíri priamo od zdroja svetla. Ak do oblasti prekrytia oboch týchto vlnení vložíme fotografickú dosku, po jej vyvolaní dostaneme hologram, ktorý predstavuje v reze obraz svetelného poľa [3].

Vlastnosti a vznik hologramu vysvetlíme takto [4]: nájdeme obraz predmetu holografickou metódou, pričom sa obmedzíme na dvojrozmerný prípad. Uvažujeme svetelnú vlnu postupujúcu v smere osi z (obr. 1). Nech $U(x, y)$



Obr. 1. Vznik hologramu. (ξ, η) — súradná rovina predmetu, (x, y) — súradná rovina hologramu, L — vzdialenosť oboch súradných rovín, dS — elementárna ploška, $P(x, y)$ — bod pozorovania, R — vzdialenosť bodu P od elementárnej plošky dS .

je amplitúda svetelného poľa v bode P , ktorý leží v blízkosti počiatku O_2 súradnej sústavy (x, y) . Súradná sústava (x, y) je od súradnej sústavy (ξ, τ) vzdialená o dĺžku L . Podľa Huygens—Fresnelovho princípu bude sa veľkosť $U(x, y)$ rovnáť superpozícii všetkých vlnení od jednotlivých elementárnych plôšiek dS vlnoplochy v rovine (ξ, τ) a určíme ju zo vzťahu [5]:

$$U(x, y) = \frac{Ai}{\lambda} \iint_S \frac{e^{ikR}}{R} dS,$$

kde R je vzdialenosť bodu P od elementárnej plošky dS vlnoplochy, t. j. $R = \sqrt{L^2 + (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}$. Pretože bod P leží v blízkosti počiatku súradnej sústavy, uhol medzi vektorom R a osou z bude malý. Pri dostatočne veľkých vzdialenostiach L a dodržaní podmienky malých uhlov (uvažujeme len tie elementárne plošky dS vlnoplochy, ktoré ležia v blízkosti počiatku O_1 súradnej sústavy (ξ, η)), bude

$$R \approx L + \frac{(x - \xi)^2}{2L} + \frac{(y - \eta)^2}{2L}.$$

Dosadením R do vzťahu pre $U(x, y)$ dostávame:

$$U(x, y) = \frac{Aie^{ikL}}{\lambda L} \iint_S e^{\frac{ik}{2L}[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]} dS.$$

V člene opisujúcom amplitúdu svetelného poľa sme pre jednoduchosť zanedbali členy vyšších rádov, keďže nemajú na ňu podstatný vplyv. Do roviny (ξ, η) , vložíme teraz predmet, (napr. diapozitív). Nech jeho amplitúdová priepustnosť je $S(\xi, \eta)$. Ak vynecháme konštanty, ktoré nemajú vplyv na rozloženie intenzity svetla v rovine obrazu, môžeme $U(x, y)$ napísať v tvare:

$$U(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\xi, \eta) f(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta,$$

kde

$$f(x - \xi, y - \eta) = e^{\frac{ik}{2L}[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]}.$$

Tento výraz predstavuje Fourierov integrál charakterizujúci operáciu konvolúcie, ktorú zjednodušíme píšeme [3]:

$$U(x, y) = S(\xi, \eta) \otimes f(\xi, \eta).$$

Abby fotografická doska, ktorá je umiestnená v rovine (x, y) , miesla záznam o predmete, musíme na ňu priviesť porovnávateľ (referenčný) signál S_R . Amplitúda výsledného vlnenia v rovine (x, y) potom bude:

$$S_R + U(x, y) = S_R + S \otimes f.$$

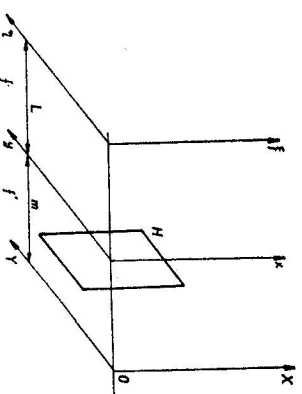
Fotografická doska ako kvadratický detektor zaznamená intenzitu

$$\begin{aligned} I &\sim |S_R + S \otimes f|^2 = (S_R + S \otimes f)(S_R^* + S^* \otimes f^*) = \\ &= S_R^2 + (S \otimes f)^2 + S_R(S^* \otimes f^*) + S_R^*(S \otimes f). \end{aligned} \quad (1)$$

Rovnica (1) sa nazýva rovnicou hologramu. Posledné dva členy na pravej strane rovnice obsahujú aj fázovú informáciu.

Ak túto fotografickú dosku vyvoláme, dostaneme hologram H (obr. 2).

Obr. 2. Rekonštrukcia hologramu H . (x, y) — rovina hologramu, (X, Y) — rovina obrazu predmetu, m — vzdialenosť oboch rovín.



Ak tento hologram osvetlíme koherentným svetelným zväzkom, v rovine (X, Y) budeme môcť pozorovať obraz pôvodného predmetu.

Nech m je vzdialenosť súradnej roviny (X, Y) od roviny (x, y) . V nasledujúcich úvahách budeme postupovať tak ako v predšom prípade. Zaujímá nás bude svetelné pole v rovine (X, Y) . Pripustnosť hologramu môžeme charakterizovať jedným z tých členom rovnice (1), ktoré obsahujú aj fázovú informáciu o predmete. Vezmeme napr. 3. člen. Svetelné pole v rovine (X, Y) možno potom charakterizovať vzťahom:

$$S_R(S^* \otimes f^*) \otimes f',$$

kde f' , podobne ako v prvom prípade, môžeme vyjadriť v tvare:

$$f'(X, Y) = \exp \left[\frac{i\pi}{m\lambda} (X - x)^2 + (Y - y)^2 \right].$$

Upravme výraz $(S^* \otimes f^*) \otimes f'$. Pre jednoduchosť predpokladajme, že $L = m$ a teda funkcie f a f' majú rovnaký tvar. Pretože [3]

$$(S^* \otimes f^*) \otimes f' = S^* \otimes (f \otimes f'),$$

je

$$\begin{aligned} (f^* \otimes f') &= \iint_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ \frac{i\pi}{L\lambda} [x^2 + y^2 + (X - x)^2 + (Y - y)^2] \right\} dx dy = \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} \exp \left[\frac{i\pi}{L\lambda} (X^2 + Y^2) - 2i \left(\frac{Xx}{L\lambda} - \frac{Yy}{L\lambda} \right) \right] dx dy. \end{aligned}$$

Ak označíme $u = X/L\lambda$, $v = Y/L\lambda$, dostávame:

$$f^* \otimes f' = \exp \left[\frac{i\pi}{L\lambda} (X^2 + Y^2) \right] \iint_{-\infty}^{\infty} \exp [-2i(ux - vy)] dx dy.$$

Riešením tohto integrálu dostávame Diracovu δ -funkciu

$$f^* \otimes f' = \delta(X, Y).$$

Teda $S^* \otimes \delta(X, Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x, y) \delta(X - x, Y - y) dx dy = S^*(X, Y)$, pretože platí toto pravidlo [3]:

$$\int F(x) \delta(x - a) dx = F(a).$$

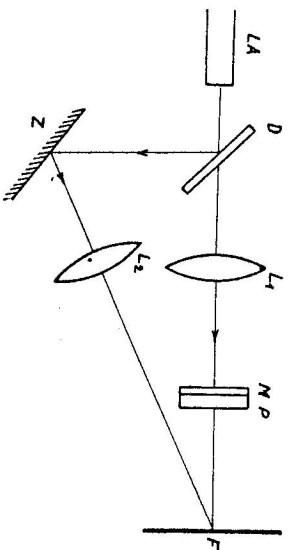
V našich výpočtoch sme dospeli ku komplexne združenej hodnote signálneho vlnenia. Pretože fotografická doska pôsobí ako kvadratický detektor, v konečnom dôsledku dostávame obraz pôvodného predmetu. Z našich úvah teda vyplýva, že komplexná amplitúda svetelného poľa v rovine zobrazenia t. j. v rovine hologramu sa rovná Fourierovu obrazu komplexnej amplitúdy svetelného poľa predmetu. Ak sme teda aplikovali Fourierovu transformáciu na pole svetelného vektora hologramu, museli sme dospieť k východiskovému stavu, t. j. k pôvodnému predmetu, resp. obrazu predmetu.

III. EXPERIMENTÁLNE VÝSLEDKY

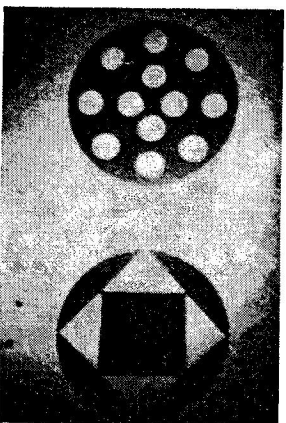
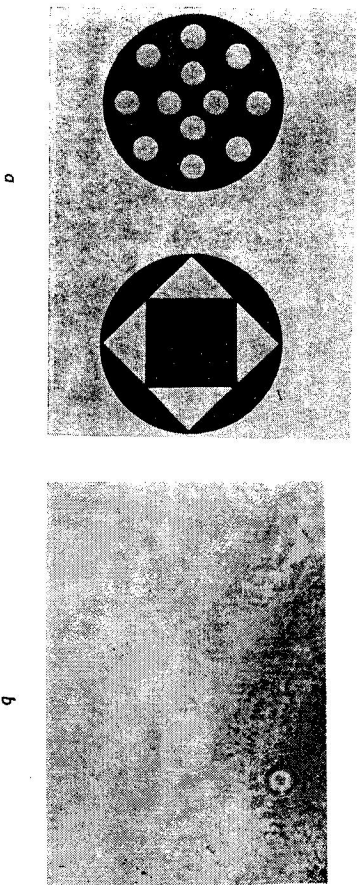
V pôvodných Gáborových pokusoch [1] o holografický záznam sa nestretáme so spôsobom záznamu, aký sa používa pri využití laserového svetla. Princíp Gáborovej metódy spočíva v tom, že svetelné lúče, ktoré prechádzajú predmetom nezmenené a pri ktorých dochádza k ohybu, medzi sebou interferujú. Tento interferogram môžeme zaznamenať na fotografickú dosku. Využitie laserového svetla v holografii umožnilo vytvoriť novú metódu záznamu, tzv. dvojlúčovú metódu [3]. Podstata takéhoto záznamu spočíva v tom, že svetelný zväzok vystupujúci z laseru sa opticky rozdelí na dva lúče, z ktorých jeden prechádza predmetom a druhý nezmenený dopadá na fotodokku priamo. Fotografická doska je umiestnená tak, aby na nej došlo k prekrytiu oboch zväzkov. Po vyvolaní bude v sebe niesť záznam interferenčného obrazu, ktorý tam vznikol. Dvojlúčová metóda má pred pôvodnou Gáborovou metódou prednosť v tom, že umožňuje aj záznam trojrozmerných predmetov. V oboch prípadoch však vznik hologramu podmieňuje dokonalá stabilita systému a vysoká rozlišovacia schopnosť záznamového materiálu. Aby sa dosiahla čo najvyššia stabilita zariadenia, umiestňuje sa toto na hrubú žulovú platňu, uloženú na plstenej podložke. Použitie klasickej optikej lavice nie je príliš šťastné riešenie, pretože nie je dokonale stabilná a neumožňuje žiadny iný smer lúča, iba priamočiary.

V samom experimente sme postupovali takto: podľa optikej schémy na obr. 3 sme dostali hologram diapozitívu veľkosti 36×36 mm. Zobrazený predmet na diapozitíve bol veľkosti asi 5 mm. Predmet, hologram a rekonštrukcia sú na obr. 4. Použitá optická schéma predstavuje dvojlúčovú metódu na prechod. Laserový zväzok sme rozdelili hrubou sklenenou doskou na dva lúče. Jeden z lúčov rozdeleného zväzku pokračoval nezmeneným smerom a dopadal na fotografickú dosku po prechode predmetom, druhý sa odrážal v smere kolmom na pôvodný smer. Použitím pomocného zrkadla sme otočili smer chodu tohto lúča do smeru prvého lúča tak, aby v mieste fotografickej dosky došlo k ich prekriženiu. Z nedostatku iných možností sme celé

zariadenie inštalovali na klasickú optickú lavicu. Zrkadlo, ktoré ovplyvňovalo smer dráhy referenčného zväzku, museli sme umiestniť na pomocný stôl, čo do určitej miery malo vplyv na kvalitu hologramu.

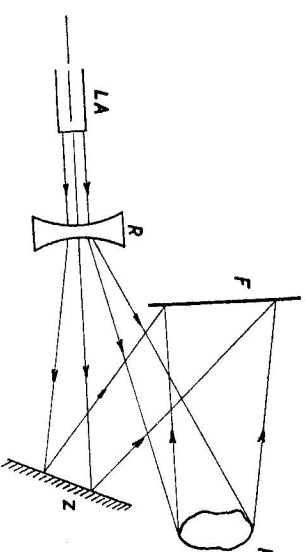


Obr. 3. Optická schéma použitia pri holografickom zobrazovaní dvojrozmerného objektu (diapozitívu). LA — laser, D — polopriepustná dosička (príp. hrubá sklenená doska), Z — rovinné zrkadlo, L_1 , L_2 — spojné šošovky, M — matnica, P — diapozitív, F — fotografická doska.

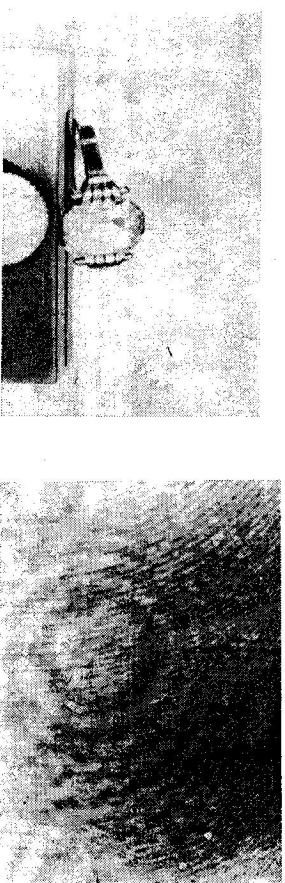


Obr. 4. a. predmet; b. hologram; c. obraz predmetu.

Pri zobrazovaní konkrétneho trojrozmerného predmetu sa optická schéma pozmenila (obr. 5). Predmet musí svetlo odrážať. Svetlo rozptýlené od predmetu dopadalo na fotografickú dosku, kde sme privádzali aj referenčný zväzok. Velkosť predmetu bola asi 2 cm. S výhodou možno zobrazovať tie predmety, ktoré čo najrovnomernejšie rozptyľujú svetlo. Predmet, hologram a rekonštrukcia sú na obr. 6.



Obr. 5. Optická schéma použitia pri holografickom zobrazovaní trojrozmerného predmetu (prsteň). LA — laser, R — rozptyľná šošovka, Z — rovinné zrkadlo, P — predmet, F — fotografická doska.

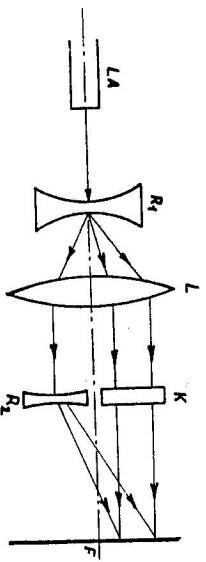


Obr. 6. a. predmet; b. hologram; c. obraz predmetu.

Holografickú metódu sme použili aj na zobrazenie pola stojatej ultrazvukovej vlny. Možnosť tohto zobrazenia vyplýva z toho, že prostredie s ultrazvukovou vlnou sa v dôsledku periodických zmien indexu lomu stáva opticky nehomogénnym. Táto skutočnosť umožňuje zobraziť pole stojatej ultrazvukovej vlny, a to metódou sekundárnej interferencie alebo tieňovou metódou [6]. Obe tieto metódy však z principiálneho hľadiska neumožňujú získať trojrozmerný obraz. Obraz, ktorý vzniká, je určený strednou hodnotou intenzity ultrazvuku v tých miestach, v ktorých prechádza svetelný lúč polom.

Prednosťou holografickej metódy je práve možnosť získať trojrozmerný obraz. Na rozdiel od predmetov obvykle zobrazovaných holografickou metódou, má ultrazvukové pole vo funkcii predmetu malý kontrast, čo má značný vplyv na kvalitu obrazu. Naším cieľom bolo získať obraz pola stojatej ultrazvukovej vlny na dvojrozmerný záznamový materiál, pretože aj keď pokusy s vyšetrením ultrazvukového pola holografickou metódou sa už robili [7], obraz ultrazvukového pola získaný touto metódou sme v dostupnej literatúre nenašli.

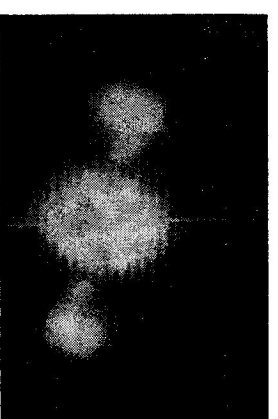
O kvalite rekonštrukcie rozhoduje (pri danom fotomateriáli) použitá optická schéma. V našom prípade svetelný zväzok vstupujúci z lasera sme rozšírili mikroskopickým objektívom tak, aby časť z neho mohla prechádzať pozorovaným polom a zvyšná nezmenená dopadla na fotografickú dosku priamo (obr. 7). Ultrazvukové vlnenie vysielal piezoelektrický menič s rezonančnou



Obr. 7. Optická schéma holografickej metódy použitej pri zobrazovaní ultrazvukového pola. LA — laser, K — kyveta s ultrazvukovým polom, L — spojná šošovka, R₁, R₂ — rozptylné šošovky, F — fotografická doska.

frekvenciou 1 MHz. Menič pracoval v transformátorovom oleji. Ultrazvukové pole sme zobrazovali v planparalelnej vrstve oleja hrúbky asi 5 cm. Hologram a jeho rekonštrukcia sú na obr. 8. Na rekonštrukcii vidieť priebeh uzlových rovin, ktorý zodpovedá kolmému prechodu svetla cez ultrazvukové pole.

Pri holografickom zobrazovaní sme používali plynový He-Ne laser a ako záznamové prostredie fotografické dosky ORWO LP 1 MIKRAT s rozlišovacou schopnosťou 520 čiar/mm.



Obr. 8. a. hologram; b. obraz ultrazvukového pola.

IV. ZÁVER

Aj keď principiálne zhotovenie hologramu nie je úloha zložitá, pri experimentálnej práci treba vyriešiť viaceré problémy. Na to, aby interferenčný obraz na fotografickej doske vznikol, je totiž bezpodmienečne nevyhnutné dodržať stabilitu celého zariadenia. Ak uvážime, že už pri náhodnej zmene dráhového rozdielu interferujúcich lúčov o hodnotu $\lambda/20$ sa znižuje hodnota kontrastu na polovicu [4], náročnosť experimentálnej techniky je zrejmá. Pri experimentálnej práci je veľmi dôležitý výber záznamového materiálu. So vzrastom rozlišovacej schopnosti sa však znižuje citlivosť fotomateriálu, a tým sa zhoršujú predpoklady na dodržanie stability celej optickej sústavy.

Výsledky, uvedené na obr. 4 a obr. 6, sa dajú porovnať s rekonštrukciami uvedenými napr. v [3], aj keď rozlišovacia schopnosť našich fotografických dosiek bola menšia. Experimentálne podmienky umožnili získať obraz pola stojatej ultrazvukovej vlny len priamo v smere signálneho zväzku, v dôsledku čoho silne vzrástlo rovnomerne osvetlené pozadie. Preto porovnanie nášho výsledku s výsledkami získanými klasickými metódami, uvedenými napr. v [6], nevyjadruje prednosti holografického zobrazenia. Podľa nás, na získanie kvalitatívnejšieho a trojrozmerného obrazu ultrazvukového pola treba použiť zložitejšiu schému, pri ktorej by zobrazované pole bolo osvetľované aspoň dvoma svetelnými zväzkami a materiál s vyššou rozlišovacou schopnosťou. V súvislosti sa naša práca zameriava na využitie trojrozmerného záznamového prostredia pri holografickom zobrazovaní.

LITERATÚRA

- [1] Gábor D., *Nature* 161 (1948), 777.
- [2] Leith E., Upatnieks J., *Opt. Soc. Am.* 53 (1963), 1377.
- [3] Strok G. W., *An Introduction to Coherent Optics and Holography*, Academic Press, New York 1966.

- [4] Knittl Z., *Teória tenkého hologramu*. Kurz holografie, Olomouc 1970.
 - [5] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Теория поля*. Гос. изд. физ.-мат. литературы, Москва 1960.
 - [6] Бергман Л., *Ультразвук*. Издательство иностран. литературы. Москва 1956.
 - [7] Alipi A., Palmieri L., *Acustica* 20 (1968), 84.
- Došlo 17. 11. 1970

SOME REMARKS TO THE LASER HOLOGRAPHY

Anton Štrba, Eva Závodská

Summary

In the article there are presented some experimental results obtained in the investigation of plain and space objects by holographic method. The paper shows the possibility to use this method for the investigation of an ultrasonic standing wave of the frequency 1 MHz in the transparent planparallel layer of isotropic liquid.