

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Erika Mechlová; Jaroslav Kvapil
Holografie

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 15 (1970), No. 2, 45--61

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138231>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1970

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

HOLOGRAFIE

ERIKA MECHLOVÁ, Ostrava, JAROSLAV KVAPIL, Olomouc

Snaha o co nejdokonalejší a nejuvěrnější obrazy předmětů všeho druhu vede až k holografii — jedné z moderních metod optického zobrazení.

Základní podmínkou holografické metody zobrazení je časová i prostorová koherence světla, které používáme při zobrazení. Samotný proces zobrazení se skládá ze dvou stupňů. Prvním stupněm je fotografický záznam interferenčního obrazce vzniklého interferencí vlnoplochy odražené od předmětu s referenční vlnoplochou. Vyvolanou fotografickou desku potom nazýváme *hologram*. Druhým stupněm je rekonstrukce obrazu původního předmětu z hologramu.

V současné době se holografií zabývá velké množství laboratoří na celém světě. Jen v USA se jich uvádí něco přes sto. Většinou pracují na aplikacích holografie v různých oborech. Abychom porozuměli aplikacím holografie, je nezbytné znát základní holografické metody, protože v současné době i ty nejjednodušší nacházejí uplatnění v technické praxi. Nejvhodnější z tohoto hlediska se zdá postup výkladu, jak se samotný problém vyvíjel historicky.

HISTORICKÝ VÝVOJ

Prvně se holografií zabýval v letech 1947—49 Angličan DENNIS GABOR [1]. Objevil tuto metodu při hledání cesty ke zlepšení rozlišovací schopnosti elektronového mikroskopu. Svou metodu tehdy nazval *rekonstrukce vlnoplochy*.

Gaborova rekonstrukce vlnoplochy je dvoustupňová. V prvním stupni se zaznamenává ohybový obrazec polopropustného předmětu na fotografickou desku. Druhým stupněm je rekonstrukce obrazu původního předmětu pomocí předtím zaznamenaného hologramu. Aby rekonstrukce obrazu původního předmětu byla proveditelná, není možno záznam hologramu provést v obyčejném světle, nýbrž ve světle časově a prostorově koherentním. V hologramu je zaznamenáno nejen rozdělení amplitud v daném předmětu, ale implicitně také rozdělení fází, což u normální fotografie není možné. Toto rozdělení amplitud a fází je možno v obraze předmětu obnovit vhodnou rekonstrukcí. Metodou rekonstrukce vlnoplochy je možné rekonstruovat předmět pomocí koherentního světla s dostatečným stupněm přesnosti z pouhého záznamu vlnoplochy v *libovolné* rovině za předmětem. Zobrazované předměty musí však být

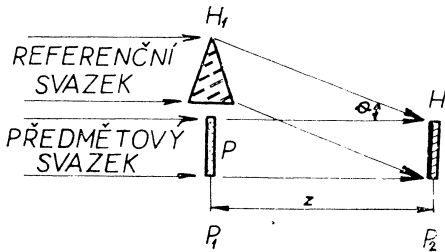
polopropustné, např. diapozitivy tmavého textu na světlém pozadí, aby co největší část vlnoplochy pozadí pronikla až na fotografickou desku. V této metodě je totiž osvětlující svazek a koherentní pozadí jedno a totéž. Proto např. průhledný tisk na tmavém pozadí nebylo možno touto metodou dobře zobrazit, protože vlnoplocha pozadí byla slabá. Vzhledem k málo intenzivním zdrojům koherentního záření, které v uvedené době byly dosažitelné, Dennis Gabor už uvedenou metodu dále nerozvíjel.

Objev laseru — vysoce intenzivního zdroje koherentního záření — byl dalším impulsem práce v tomto oboru. V roce 1962 dva Američané EMMETT N. LEITH a JURIS UPATNIEKS vydali svůj první elaborát o holografii [2] a později další [3], [4], v nichž uvedli zdokonalení Gaborovy metody rekonstrukce vlnoplochy, kterou nazvali *holografie* podle Gaborova názvu *hologram*. Jako důvod tohoto názvu se uvádí, že hologram dává úplný obraz předmětu. Zaznamená nejen amplitudy, ale implicitně i fáze, tj. v podstatě středy a tvary vlnoploch od jednotlivých bodů předmětu.

Téměř současně uveřejnil J. N. DĚNISJUK práce [5—7], ve kterých kombinoval princip holografie s Lippmanovou integrální fotografií.

DOUSVAZKOVÁ HOLOGRAFIE

Zlepšení Gaborovy metody provedené v roce 1963 E. Leithem a J. Upatnieksem umožnilo zobrazování dalších dvou skupin předmětů: průhledných předmětů na tmavém pozadí (např. diapozitiv průhledného tisku na tmavém pozadí) a předmětů spojitě tónovaných (např. větší plochy přibližně stejně propustné). Zlepšení záleží v úhlovém oddělení osvětlujícího svazku od svazku koherentního pozadí. Svazek



Obr. 1. Záznam hologramu dvousvazkovou metodou.

koherentního pozadí byl nazván *referenčním svazkem*. Při záznamu hologramu dopadá referenční svazek na fotografickou desku pod nějakým nenulovým úhlem, kdežto předmětový svazek dopadá kolmo. Teoreticky tento proces umožňuje dokonalé rekonstrukce všech průhledných předmětů.

Při záznamu hologramu se používá zařízení typu dvousvazkového interferometru (obr. 1). Předmět P umístěný v rovině P_1 je osvětlen kolimovaným svazkem časově a prostorově koherentního světla a ohybový obrazec předmětu je zaznamenán v rovině P_2 . K předmětu přiléhá svou základnou hranol H_1 o malém lámavém úhlu. Část světelného svazku je hranolem H_1 lámána a odchyluje se od původního směru o úhel θ — *referenční svazek*. Po lomu se potom skládá

v rovině P_2 s druhým světelným svazkem, který prošel předmětem — *předmětový* svazek — a který v rovině P_2 tvoří ohybový obrazec předmětu. Kdyby ve druhém světelném svazku nebyl umístěn předmět, vytvořily by superpozicí oba svazky interferenční Jounkův obrazec (*obr. 2*). Protože však průhledný předmět ve svazku je, obrazec je deformován ohybovým obrazcem předmětu. Fotografická deska H , která je umístěna v rovině P_2 , zaznamenává výsledný obrazec a takto se vytváří hologram.

a) Teorie dvousvazkové holografie

Nechť světelný rozruch v rovině P_2 (*obr. 1*), který je vyvolán předmětovým svazkem, je

$$(1) \quad U = A \exp(i\varphi),$$

kde A je amplituda výchylky a φ fáze dopadajícího světla. Nechť amplituda referenčního svazku v rovině P_2 je A_0 . Tento svazek vytváří v rovině P_2 rozruch $A_0 \exp(i\xi_c x)$, kde fázový výraz $\exp(i\xi_c x)$ plyne z toho, že svazek dopadá na rovinu P_2 pod úhlem ϑ a vytváří pro malé hodnoty úhlu ϑ postupné fázové zpoždění $\exp(2\pi\vartheta x/\lambda)$ napříč rovinou, na niž svazek dopadá. Jestliže existuje referenční svazek, pak amplitudové rozdělení v záznamové rovině hologramu P_2 je $A_0 \exp(i\xi_c x) + A \exp(i\varphi)$. Předpokládáme-li, že fotografická deska, která zaznamenává rozdělení amplitud, má lineární citlivost vzhledem k intenzitě, je propustnost pro vyvolanou fotografickou desku dána vztahem

$$(2) \quad T = T_0 - kI,$$

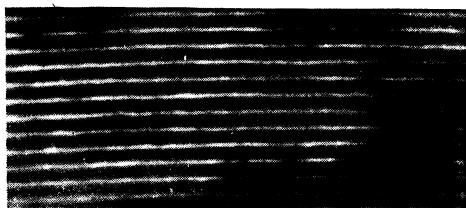
kde I je rozdělení intenzity v rovině P_2

$$(3) \quad I = |A_0 \exp(i\xi_c x) + A \exp(i\varphi)|^2$$

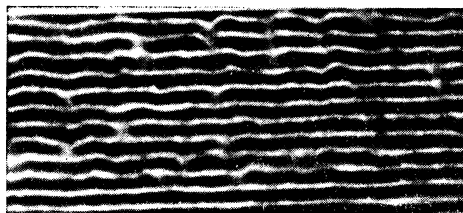
a T_0 a k jsou konstanty určené křivkou zčernání fotografické emulze. Rovnice (2) je obecně správná pro křivku zčernání při propustnosti mezi 0,2 až 0,8, která je brána vzhledem k základní propustnosti. Výsledná propustnost fotografické desky se záznamem hologramu proto je

$$(4) \quad \begin{aligned} T &= T_0 - k|A_0 \exp(i\xi_c x) + A \exp(i\varphi)|^2 = \\ &= T_0 - kA_0^2 - kA^2 - kA_0 A^* \exp[i(\xi_c x - \varphi)] - \\ &\quad - kA_0^* A \exp[-i(\xi_c x - \varphi)] = \\ &= T_0 - kA_0^2 - kA^2 - 2kA_0 A \cos(\xi_c x - \varphi). \end{aligned}$$

Hologram se tedy chová jako kvadratický modulační přístroj, který vytváří výraz $2kA_0 A \cos(\xi_c x - \varphi)$, což je reálná část původního ohybového obrazce, která moduluje nosnou frekvenci ξ_c . Není-li v předmětovém svazku předmět, který způsobuje ohyb, pak tento výraz představuje proužkový obrazec, který je vytvořen interferencí dvou svazků (*obr. 2*). Je-li předmět ve svazku, *moduluje* jeho ohybový obrazec



Obr. 2. Interferenční obrazec vzniklý superpozicí dvou svazků (zvětšeno 120krát).

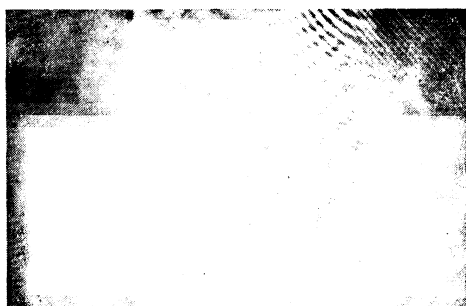


Obr. 3. Interferenční obrazec modulovaný ohybovým obrazcem předmětu (zvětšeno 120krát).

proužkový obrazec (obr. 3). Amplitudy ohybového obrazce způsobují amplitudovou modulaci proužků a fáze vytvářejí fázovou modulaci proužků. Proužkový obrazec se tedy stává modulovaným „nosičem“ podobně jako časová nosná vlna užívaná v komunikačních soustavách.

Z toho vyplývá, že fotografická deska zaznamenává rozdělení jak velikostí amplitud, tak fází ohybového obrazce. Je však důležité, aby tento záznam, tj. poslední výraz v rovnici (4), mohl být oddělen od zbývajících výrazů dané rovnice, a tím mohla být uskutečněna rekonstrukce obrazu původního předmětu.

Takto zaznamenaný hologram se velmi málo podobá původnímu předmětu. Má-li předmět nějaké hrubší obrysy, jsou v hologramu rozeznatelné tyto hrubší obrysy předmětu, ale celý záznam se zdá být nějak rozmazaný. Při záznamu diapozitivu s drobným textem není možno na hologramu rozpoznat žádnou podobu s původním předmětem (obr. 4). Při prohlížení hologramu mikroskopem vidíme slabě porušený systém interferenčních proužků (obr. 3). Místní zesílení nebo zeslabení proužků je způsobeno změnami amplitud vlivem zaznamenávaného předmětu. V posuvu proužků

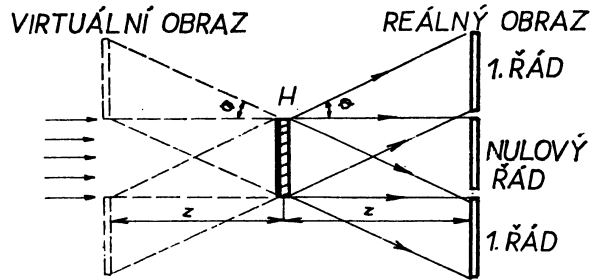


Obr. 4. Hologram.

jsou zaznamenány fázové změny, které způsobil předmět. Z toho plyne, že i když na hologramu pouhým okem nevidíme nic, ve skutečnosti hologram obsahuje úplnou informaci o daném předmětu, tj. záznam amplitud i fází daného předmětu.

Znovuzískání této úplné informace o předmětu z hologramu je úkolem druhého stupně této metody, a to rekonstrukce obrazu předmětu z hologramu. Při rekonstrukci umístíme hologram v kolimovaném svazku monochromatického světla (obr. 5),

kteřý dopadá kolmo na hologram. Hologram se chová jako ohybová mřížka, což je způsobeno jemnou čárovou strukturou, která je zachycena ve výrazu $kA_0A \cos(\xi_c x - \varphi)$. Proto hologram obdobně jako ohybová mřížka vytváří spektrum nultého řádu ve směru dopadajícího svazku a dvě ohybová spektra prvního řádu, která nás hlavně

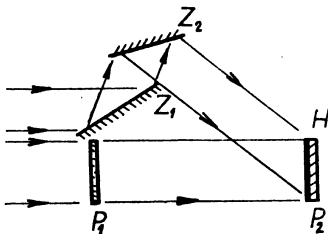


Obr. 5. Rekonstrukce dvousvazkového hologramu.

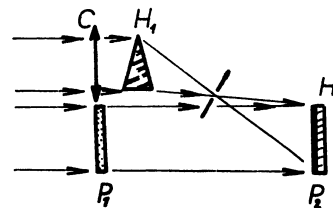
zajímají, protože obsahují užitečnou informaci o předmětu. Jedno z nich tvoří *reálný obraz* a druhé vytváří *virtuální obraz*. Světelné složky, které obsahují tyto mimoosové obrazy se nepřekrývají, oba obrazy jsou odděleny. Reálný obraz je možno snímat umístěním obyčejné fotografické desky do místa, kde se obraz vytváří. Virtuální obraz můžeme vyfotografovat fotografickým přístrojem nebo pozorovat vizuálně, podíváme-li se přes hologram do osvětlujícího laserového svazku. V nejjednodušším případě kolimovaných svazků dostaneme reálný obraz ve vzdálenosti z na jedné straně hologramu a virtuální obraz ve stejné vzdálenosti na druhé straně hologramu. Vzdálenost z je rovna vzdálenosti mezi předmětem a fotografickou deskou při záznamu hologramu, jestliže se k záznamu i k rekonstrukci použilo světlo stejné vlnové délky.

Ve většině případů vzniknou ohybové vlny druhého řádu a vyšších řádů, které tvoří v rekonstrukci obrazy ve vzdálenějších mimoosových polohách, a budou tedy odděleny od obrazů prvního řádu, které jsou nejintenzivnější.

Při záznamu hologramu dvousvazkovou metodou je možno použít různých uspořádání, která se liší způsobem, jak je referenční svazek odchýlen od svazku předmětového. Na obr. 1 je refe-



Obr. 6. Oddělení svazků pomocí soustavy dvou zrcadel. Z_1 a Z_2 — zrcadla, P_1 — průhledný předmět, P_2 — fotografická deska.



Obr. 7. Oddělení svazků pomocí hranolu, spojné čočky a clony.

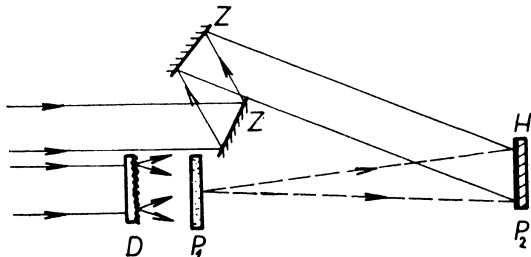
renční svazek odchýlen hranolem H_1 o malém lámavém úhlu. Není to však nejvhodnější způsob, chceme-li dosáhnout dobrých experimentálních výsledků. Hranol může způsobit astigmatismus, není-li svazek přesně rovnoběžný. Vady, které se vyskytují v referenčním svazku, jsou zavedeny také do hologramu a při rekonstrukci zhorší rekonstruovaný obraz předmětu.

Proto dáváme přednost zrcadlům pro odchýlení referenčního svazku. Používáme buď Lloydova zrcadla, nebo dvouzrcadlovou soustavu (obr. 6), která je vhodnější, protože u ní rozměr zrcadel nemusí být velký a může být srovnatelný s velikostí hologramu.

Velmi dobré je také uspořádání podle obr. 7. Hranol H_1 je zde kombinován s čočkou C , která nemusí být příliš kvalitní, aniž by to mělo vliv na kvalitu obrazu. Čočka fokusuje referenční svazek do ohniska, které leží mezi rovinami P_1 a P_2 . Vady dané soustavy odstraníme clonou. V tom případě i výsledný hologram a jeho rekonstrukce budou bez vad, které jsou způsobeny jak čočkou, tak hranolem. Clona sice ochuzuje referenční svazek o určitou část světla, kterou zachytí, ale tato ztráta nemá tak velký význam vzhledem k velikosti vad, které odstraní.

HOLOGRAMY S DIFÚZNÍM OSVĚTLENÍM

LEITH a UPATNIEKS použili v roce 1964 difúzního osvětlení předmětu v obvyklém dvousvazkovém záznamu hologramu (obr. 8). Difuzér D z opalového skla umístili mezi světelný zdroj a předmět P_1 při záznamu hologramu. Difuzér způsobí, že světlo původně koherentní má pak některé vlastnosti jako světlo nekoherentní, ale vlastnosti, které umožňují rekonstrukční proces, mu zůstanou. Světlo, které dopadá na předmět, nemá již přesně definovanou vlnoplochu, fáze a amplituda se náhodně mění bod od bodu. Tyto změny jsou však časově invariantní na rozdíl od osvětlení nekoherentního.



Obr. 8. Záznam hologramu s difúzním osvětlením předmětu.

Dvousvazkový hologram vytvořený s difúzním osvětlením předmětu dává při rekonstrukci reálný a virtuální obraz z ohybových vln prvního řádu. Oba rekonstruované obrazy mají mnoho zajímavých vlastností. Můžeme oba pozorovat vizuálně. Virtuální obraz vidíme při pohledu přes hologram na zdroj a je umístěn mezi hologramem a zdrojem, prakticky v místě původního předmětu. Reálný obraz při tomtéž pohledu se objevuje před hologramem, tj. mezi pozorovatelem a hologramem. Bez difúzního osvětlení bylo by vizuální pozorování obtížné. K vysvětlení tohoto jevu dospějeme, budeme-li uvažovat o tom, co se stane, jestliže pozorujeme propustný předmět osvětlený zezadu bodovým zdrojem. Kromě jistého rozptylu pozorujeme světlo jen z té části předmětu, která leží na spojnici zdroje s oční pupilou, což však bývá obvykle velmi malá část propustného předmětu. Když však umístíme mezi zdroj a předmět matnici, do oka se dostane současně světlo ze všech částí předmětu, takže předmět vidíme celý. Tuto úvahu můžeme aplikovat na případ hologramu tím,

že budeme uvažovat hologram jako záznam nejen předmětu, ale také difuzéru. Obraz, který vidíme při rekonstrukci, vypadá potom, jako by byl osvětlen difúzním zdrojem.

Druhým důsledkem difuzéru je zcela odlišný vzhled hologramu vzhledem k předcházejícímu typu hologramu (obyčejný dvousvazkový hologram). Hologram se nyní



Obr. 9. Hologram získaný s difúzním osvětlením předmětu (zvětšeno 120krát).

vůbec nepodobá předmětu, nejsou v něm pozorovatelné ohybové obrazce ani jemná čárová struktura proužkového obrazce. Hologram připomíná spíše záznam nějakého nepravidelného šumu. Při prohlédnutí hologramu mikroskopem vidíme hrubozrnnou strukturu (obr. 9), není to však zrno fotografické emulze, které je mnohonásobně jemnější, ale zaznamenaná informace o předmětu spolu s difúzním osvětlením.

Další, mnohem zajímavější vlastnost hologramu zaznamenaného s difúzním osvětlením předmětu je schopnost kterékoli části hologramu rekonstruovat celý obraz. Když rozdělíme desku hologramu na malé kousky, je možné dostat z každého kousku rekonstrukci obraz celého předmětu. Je to způsobeno tím, že světlo z každého bodu předmětu dopadá na celou záznamovou desku; to znamená, že informace z každého bodu předmětu je teď rozšířena na celou záznamovou desku. Jsou-li však kousky hologramu příliš malé, je rozlišení v obraze předmětu také malé a vlastní obraz je horší kvality. Přidáním dalších částí hologramu se rozlišení zlepší a obraz je pak dokonalejší.

Z rozšíření informace o předmětovém bodu na celou hologramovou desku plyne další usnadnění v experimentální práci s hologramy. Škrábance a nečistoty na hologramu nemají za následek ztrátu kvality obrazu v rekonstrukci. Také z porušeného hologramu dostaneme celý obraz předmětu. Srovnáme-li s obyčejnou fotografií, je to opravdu velká přednost.

Dynamická oblast fotografických procesů se značně zvýší. Malé velmi jasné plochy předmětu mají svou energii rozptýlenou po celé desce hologramu a rekonstrukci se energie opět vrátí na původní místo. Byly provedeny rekonstrukce předmětů, v nichž se intenzita v jednotlivých oblastech lišila o 40 až 50 dB. Fotografická deska je přímo schopna zaznamenat maximálně rozsah 20 dB.

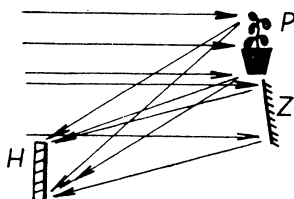
Některé vlastnosti hologramů je možno vysvětlit tím, že hologram představuje záznam původního předmětu neboli signálu. Ve skutečnosti jsou to dva odlišné záznamové procesy. Prvním je obyčejná prostorová disperze, v níž je každý rozlišitelný prvek předmětu zakódován do funkce, která pokrývá celou desku hologramu. Tento

disperzní záznam je podstatou všech technik rekonstrukce vlnoplochy. S difúzním osvětlením předmětu je disperze mnohokrát větší než u dřívějších metod. Druhá fáze kódovacího procesu, kterou zahrnuje technika difúzního osvětlení, záleží ve zvětšení šířky signálu složením prostorového frekvenčního spektra se spektrem difúzního osvětlení, které můžeme považovat za šumový signál se širokým jednotným prostorově frekvenčním spektrem. Jestliže osvětlíme předmět difúzním světlem a provedeme záznam hologramu, bude prostorově frekvenční spektrum hologramu mnohem větší než spektrum propustného předmětu. Takové zakódování zavádí do hologramu redundanci, což znamená, že je zaznamenána větší frekvenční šíře, než vyžaduje informační obsah signálu. Tím by snad mohla být vysvětlena necitlivost metody na nedokonalosti, které mohou být zahrnuty do šumu.

HOLOGRAFIE TROJROZMĚRNÝCH PŘEDMĚTŮ

Pomocí dvousvazkové metody je možno také dělat hologramy a rekonstrukce difúzně i zrcadlově odrážejících předmětů. Tyto hologramy mají všechny vlastnosti hologramů s difúzně osvětlenými předměty, které jsme v předcházející části uvedli.

Při záznamu hologramu časově a prostorově koherentní zdroj osvětluje trojrozměrný předmět (*obr. 10*). Světlo odražené od předmětu *P* dopadá na fotografickou desku *H*, která je umístěna v určité vhodné vzdálenosti od předmětu. Vysoce kvalitní



Obr. 10. Záznam hologramu trojrozměrného předmětu.

Z — zrcadlo, *P* — předmět, *H* — fotografická deska.

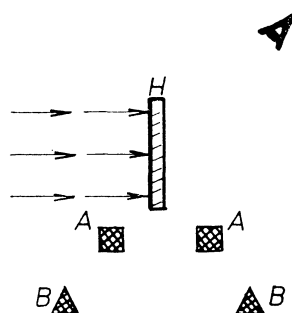
zrcadlo *Z*, které přiléhá k předmětu, dostává část koherentního osvětlení a odráží je na fotografickou desku *H*. Svazek, který dopadá na zrcadlo, je v tomto případě referenční.

Rekonstrukci provádíme obvyklým způsobem, a to tak, že hologram umístíme v časově a prostorově koherentním světelném svazku. Vznikají dva očima viditelné obrazy.

Virtuální obraz uvidíme, podíváme-li se přes hologram do osvětlujícího svazku. Obraz má přesnou podobu původního předmětu. *Trojrozměrný efekt* je takový jako u normální stereofotografie, ale není k němu třeba dvou fotografií, neboť zcela stačí jedna hologramová deska. Navíc však tento obraz na rozdíl od stereofotografie jeví změnu perspektivy, jestliže při pozorování obrazu pohneme hlavou. Existuje paralaxa mezi blízkými a vzdálenými body, která je shodná s paralaxou bodů při přímém pohledu na předmět. Můžeme se také podívat kolem předmětu v obraze, například

jestliže některý předmět překáží při pozorování jiného předmětu, který leží za ním. Změnou polohy hlavy se můžeme podívat kolem prvního předmětu a zjistit, že druhý předmět leží skutečně za ním, právě tak, jako kdybychom se dívali na původní scénu.

Reálný obraz vzniká před deskou a můžeme jej snadno snímat pouhým umístěním fotografické desky do určité vhodné polohy. Protože obraz je trojrozměrný, můžeme



Obr. 11. Inverze stereoskopického efektu.

VIRTUÁLNÍ OBRAZ REÁLNÝ OBRAZ

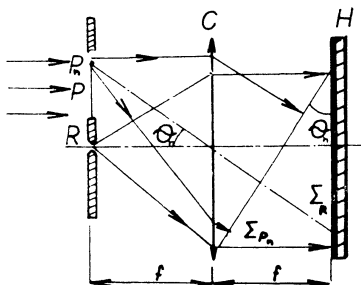
si „zaostřit“ na kteroukoliv část předmětu. Reálný obraz je možno pozorovat i pouhým okem, ale máme při tomto pozorování určitou nesnáž v umístění očí, která plyne z fyziologické optiky. Vzhledem k této nesnázi dáváme při vizuálním pozorování přednost virtuálnímu obrazu.

Reálný a virtuální obraz jsou ve většině případů identické. Reálný obraz však jeví inverzi stereoskopického efektu. Jestliže pozorujeme virtuální obraz (oko v horní části obr. 11), vidíme předmět *A* před předmětem *B* tak, jak tomu je ve skutečnosti. Jsou-li obrazy předmětů *A* a *B* v přímce s okem pozorovatele, virtuální obraz předmětu *A* zakryje virtuální obraz předmětu *B*. Abychom mohli pozorovat reálný obraz, dáme oči do dolní polohy podle obr. 11, v níž reálný obraz předmětu *B* je blíže oku než reálný obraz předmětu *A*. Pohneme-li hlavou, je paralaxa mezi reálnými obrazy předmětů *A* a *B* v souladu s jejich polohami. Zajímavý jev však nastane, jestliže reálné obrazy předmětů *A* a *B* jsou při pozorování v jedné přímce s okem pozorovatele. V tom případě je reálný obraz předmětu *B* blíže než reálný obraz předmětu *A*, který takto by měl být zatemněn. Avšak ve skutečnosti blízký obraz předmětu *B* zmizí a vidíme vzdálenější obraz předmětu *A* přes otvor, který byl vytvořen zničením blízkého obrazu předmětu *B*.

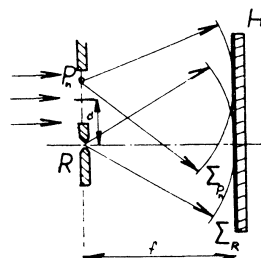
FOURIEROVY HOLOGRAMY

Fourierova transformace dříve vyžadovala v optice fokusující čočkový nebo zrcadlový systém. Fourierova transformace rozdělení komplexní amplitudy pole se vytvářela v ohniskové rovině fokusujícího systému. G. W. STROKE se svými spolupracovníky zjistil, že existuje uspořádání, jímž je možno získat „bezčočkový hologram Fourierovy transformace“ [8], [9].

Mějme nejprve bodový zdroj R (obr. 12), který leží v předmětové rovině čočky C , a vytváří referenční svazek. Každý bod P_n předmětu P vytvoří v blízkosti hologramu rovinné vlnoplochy Σ_{P_n} , které svírají s referenčními vlnoplochy Σ_R úhly ϑ_n , které jsou určeny souřadnicemi bodů P_n . Výsledný záznam na fotografické desce H je hologram Fourierovy transformace.



Obr. 12. Záznam Fourierova hologramu.



Obr. 13. Záznam bezčočkového Fourierova hologramu.

Při rekonstrukci se v hologramu vytvoří systém rovinných vlnoploch, které vycházejí z hologramu pod různými úhly ϑ_n . Čočka, která rekonstruuje obraz předmětu, transformuje prostor směrů do prostoru souřadnic a ve výstupní rovině se objeví rekonstruovaný systém bodů P_n , které tvoří obraz původního předmětu P .

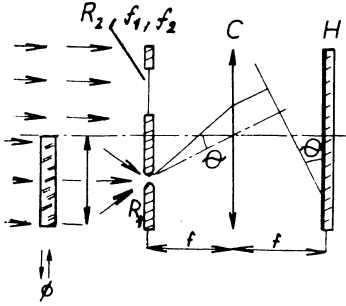
V obr. 13 je hologram získán bez čočky C interferencí sférických vln Σ_{P_n} a Σ_R téže křivosti, které vycházejí z předmětových bodů P_n a z bodového referenčního zdroje R . Výsledný hologram je identický s hologramem podle obr. 12. Dostali jsme takto hologram, který je záznamem bezčočkové Fourierovy transformace.

Z tohoto hologramu získáme rekonstrukci pomocí Fourierovy transformace obraz tím, že umístíme hologram do kolimovaného svazku a obrazy potom můžeme zachytit na fotografickou desku v ohniskové rovině čočky, umístěné těsně za hologramem. Tak se vytvoří dva reálné mimoosové obrazy, které jsou charakteristické pro danou transformaci. Obrazy jsou navzájem otočeny o π .

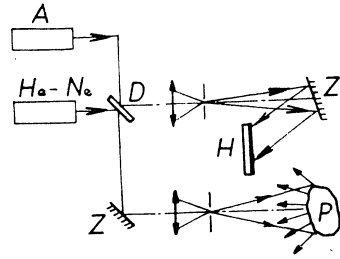
Bezčočková Fourierova transformace hologramu a Fourierova transformace rekonstrukce tohoto hologramu byly již provedeny. Rozlišení a zvětšení systémů bezčočkové Fourierovy transformace jsou určeny stejnými úvahami jako v systémech Fourierovy transformace, které užívají fokusujících prvků.

Bezčočková Fourierova transformace hologramu byla dokonce rozšířena na trojrozměrné předměty. Přitom se zjistilo, že rozlišení v obrazech předmětů se zvětšilo ve srovnání s předcházejícím typem hologramu (obyčejný dvousvazkový hologram). K záznamu hologramu se přitom použilo fotografických desek s mnohem hrubší emulzí.

Dříve se pod pojmem filtrace v optice rozuměla filtrace pomocí masek nebo „komplexní“ násobení ohybových obrazců. „Skutečný“ *optický filtrační proces* požaduje „komplexní“ sčítání obrazů nebo jejich ohybových obrazců. Toto „komplexní“ sčítání obrazů nebo jejich odčítání bylo nazváno *optickou obrazovou syntézou* [10]. Tato metoda je založena na holografii pomocí Fourierovy transformace.



Obr. 14. Optická obrazová syntéza holografickou Fourierovou transformací.



Obr. 15. Záznam hologramu barevného trojrozměrného předmětu.

D. GABOR a G. W. STROKE se svými spolupracovníky dělali pokusy s uspořádáním podle obr. 14. Byla provedena obrazová syntéza získaná „odečtením“ komplexní funkce obrazové propustnosti f_2 od komplexní funkce obrazové propustnosti f_1 . Hlavním prvkem v tomto uspořádání je „fázová deska“ φ , která se použije k získání žádaného odečtení tím, že místo odečtení f_2 přičteme f_2 s fázovým posuvem π . Fázová deska tvoří interferenční proužky v hologramové rovině s referenčním bodovým zdrojem R_2 , což umožní nastavení fázového rozdílu.

Prakticky provedeme záznam hologramu ve dvou stupních. V prvním provedeme záznam $T[f_1]$ s referenčním svazkem bez fázové desky φ . Ve druhém stupni použijeme v referenčním svazku fázovou desku φ , takže předmět f_2 je zaznamenán s fázovým posuvem π . V latentním obrazu hologramu se tedy sčítají tyto funkce: koherentní pozadí + $T[f_1]$ + $T[f_2 \exp(-i\pi)]$, kde $T[f_1]$ a $T[f_2]$ jsou Fourierovy transformace funkcí f_1 a f_2 .

Fourierovu transformaci rekonstrukce „obrazové syntézy“ dostaneme v ohniskové rovině čočky umístěné těsně za hologramem tak, že necháme projít hologramem zaznamenaným podle obr. 14 rovinnou časově a prostorově koherentní vlnoplochu. Objeví se nám hlavní neoslabené maximum a současně oba mimoosové obrazy, v nichž zůstává jenom rozdíl obou funkcí. Odečtená část z obou obrazů zmizí.

Z toho je zřejmé, že po sobě následující sčítání intenzit v latentním fotografickém obraze při záznamu hologramu je ekvivalentní současnému sčítání komplexních

amplitud v interferometru. Předcházející postup se stal základem *holografické intenzitní interferometrie*. Dvousvazkové interferogramy, které se získávají touto metodou, nejsou zatíženy vadami interferometrických prvků.

Z tohoto postupu dále plyne, že na jednu fotografickou desku je možno zaznamenat více hologramů. U průhledných předmětů je možná tzv. *koherentní superpozice*, která záleží v tom, že průhledné předměty se exponují současně s jedním referenčním svazkem.

U trojrozměrných předmětů se používá *nekoherentní superpozice*, která záleží v násobné expozici fotografické desky. Aby obrazy předmětů v rekonstrukci byly oddělitelné, umístí se předměty při záznamu hologramu buď v různých nepřekrývajících se polohách v prostoru a každý předmět je zaznamenán zvlášť, nebo se předměty pokládají postupně na totéž místo a mění se pro každý předmět směr referenčního svazku. Tyto násobné expozice jsou omezeny rozlišovací schopností fotografické emulze. Teoreticky bylo vypočteno pro emulzi Kodak 649 F, že na jednu fotografickou desku může být zaznamenáno $0,35 \cdot 10^5$ hologramů, prakticky však 200, neboť jinak by deska úplně zčernala a při rekonstrukci by nepropustila žádné světlo, obrazy by se nevytvořily. Doposavad se však podařilo zaznamenat maximálně na jednu fotografickou desku sedm hologramů, u nichž i rekonstrukce byly kvalitní.

BAREVNÁ HOLOGRAFIE

První barevnou rekonstrukci průhledného předmětu provedli K. S. PENNINGTON a L. H. LIN. Na trojrozměrné předměty barevnou holografii rozšířili A. A. FRIESEM a R. J. FEDOROWITZ. Použili uspořádání podle *obr. 15*.

Dvě spektrální složky 488,0 nm a 514,5 nm, které současně vysílá argonový laser, kombinovali se světlem 632,8 nm z helium-neónového laseru v děliči svazku *D*. Z děliče vycházely dva svazky, z nichž každý obsahoval tři spektrální složky. Jeden svazek byl užit jako referenční, druhý osvětloval trojrozměrný barevný předmět *P*. Referenční svazek interferuje se světlem odraženým od předmětu na fotografické desce *H*, která je umístěna kolmo k osám obou svazků.

V rekonstrukci, která byla provedena opět ve třech vlnových délkách, obdrželi trojrozměrný barevný obraz předmětu. Jednotlivé barvy rekonstruovaných předmětů nebyly shodné s barvami pozorovanými na předmětu při bílém osvětlení, ale tato okolnost plyne z kolorimetrického diagramu daných tří barev. Obraz nebyl rozmazán, protože úhel svazků byl dostatečně velký, aby zaručoval prostorovou nosnou frekvenci schopnou odlišit málo se lišící vlnové délky. Pro velké úhly svazků se chová vyvolaná emulze jako prostorová mřížka, takže při rekonstrukci musí být splněna Vulf-Braggova podmínka $2d \sin \alpha = n\lambda$. Difrakce tedy vzniká jen pro danou orientaci hologramu a danou vlnovou délku světla užitého k rekonstrukci.

POŽADAVKY PRO EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCI V HOLOGRAFII

I když holografie nachází uplatnění v různých oborech lidské činnosti, stále o ní ještě platí, že je pouze laboratorní metodou a pravděpodobně zatím ještě neopustí stěny laboratoří. Toto tvrzení není nijak přehnané, všimneme-li si poněkud blíže skutečného uspořádání při záznamu a rekonstrukci hologramů a také požadavků, které se kladou na experimentální práci v holografii.

a) Zdroje koherentního záření

Jak už jsme dříve uvedli, zdroj musí být časově i prostorově koherentní a dostatečně intenzivní, aby informace o předmětu mohla být vůbec zachycena a také znovu obnovena při rekonstrukci obrazu předmětu. Těmto požadavkům nejlépe vyhovuje kontinuální plynový *hélium-neonový laser*, který pracuje na vlnové délce 632,8 nm.

Další kontinuálně pracující laser je *argonový*. Vysílá koherentní záření o vlnových délkách 488,0 nm a 514,5 nm. Je zvláště vhodný pro barevnou holografii.

Pro záznam rychle se měnících jevů se používá také *pulsní rubínový laser*, který vysílá koherentní záření o vlnové délce 694,1 nm.

Výkony laserů užívaných v holografii se pohybují řádově od desetin až po stovky mW.

b) Prostředí záznamu hologramu

Informace o předmětu je v hologramu ukryta v jemných změnách interferenčních proužků. I při malých úhlech, které svírají referenční a předmětový svazek, je počet interferenčních proužků na 1 mm větší než 100. Proto je nutné, aby materiály pro záznam hologramů měly rozlišovací schopnost značně větší než 100 čar na milimetr.

Zatím se nejvíce používají fotografické desky. Nejvhodnější z nich jsou desky *Kodak typ 649 F (0,05ASA)*. Firma uvádí, že mají rozlišovací schopnost větší než 2000 čar na milimetr, měření však ukázala, že mívají až 10 000 čar na milimetr. Na tyto desky je možno zaznamenat interferenční obrazec dvou svazků, ať je jejich úhel jakkoliv velký. Vysoká rozlišovací schopnost fotografické emulze však znamená velmi malou citlivost; proto expoziční doby jsou řádově minuty až hodiny i pro lasery s výkonem mW.

Zpočátku se v holografii používaly pouze fotografické desky, v poslední době se také pracuje se svitkovými filmy. Vysoce kontrastní filmy mají sice menší rozlišovací schopnost, ale jejich citlivost je několikrát větší, takže expoziční doby se zkrátí na sekundy. V literatuře se uvádějí tyto filmy: *Kodak high contrast copy microfilm* se 400 čarami na milimetr, *Kodak special high definition aerial film SO-243* s 500 čarami na milimetr (300krát citlivější než 649 F), *Agfa Agepan FF* s 500 až 600 čarami na milimetr (25ASA).

V naší republice Fotochema vyrábí filmy s rozlišovací schopností 140 až 160 čar na milimetr, což je pro holografii málo. Dostupné nám mohou být desky firmy *ORWO Mikrat-Platte, panchromatisch, LP 1* s rozlišovací schopností 520 čar na milimetr. Firma *Agfa Gewaert* vyrábí nyní speciální fotografické desky určené přesně pro daný typ laseru. Mají rozlišovací schopnost až 3000 čar na milimetr, přičemž jejich citlivost je podstatně větší než u desek *Kodak 649 F*.

Kromě fotografických materiálů se v aplikacích až dosud použilo pro záznam hologramu fotocitlivých skel, televizní kamery a elektrostaticky nabitě plochy používané v xerografii.

c) *Stabilita uspořádání*

Záznamy hologramů můžeme provádět jen při maximální stabilitě všech prvků. V literatuře se uvádí stabilita $1/8$ vlnové délky použitého záření během expozice. Nejvhodnější je proto konat pokusy v noci, aby stabilita byla co nejméně rušena, v místnosti pokud možno sklepní. Jako pracovní stůl je vhodné užít velmi masivního dřevěného stolu.

Podstavce, které drží jednotlivé prvky uspořádání, musí být rovněž masivní a stabilní. Celá místnost, v níž se pokusy provádějí, musí být tepelně stabilizována, aby nenastala nějaká dilatace během expozice; také všechna proudění jsou nežádoucí.

Při tvoření hologramů trojrozměrných předmětů v odraženém světle je nutno dodržet dvě základní podmínky, aby rekonstrukce obrazů byla zdařilá. U propustných předmětů tyto podmínky není třeba zdůrazňovat, protože platí samozřejmě.

1. *Koherenční délka zdroje musí být větší než maximální dráhový rozdíl světla mezi referenčním a předmětovým svazkem.* Hloubka záběru musí být také menší než koherenční délka zdroje. Při použití laserového zdroje pečlivě justovaného je koherenční délka zdroje řádově decimetry.

2. *Odrážející předmět musí být nehybný ($1/8$ vlnové délky použitého záření během expozice).* Toto omezení musí být bráno v úvahu hlavně u plynových laserů. U pulsních laserů nemusíme dávat velký pozor, protože při trvání pulsu $3 \cdot 10^{-8}$ s při vlnové délce světla 694,1 nm způsobí pohyb předmětu rychlostí 2 m/s pouze rozdíl $1/10$ vlnové délky; to znamená, že i v tomto případě nám hologram zajistí kvalitní rekonstrukci.

Obecně jsou požadavky na stabilitu obdobné jako v interferometrii.

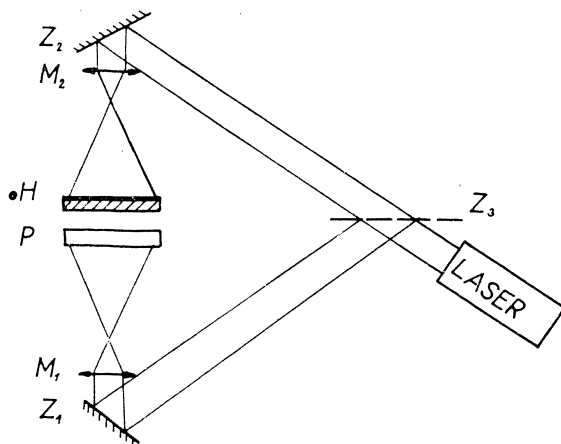
APLIKACE HOLOGRAFIE

Holografie byla od počátku spjata s mikroskopií, neboť D. GABOR při snaze zlepšit rozlišovací schopnost elektronového mikroskopu tuto metodu zobrazení objevil. Proto po zdokonalení holografie se mnozí pracovníci pokoušejí zkonstruovat *holografický mikroskop*. První holografický mikroskop zvětšoval 150krát, ovšem pouze průhledné preparáty. Princip zvětšení zde záleží v použití dvou divergentních svazků, jeden je předmětový, druhý referenční, které spolu interferují v rovině fotografické desky. Při rekonstrukci obrazů se používá opět divergentního svazku, a tím se dosahuje dalšího zvětšení obrazu. Může zde vzniknout také přídatné zvětšení, a to tím způsobem, že záznam hologramu se provádí ve světle o kratší vlnové délce. Přídatné zvětšení je dáno poměrem vlnových délek při rekonstrukci a záznamu.

V současné době holografický mikroskop nemůže konkurovat obyčejnému mikroskopu ve viditelné oblasti spektra. Ovšem v oblasti rentgenového záření má holografický mikroskop velkou budoucnost, protože zvětšení při rekonstrukci hologramu

viditelným světlem by se blížilo miliónu a snad by bylo možno dosáhnout teoretické rozlišovací meze 1 \AA .

Pozoruhodné schéma mikroskopie navrhli G. W. STROKE a A. LABEYRIE. Princip metody je založen na Lippman-Braggově efektu [11]. Záznam hologramu je zřejmý z obr. 16. Referenční svazek dopadá na opačnou stranu fotografické desky H než předmětový svazek, který prochází průhledným preparátem P. Po vyvolání fotografické desky vznikne v celém objemu fotografické emulze prostorová mřížka z ustáleného stříbra. Vzdálenost jednotlivých vrstev ustáleného stříbra



Obr. 16. Záznam Lippmann-Braggova hologramu. Z_1 a Z_2 — zrcadla, Z_3 — částečně propustné zrcadlo (dělič svazku), M_1 a M_2 — mikroskopické objektivy, P — preparát.

je rovna polovině vlnové délky použitého světla. K záznamu hologramu je tedy nutné použít fotografické desky s velmi vysokou rozlišovací schopností. Osvětíme-li vyvolaný hologram svazkem bílého světla, který má stejnou křivost jako referenční svazek při záznamu hologramu, dostaneme v místě původního preparátu obraz preparátu se všemi vlastnostmi prostorového vjemu. Hologram si tedy vybere z bílého světla jen tu složku, která odpovídá Braggovu zákonu. Jestliže použijeme pro záznam hologramu argonového laseru, který vysílá koherentní záření vlnových délek 457,9 nm, 476,5 nm, 488,0 nm, 496,5 nm, 501,7 nm, 514,5 nm a helium-neonového laseru s vlnovou délkou 632,8 nm, vytvoří se na hologramu prostorové mřížky odpovídající jednotlivým vlnovým délkám. V rekonstrukci při osvětlení hologramu bílým světlem nastane superpozice jednotlivých barevných složek, takže dostaneme *barevný obraz předmětu*.

Mikroskopie se také zabývá zkoumáním fázových předmětů. Jsou to takové předměty, jejichž amplituda ve světelném poli je konstantní, kdežto fáze se mění. Pro jejich zkoumání je holografická metoda také vhodná. Vlnoplochy, které jsou při rekonstrukci hologramem difragovány, obsahují informaci o rozdělení amplitud v předmětu i o rozdělení fáze v předmětu. Amplituda i fáze mohou proto být odděleny z rekonstruované vlnoplochy například vhodnou filtrací rekonstruovaných obrazů nebo ohybových obrazců před záznamem konečného obrazu na film. Z toho plyne, že můžeme „ukázat“ fázi v holograficky rekonstruovaných obrazech fázových předmětů pomocí některé z metod, které mění fázové změny v amplitudové, což se už delší dobu v mikroskopii užívá. Hologramy fázových předmětů a jejich rekonstrukce byly už úspěšně provedeny.

Holografie je možno též použít *ke korekci sférické vady čočky*, a to tím způsobem, že vyrobíme hologram vlnoplochy, která vychází z čočky zatížené sférickou vadou [12]. Při zobrazování čočkou se hologram umístí vzhledem k čočce do téže polohy, kterou zaujímal při záznamu vlnoplochy. Tvoří takto s vadnou čočkou jeden celek

a zcela koriguje sférickou vadu dané čočky. Předností této metody je, že korekční destičku složitého asférického tvaru získáme automaticky bez složitých výpočtů. Nevýhodou však je, že korekce je provedena pouze pro jednu vlnovou délku, a to proto, při níž byl hologram zaznamenán. Další nevýhodou je značná ztráta světla, protože pouze 5% až 10% světla, které na hologram dopadá, připadá na první ohybový řád, jehož se ke korekci vlastně užívá. Částečně lze tuto ztrátu odstranit bělením desky v roztoku HgCl_2 . Při zobrazování korigovanou čočkou se musí volit monochromatické světlo, protože hologram se vždy chová jako ohybová mřížka. Částečně se zmenší zorné pole, protože ohybové řády hologramu se nesmějí překrývat. Hologram zcela koriguje sférickou vadu, jiné vady však sám zavádí. Vhodným uspořádáním lze tyto vady hologramem zaváděné odstranit až na distorzi.

B. P. Hildebrand a K. A. Haines použili holografické metody *k optickému zkoumání namáhaných povrchů*. Princip metody je tento: zaznamenáme hologram nedeformovaného povrchu, fotograficky jej zpracujeme a umístíme zpět do původní polohy. Jestliže se na zkoumaném povrchu neobjeví interferenční proužky, nastavili jsme hologram přesně do původní polohy. Je-li potom povrch namáhán, objeví se na zkoumaném povrchu interferenční proužky, které můžeme buď přímo pozorovat očima, nebo znovu zaznamenat na další hologram. Velikost namáhání povrchu je možno vypočítat z hustoty interferenčních proužků. Výhoda spočívá v tom, že pozorované povrchy se nemusí předem opracovávat, leštit a podobně a navíc se nemusí brát pouze vzorky pro zkoušení, nýbrž se může zkoumat část kompaktního předmětu.

Obdobou předcházející metody je použití holografie ke *zkoumání malých vibrací*. Metodu opracovali R. L. Powell a K. A. Stetson.

Obdobným způsobem by se daly sledovat *termické expanze, vlhkost, absorpce, změna indexu lomu nebo jiných optických konstant*. Pokusy už byly provedeny v měření akustických vibrací ve vodě a byla takto sledována plazma, která vzniká při záblesku rubínového laseru.

Uspořádání při záznamu hologramu podle obr. 1 může fungovat jako *holografický interferometr*, který však není zatížen vadami interferometrických prvků.

Dále se mohou hologramy používat jako *paměťové prvky* v samočinných počítačích, kde mohou současnou rychlost operací zvýšit až 10^5 krát vzhledem k nynějším nejrychlejším počítačům. První optické analogové počítače byly sestaveny v roce 1965.

V *radiolokaci* se používá hologramů *při analýze rádiových signálů*, které přicházejí od víceprvkových antén. Podle výpočtů může takové optické zařízení současně zpracovávat signály, které přicházejí ze soustavy 10^4 dipólů. Tím jsou dány další možnosti zvýšení rozlišovací schopnosti radioteleskopů a radiolokátorů.

Ze schopnosti hologramu rekonstruovat obrazy trojrozměrných předmětů, které mají všechny vlastnosti jako původní předměty, tedy i trojrozměrnost, vyplývá další použití holografie v *trojrozměrné televizi*. První „laboratorní“ pokusy přenosu obrazu už byly úspěšně provedeny.

Princip televize pracující pomocí holografie je tento: Snímaný záběr osvětluje více laserů (aby stíny nebyly příliš ostré), které musí být navzájem koherentní. Světlo, které je předměty rozptý-

leno, dopadá na speciální holokameru, která je vlastně fotodetektozem. Fotodetektor přemění světelný signál v elektrický, který se přenáší. Obdobné zařízení, které pracuje v opačném směru, je v přijímači; proto v každém přijímači musí být umístěn laser. Dalším požadavkem je mnohem větší řádkování na obrazovce, což je také velmi nákladné. Navíc se zde přidává nemilá skutečnost, že doposavad není vyřešen problém zvětšování v holografii trojrozměrných předmětů. Mimoto pohyblivé předměty je možno zaznamenávat jen pulsními lasery. Z toho všeho plyne, že vytvoření komerčního systému trojrozměrné televize, která by v sobě obsahovala přednosti obyčejné televize a holografické metody zobrazení, je dosti složitým úkolem.

ZÁVĚR

V poslední době se věnuje velké úsilí aplikacím holografie v nejrůznějších oborech. Provádějí se pokusy v mikrovlnné oblasti (centimetrové vlny), v radiotechnice, získávají se hologramy předmětů pod vodou i pomocí ultrazvuku (pomocí frekvence 6 MHz).

Četné práce jsou věnovány možnosti rekonstrukce hologramu v bílém světle, což ještě umožní další rozvoj holografie. Hologramy získané fokusací obrazu předmětu do roviny fotografické desky je též možno rekonstruovat v bílém světle. Takto by i holografická televize byla reálnější, protože bychom v přijímači nepotřebovali laser k rekonstrukci obrazu.

I když si již holografie získala své místo v laboratoři (například holografická interferometrie), je její praktické využití mimo laboratoř zatím omezeno. Další rozšíření holografie do značné míry závisí na vývoji nových laserů. Je však třeba seznámit s principy holografie odborníky různých profesí, kteří by zhodnotili možnost jejího využití.

Literatura

- [1] GABOR, D., *Nature* 161 (1948), 777.
- [2] LEITH, E. N., UPATNIEKS, J., *Journal of the Optical Society of America* 52 (1962), 1123.
- [3] LEITH, E. N., UPATNIEKS, J., *Journal of the Optical Society of America* 53 (1963), 1377.
- [4] LEITH, E. N., UPATNIEKS, J., *Journal of the Optical Society of America* 54 (1964), 1295.
- [5] DĚNISJUK, J. N., *Doklady Akadēmii nauk SSSR* 144 (1962), 1275.
- [6] DĚNISJUK, J. N., *Optika i spěktroskopija* 15 (1963), 522.
- [7] DĚNISJUK, J. N., *Optika i spěktroskopija* 18 (1965), 275.
- [8] STROKE, G. W., *Applied Physics Letters* 6 (1965), 201.
- [9] STROKE, G. W., BRUM, D., FUNKHOUSER, A., *Journal of the Optical Society of America* 55 (1965), 1327.
- [10] GABOR, D., STROKE, G. W., RESTRICK, R., FUNKHOUSER, A., BRUMM, D., *Physics Letters* 18 (1965), 116.
- [11] STROKE, G. W., LABEYRIE, A. E., *Physics Letters* 20 (1966), 368.
- [12] UPATNIEKS, J., LUGT, A. V., LEITH, E. N., *Applied Optics* 5 (1966), 589.