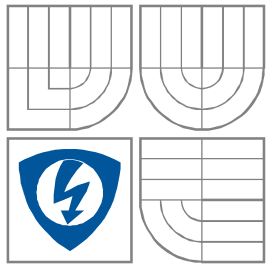


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

HOLOGRAFICKÉ ZÁZNAMY HOLOGRAPHIC RECORDS

SEMESTRÁLNÝ PROJEKT
BACHELOR'S PROJECT

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Michal Žáčik

VEDÚCI PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Michal Žáčik

ID: 111171

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Holografické záznamy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte aktuální stav v oblasti holografie a záznamu. Zaměřte se na celé spektrum frekvencí a metod záznamu, typy a kategorie záznamových médií. Proveďte rešerši z uvedené oblasti a přehledně ji zpracujte. Zvolte metodu záznamu a navrhnete laboratorní úlohu holografického záznamu. Zpracujte teoreticky metodiku holografického záznamu zvolené metody pro realizaci v laboratoři. Podle dostupných informací a zdrojů realizujte laboratorní úlohu holografického záznamu. Analyzujte dosažené výsledky a porovnejte je s teoretickými závěry, zhodnoťte kvalitu záznamu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] OKUGAWA, T., HOTATE, K. Real-time optical processing by synthesis of the coherence function using real-time holography, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 8, no. 2, 1996.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 28.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Michal Žáčik
Bytem: Podzámska 29, Hlohovec, 920 01
Narozen/a (datum a místo): 14. januára 1988 v Dunajskej Strede

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Holografické záznamy
Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.
Ústav: Ústav radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 27. května 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoj semestrálny projekt na tému Holografické záznamy som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálneho projektu a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedeného semestrálneho projektu ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohto projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 4. januára 2010

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu semestrálneho projektu doc. Ing. Pavlovi Fialovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní môjho semestrálneho projektu.

V Brne dňa 4. januára 2010

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Holografické záznamy sú pomerne novou technológiou. Ich využitie má veľmi široké spektrum. Uplatňujú sa v strojárstve, geológii, medicíne, komunikačných technológiách a v bezpečnostnej technike. Tento dokument sa zaoberá stručnou históriou holografie, jej základnými princípmi a vlastnosťami použitých vln. Jednotlivé typy holografie sú tu rozdelené prehľadne podľa frekvencie (vlnovej dĺžky) použitej vlny. Práca sa ďalej venuje požiadavkám na materiály vhodné pre záznam a popisuje niektoré z používaných materiálov. Objasnený je aj základný princíp rekonštrukcie hologramu. Bola navrhnutá metóda záznamu hologramu pre MHz frekvencie a tiež vhodný materiál pre záznam.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hologram, vlastnosti hologramu, holografická rovnica, záznam hologramu, holografia, rekonštrukcia hologramu, fázový hologram, MHz holografia.

ABSTRACT

Holographic records are relatively new technology. Their application is very wide. They apply in engineering, geology, medicine, communication technologies and in security services. This document discuss about short history of holography, basic principles and properties of used waves. Single types of holography are divided by frequency (wavelength) of used wave. This work addicts to requirements of material properties that are applicable for recording and describes some of materials used for recording. There is also illustrated the basic principle of reconstruction of hologram. There is intended a method of recording hologram for MHz frequencies and also a suitable recording material.

KEYWORDS

Hologram, hologram properties, holographic equation, hologram recording, holography, hologram reconstruction, phase hologram, MHz holography.

ŽÁČEK, M. *Holografické záznamy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 29 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Pavel Fiala, Ph.D.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Vlastnosti snímanej vlny.....	2
2.1	Vlastnosti	2
2.2	Holografická rovnica	4
2.3	Vznik hologramu	5
2.4	Fázové hologramy	6
3	Rozdelenie holografie podľa frekvencie vlny (vlnovej dĺžky):	8
3.1	Akustická holografia.....	8
3.2	Ultrazvuková holografia	11
3.3	Gigahertzová (mikrovlnná) holografia	13
3.4	Terahertzová holografia.....	15
3.5	Optická holografia	17
3.6	Rentgénová (X-ray) Holografia.....	18
4	Záznam hologramu	21
4.1	Záznamové prostredie.....	21
4.2	Metódy záznamu fázového hologramu.....	24
4.3	Záznamový materiál	28
4.4	Perspektívne materiály pre záznam v pásme MHz vln.....	31
5	Rekonštrukcia (kvalita)	33
6	Záver	36

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Rekonštrukcia z úlomku hologramu [1];	3
Obrázok 2 Záznam hologramu na ľubovoľne malej časti holografickej dosky [1];	3
Obrázok 3 Princíp záznamu hologramu [7].	5
Obrázok 4 Kolísanie hrúbky termoplastickej dosky pri zázname.	6
Obrázok 7 Akustický obraz Britskej pence [3];	9
Obrázok 8 Holografické interferogramy ohybových vibrácií plochých povrchov [5];	11
Obrázok 9 Holografický obraz ultrazvukového pulzu ($\tau_i=5\mu s$) [5].	12
Obrázok 10 Holografické interferogramy [5].	12
Obrázok 11 Schématický diagram impulznej holografie akustického poľa ultrazvukového čidla [5];	13
Obrázok 12 Metodológia aplikácie mikrovlnnej holografie pre komplexné dáta v ďalekom poli [10];	14
Obrázok 13 Rekonštrukcia písmen CNU [6];	16
Obrázok 14 Praktická implementácia optického skenovacieho systému [8].	17
Obrázok 15 Holografia s atomárnym rozlíšením [9].	19
Obrázok 16 Závislosť lineárneho absorpčného koeficientu $\mu(k)$ zameraná na planárnej doštičke kryštálu CoO pri energii zväzku 13 keV [9].	20
Obrázok 17 Holografická rekonštrukcia atómov kobaltu v kryštalografickej rovine (001) [9].	20
Obrázok 18 klasický záznam hologramu [1];	22
Obrázok 19 Schéma ukladania dát [2].	22
Obrázok 20 Schéma čítania dát [2].	23
Obrázok 21 Ultrazvuková holografická kamera s detektorom z tekutého kryštálu. [14]	24
Obrázok 22 Prierez konvertorom z tekutého kryštálu [14].	25
Obrázok 23 Počítačová simulácia „odpruhovacieho“ procesu digitálneho hologramu. (a) 5 vzoriek za periódu s dvoma hodnotami kontrastu. (b) Filtrovanie pomocou DP. (c) Rozdiel (a) v absolútnej hodnote. (d) Filtrovanie (c), pomocou DP [14].	26
Obrázok 24 Princíp metódy [15].	27
Obrázok 25 Požiadavky pre záznam hologramu [10].	30
Obrázok 26 Známe druhy materiálov pre záznam jednotlivých druhov holografie.	31
Obrázok 27 Cis-trans vzájomná premena a zmena LC počas ožiarenia [19].	31
Obrázok 28 Štruktúra záznamového materiálu [17].	32
Obrázok 29 Rekonštrukcia hologramu [1];	33
Obrázok 30 Rekonštrukcia združeného skutočného obrazu [1];	34
Obrázok 31 Objekt 1, váza [1].	34
Obrázok 32 Objekt 2, busta [1].	35
Obrázok 33 Rekonštrukcia oboch obrazov [1].	35
Obrázok 34 Rekonštrukcia hologramu z polohy 0 do polohy 5 [1].	35

Zoznam grafov

Graf 1 Teoretická difrakčná účinnosť pre tenké hologramy [11].	7
Graf 2 Teoretická difrakčná účinnosť na hrubej vrstve [11].	8
Graf 3 Závislosť kapacity a formátu (rozmerov) média [2].	29

1 Úvod

[1] Princíp holografie je známy od roku 1947, kedy ho objavil britský fyzik maďarského pôvodu sir Dennis Gabor, ktorý za tento objav získal v roku 1971 Nobelovu cenu za fyziku. Holografia sa však stala silným nástrojom pre vedu a výskum až po vynáleze lasera, ktorý bol pre holografii prvý raz použitý v roku 1962 Emmettom N. Leithom a Jurisom Upatnieksom. Od tej doby dochádza k jej búrlivému vývoju a použitiu vo všetkých možných vedných oboroch. Holografia sa úspešne presadila aj pri zobrazovaní inými vlnami než optickými, hlavne rádiovými a akustickými.

Názov holografia vznikol spojením dvoch gréckych slov holos - všetko a grafo - zaznamenávanie, pretože jej základnou výhodou je jej veľký informačný obsah. Záznam amplitúdy a fázy vln na dvojrozmernej ploche (na holograme) môže slúžiť pre rekonštrukciu úplného trojrozmerného poľa vln ako sú napríklad veľmi dobre známe trojrozmerné obrázky. V jednom populárne vedeckom časopise bola zmienka, že ak dvojrozmerný obrázok má informačnú hodnotu 1000 slov, hologram má informačnú hodnotu $1000^{3/2}$, čo je takmer 32000 slov. V prípade číslicového spracovania hologramov je toto tvrdenie presné a znamená to, že ak má dvojrozmerný hologram 1000 bytov a rekonštrukcia je prevedená pre trojrozmernú kockovú oblasť, bolo by treba pre jej záznam 32000 bytov. Skutočný číslicovo spracovaný hologram môže obsahovať stovky tisíc bytov dát a množstvo rekonštruovaných dát je obmedzené len výpočtovým výkonom, resp. dĺžkou trvania rekonštrukcia.

Holografia ako nový smer v optike sa začala intenzívne rozvíjať v polovici 60-tych rokov minulého storočia. V súčasnosti už patrí k zaujímavým technológiám nášho storočia a využíva sa na sledovanie procesov a javov v rôznych vedných disciplínach aj v praxi.

Široké praktické uplatnenie našli aj metódy holografickej interferometrie. Ich rozvoj podnietil rozšírenie optických vizualizačných metód pre výskum difúzne odrážajúcich a fázových predmetov.

Pri interakcii svetelnej vlny s objektom vznikajú zmeny jej amplitúdových a fázových charakteristík, ktoré sa prejavujú v interferenčnom obraze. Zmeny amplitúdy majú vplyv na kontrast obrazu a zvyčajne sa zisťujú fotometrickými metódami. Zmeny fázy sa prejavujú v rozložení interferenčných čiar a zodpovedajú informáciám o zmenách tvaru skúmaného povrchu netransparentného telesa, alebo o zmenách optických dráh lúčov prechádzajúcich cez transparentné objekty.

Pri riešení rôznych úloh experimentálnej mechaniky nás nezaujíma samotná svetelná vlna, ale skúmaný objekt cez ktorý vlna prechádza, alebo od ktorého sa odráža. Na holograme sa potom zaznamenáva zmena objektu alebo zmeny, ktoré boli na ňom urobené. Vlastnosti predmetu ani zložitosť jeho tvaru nemajú vplyv na záznam hologramu (Komar, Serov, 1987).

Perspektívna metóda záznamu optickej informácie tzv. holografia, je úplný záznam o vlne, teda záznam amplitúdy aj fázy. Prakticky to znamená, že pomocou holografie možno zaznamenať priestorové objekty odrážajúce svetlo aj priestorové transparentné objekty, a to trojrozmerné na rozdiel od fotografie alebo záznamu kamerou, ktoré priestorové objekty zaznamenávajú len dvojrozmerné.

2 Vlastnosti snímanej vlny

2.1 Vlastnosti

[1] Holografiiu nie je možné pochopiť v rámci geometrickej optiky, v ktorej sa zaoberá so svetlom, akoby bolo zložené z diskretných častíc (fotónov). Holografia vyžaduje, aby svetlo bolo chápané ako vlnenie. Pri odraze a lome svetla využíva fotografický prístroj intenzitu svetla, ale nie jeho fázu. Pri zobrazovaní predmetov na princípe holografie sa uplatňuje vlnová povaha svetla. Táto metóda nepotrebuje šošovky, ale je viazaná na nutnú podmienku, aby bol predmet osvetlený koherentným zväzkom, ktorého jednotlivé časti majú časovo nemenný fázový rozdiel. Povrch predmetu rozptyľuje dopadajúce svetlo a ak dopadne na fotografickú dosku, spôsobí v emulzii sčernanie, zodpovedajúce výslednej amplitúde svetelných kmitov v príslušnom mieste. Výsledná amplitúda je výsledkom pôsobenia lúčov rozptýlených na všetkých bodoch telesa, ktoré následkom „dokonalej“ koherencie interferujú. Takýto záznam na fotografickej doske dáva informácie o intenzitách a fázach svetelných lúčov rozptýlených na celom telese (Ennos, Virdee, 1982).

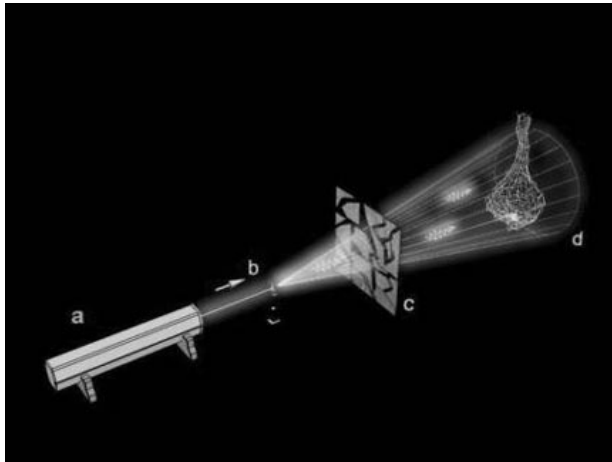
Hologram nemá nijaké znaky, ktoré by pripomínali zobrazovaný predmet. Je to systém svetlých a tmavých miest (vzniknutých interferenciou dvoch zväzkov lúčov), ktorý ani pod mikroskopom neposkytuje nijakú informáciu o zobrazovanom predmete. Ak je hologram osvetlený obyčajným svetlom, voľným okom nie je možné určiť predmet, ktorý je na holograme zaznamenaný (výnimku tvorí napr. dúhový hologram). Napriek tomu je v holograme zašifrovaný priestorový (dokonca farebný) obraz predmetu (Miler, 1974).

Ako už bolo vyššie spomenuté, vytvorenie viditeľného obrazu pomocou hologramu sa nazýva rekonštrukcia obrazu. Aby bolo možné vidieť v priestore obraz predmetu, hologram treba presvietiť porovnávacím (referenčným) zväzkom svetla. Vtedy pod určitým uhlom k dopadajúcemu zväzku vzniká obraz. Pozorovateľ vidí pôvodný trojrozmerný predmet v priestore. Na takýto predmet možno hľadiť z rôznych smerov ako cez okno, ktoré je ohraničené rozmermi hologramu. Viditeľnosť objektu cez hologram je spôsobená difrakciou osvetľujúceho referenčného zväzku na mriežkovej štruktúre hologramu. Takéto pozorovanie je sprevádzané paralaxou – ak sa zmení bod pozorovania, pozorovaný objekt zmení svoju polohu. Ak v čase expozície nejaké blízke predmety zakrývali predmety vzdialenejšie, zmenou polohy svojich očí môže pozorovateľ nerušene vidieť vzdialenejšie predmety.

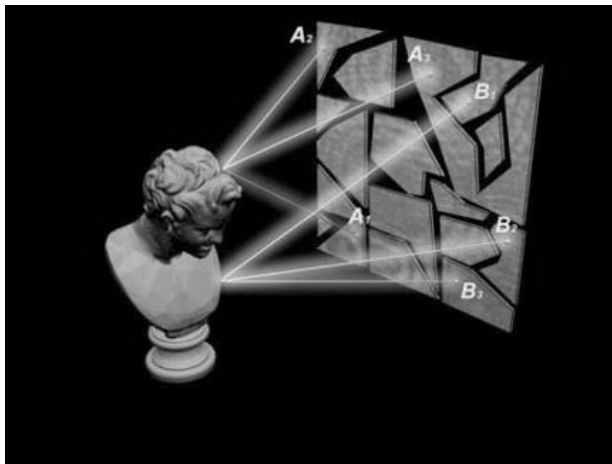
Pri holografii sa teda jedná o záznam priestorovej štruktúry svetelnej vlny, ktorá je rozptýlená predmetom. Tento záznam sa získava pomocou interferenčného obrazu, ktorý zachováva súčasne amplitúdové pomery rozptýleného svetla, t.j. relatívne intenzity, od ktorých závisí miera sčernenia tmavých oblastí interferenčného obrazu, ako aj jeho fázové pomery, ktoré určujú vzájomné rozloženie tmavých a svetlých oblastí.

Pri fotografii sa zaznamenáva len intenzita rozptýleného svetla, t.j. jeho amplitúdové charakteristiky. Informácie o fázovom rozdieli lúčov, t.j. informácie o vzdialenostiach rôznych bodov objektu, ktoré charakterizujú jeho „trojrozmernosť“, sa strácajú.

Obrazy, získané holografiiou, majú aj ďalšie zaujímavé vlastnosti. Ak je hologram rozrezaný na niekoľko častí, z každej sa po presvietení získa ten istý obraz ako je na celom holograme, ak sa neberie do úvahy, že sa so zmenšovaním rozmerov hologramu zmenšuje ostrosť zobrazenia a zhoršuje sa priestorový vnem. Táto vlastnosť hologramu súvisí s tým, že pri expozícii je výsledný optický stav v každom bode holografickej dosky určený pôsobením svetla, ktoré bolo rozptýlené všetkými bodmi povrchu predmetu a naopak, svetlo rozptýlené každým bodom predmetu, osvetľuje celú plochu holografickej dosky (Obrázok 1). Preto je na ľubovoľne malej časti (obmedzené rozlišovacou schopnosťou) hologramu zašifrovaný celý obraz predmetu (Obrázok 2).



Obrázok 1 Rekonštrukcia z úloмку hologramu [1];
a – laser, b – šošovka, c – hologram, d – virtuálny obraz objektu.



Obrázok 2 Záznam hologramu na ľubovoľne malej časti holografickej dosky [1];
A, B – body na povrchu objektu.

Ďalšia zvláštnosť hologramu je v tom, že pri rekonštrukcii vznikajú len pozitívne obrazy. Táto zaujímavá vlastnosť súvisí s tým, že obraz je na holograme zašifrovaný pomocou variácií kontrastu interferenčných prúžkov a vzdialeností medzi nimi, ktoré sa so zmenou negatívu na pozitív (alebo naopak) nezmenia.

Na tú istú holografickú dosku možno zaznamenávať viac obrazov a každý z nich sa dá rekonštruovať bez akýchkoľvek porúch ostatných záznamov.

Holografii možno využiť pre výskum objektov odrážajúcich svetlo, napr. výskum mechanických deformácií, tepelných deformácií, vibrácií malých posuvov a pod., pre interferometrický výskum nehomogenít v transparentných objektoch a pre priestorový záznam častíc v tekutinách.

Holografia využíva interferenciu svetla pre záznam trojrozmerných obrazov, preto vyžaduje použitie koherentných svetelných zdrojov, pričom celé zariadenie musí byť kompaktné, chránené proti otrasom z okolitého prostredia a obvykle vyžaduje zatemnenie pracoviska. Holografia vyžaduje „dokonalé“ optické zdroje s vysokým stupňom koherencie, aby sa dodržali javy interferencie a ohybu svetla. Jedná sa o priestorovú, ako aj o časovú koherenciu. Priestorová koherencia je tým väčšia, čím je zdroj „bodovejší“ a časová koherencia je tým väčšia, čím je svetlo monochromatickejšie. Ideálnym monochromatickým zdrojom je laser – generátor elektromagnetického žiarenia v optickej oblasti vlnových dĺžok.

Laser zabezpečuje časovú a priestorovú koherenciu, ktorá umožňuje získať stabilnú a zreteľnú štruktúru v rovine hologramu a tiež zabezpečuje dostatočný výkon pri zodpovedajúcej vlnovej dĺžke svetla, meraný v ľubovoľnom bode za ľubovoľný časový interval.

Skôr vyrobené lasery produkujú svetlo jedinej frekvencie (vlnovej dĺžky), teda produkujú jednofarebné (monochromatické) svetlo. V súčasnosti napr. firma Coherent vyrába lasery, ktoré produkujú „biele“ svetlo. Laserové žiarenie vystupujúce z lasera je navyše koherentné (všetky vlny sú vzájomne vo fáze). To znamená, že svetlo sa od svojho zdroja šíri v pravidelných vlnách, preto ostáva sústredené v úzkom lúči aj na veľké vzdialenosti. Pre holografiiu sa najčastejšie používa helium-neónový laser (He-Ne), s vlnovou dĺžkou $\lambda = 0,6328 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, s kontinuálnym osvitom.

2.2 Holografická rovnica

[7] K odvodeniu holografickej rovnice je vhodné vyjsť z interferencie svetla. Predpokladá sa interferencia dvoch koherentných vln, z ktorých jedna je referenčná (prichádza priamo z lasera) a druhá je predmetová (prichádza ako rozptýlená od predmetu, ktorého holografický záznam uskutočňujeme).

Obe vlny (referenčná – r, aj predmetová - p) sú reprezentované fázormi intenzít elektrického poľa:

$$\begin{aligned} \vec{E}_r(\vec{r}) &= A_r(\vec{r}) e^{jg_r(\vec{r})} - \text{referenčná vlna} \\ \vec{E}_p(\vec{r}) &= A_p(\vec{r}) e^{jg_p(\vec{r})} - \text{predmetová vlna,} \end{aligned} \quad (1)$$

kde A_r, A_p sú amplitúdy a g_r, g_p sú fázy s konštantnými fázovými členmi δ_r, δ_p :

$$\begin{aligned} g_r &= \vec{k}_r \cdot \vec{r} - \delta_r \\ g_p &= \vec{k}_p \cdot \vec{r} - \delta_p \end{aligned} \quad (2)$$

Časové zmeny fázy sú v uvedenom popise vynechané. Informácia o objekte sa považuje za úplnú, ak bude zachovaná fáza obrazovej vlny g_p , resp. ak bude rekonštruovaný vlnový vektor \vec{k}_p , určujúci (v trojrozmernom priestore) smer šírenia obrazovej vlny.

Predpokladá sa, že na fotografickej doske obe vlny interferujú (koherentná dĺžka laserového žiarenia je väčšia, než maximálny rozdiel dráh referenčnej a predmetovej vlny) a výsledná intenzita I_Σ vyvolá po chemickom spracovaní fotografickej dosky zmenu jej priepustnosti T . Tento proces môžeme popísať nasledujúcim spôsobom:

$$\begin{aligned} I_\Sigma &= c\epsilon_0 n (|\vec{E}_r + \vec{E}_p|^2) = I_r + I_p + 2\sqrt{I_r I_p} \cos(g_r - g_p), \\ I_\Sigma &\sim T, \end{aligned} \quad (3)$$

kde I_r, I_p sú intenzity referenčnej a predmetovej vlny. Priepustnosť fotografickej dosky môžeme teraz vyjadriť:

$$T \sim I_r + I_p + 2\sqrt{I_r I_p} \cos(g_r - g_p). \quad (4)$$

Ak teraz ožiarime fotografickú dosku iba referenčnou vlnou spôsobom (rovnakým smerom) ako pri rekonštrukcii hologramu, vznikne vlna \vec{E}_h , ktorá sa odvodí postupom, vyjadrujúcim moduláciu referenčnej vlny \vec{E}_r priepustnosti T fotografickej dosky:

$$\vec{E}_h = T \vec{E}_r. \quad (5)$$

Po dosadení

$$\dot{E}_h \sim I_r \dot{E}_r + I_p \dot{E}_r + 2\dot{E}_r \sqrt{I_r I_p} \cos(g_r - g_p), \quad (6)$$

a po úpravách získame

$$\dot{E}_h \sim (I_r + I_p) A_r e^{jg_r} + \sqrt{I_r I_p} \left(e^{j(g_r - g_p)} + e^{-j(g_r - g_p)} \right) A_r e^{jg_r}, \quad (7)$$

$$\dot{E}_h \sim A e^{jg_r} + B e^{j(2g_r - g_p)} + B e^{jg_p}, \quad (8)$$

kde

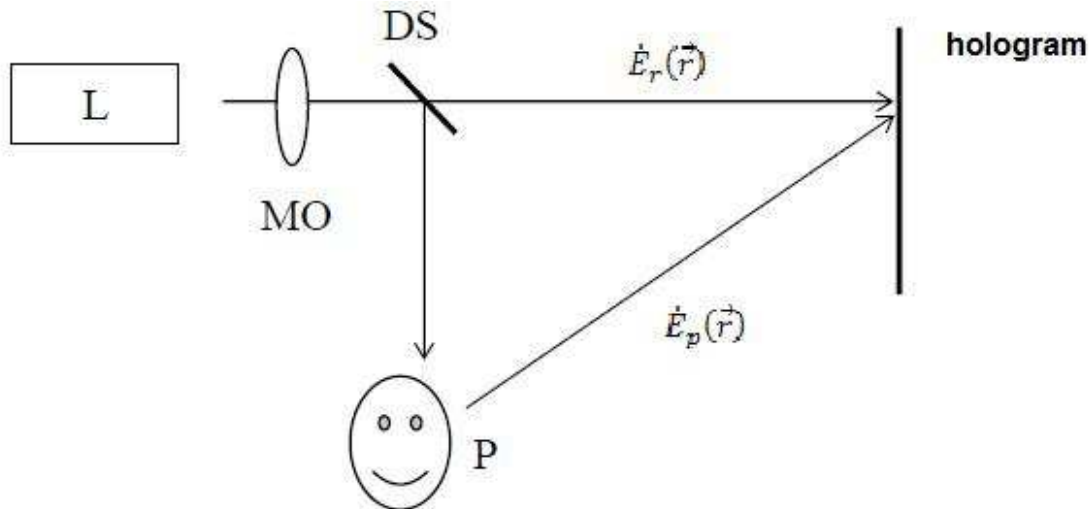
$$A = (I_r + I_p) A_r, \quad (9)$$

$$B = A_r \sqrt{I_r I_p}. \quad (10)$$

Rovnica (8) sa nazýva „holografická rovnica“. Prvý člen pravej strany rovnice predstavuje referenčnú vlnu (dôležitý je záznam fázy, veľkosť amplitúdy tu nie je podstatná), druhý člen predstavuje vlnu „komplexne združenú“ s predmetovou (ide o vlnu, ktorá pôsobí rušivo, ale ktorú musíme rešpektovať) a tretí člen predstavuje rekonštruovanú predmetovú vlnu (opäť je dôležitý len záznam fázy). Fáza predmetovej vlny ostáva zachovaná v pôvodnom tvare g_p .

2.3 Vznik hologramu

Holografické zaznamenanie informácie prebieha nasledujúcim spôsobom: Na fotografickú dosku (pre holografické účely) dopadajú dve koherentné vlny (referenčná a predmetová).



Obrázok 3 Princíp záznamu hologramu [7].

Koherencia oboch vln sa zabezpečí jediným zdrojom koherentného svetla (laserom L), ktorého zväzok sa šošovkou (MO) rozšíri na divergentnú vlnu s následným delením (DS) tak, aby predmet (P) bol ožarovaný rovnakým laserom, ktorý generuje referenčnú vlnu. Ak je zabezpečené, aby dráhový rozdiel referenčnej a predmetovej vlny v mieste hologramu bol menší než koherenčná dĺžka lasera, budú vlny na holograme interferovať podľa rovnice (3).

Interferenčný obrazec, ktorý treba zaznamenať, má jemnú štruktúru škvŕn, ktoré sú od seba vzdialené porovnateľne s vlnovou dĺžkou použitého svetla. Nutnou podmienkou úspešnej výroby hologramu je preto dostatočne mechanicky tuhá sústava, ktorá sa nesmie počas expozície chvieť. Interferenčný obrazec ožiari fotografickú dosku, ktorá je následne chemicky spracovaná podobne ako bežný exponovaný fotografický film. Požiadavkou je vysoká rozlišovacia schopnosť fotocitlivej vrstvy.

Na exponovanej a chemicky spracovanej fotografickej doske sa takýmto spôsobom zaznamená informácia formou tzv. holografického kódu. Holografický kód je fotografickým záznamom kombinácie pôvodnej predmetovej vlny a vlny referenčnej. Záznam holografického kódu je možný vďaka interferencii koherentných vln referenčnej a predmetovej. Referenčnú vlnu nemôžeme pri vytváraní holografického kódu vylúčiť. Optická intezita interferenčného obrazca I_z sa zaznamená na fotografickú dosku a chemickou cestou vyrobený transparent s priepustnosťou T .

K dekódovaniu informácie ukrytej na fotografickej doske (holograme) sa použije rovnaká referenčná vlna ako pri konštrukcii hologramu, ktorá bude ožarovať hologram rovnakým spôsobom.

Pri rekonštrukcii holografického záznamu je treba zabezpečiť, aby hologram bol ožarovaný referenčnou vlnou pod rovnakým uhlom ako pri konštrukcii záznamu a aby pozorovanie predmetovej vlny sa uskutočnilo v rovnakom smere, v ktorom pri konštrukcii hologramu dopadala predmetová vlna. Výsledkom ožiarenia hologramu referenčnou vlnou je vlna \vec{E}_h (8).

2.4 Fázové hologramy

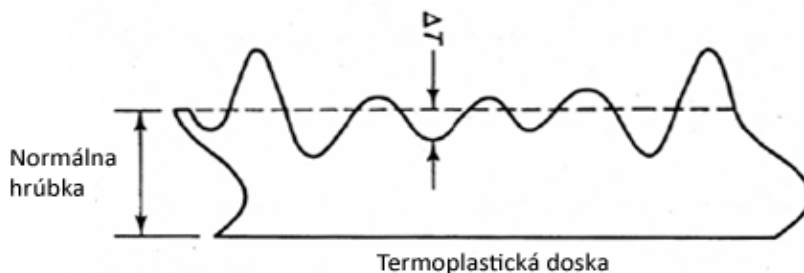
Pozostávajú z dosiek, ktorých hrúbka sa mení. Sú vyrobené z termoplastickej dichromovanej želatíny (hrúbka závisí na intenzite). Objektová a referenčná vlna sa líšia len v intenzite a fáze. Fázový rozdiel ϕ môžeme vyjadriť pomocou:

$$U_r = A \quad (11)$$

$$U_o = a \exp(j\varphi) \quad (12)$$

Potom pre intenzitu platí:

$$I = I_r + I_o + \frac{1}{2Z} [Aa \exp(j\varphi) + Aa \exp(-j\varphi)] = I_r + I_o + \frac{Aa}{2Z} \cos(\varphi). \quad (13)$$



Obrázok 4 Kolísanie hrúbky termoplastickej dosky pri zázname.

Efektívna hrúbka dosky závisí iba na zmene hrúbky:

$$\Delta T = -\gamma \Delta I = -\gamma \frac{Aa}{2Z} \cos(\varphi), \quad (14)$$

kde γ = fotosenzitívna konštanta. Fázová zmena spôsobená prechodom svetla cez dosku:

$$\Delta \psi = k(n-1)\Delta T = -k(n-1)\gamma \frac{Aa}{2Z} \cos(\varphi). \quad (15)$$

Tenké fázové hologramy

[11] Čiste fázové hologramy môžu byť vytvorené dvoma spôsobmi. Záznamom holografickej interferenčnej šablóny vo forme povrchovej deformácie záznamového média alebo ako šablóna indexu lomu pre kolísanie absorbného koeficientu. Deformácia povrchu aj kolísanie indexu tenkých hologramov, môže byť rekonštruovaná pomocou vyžiareného

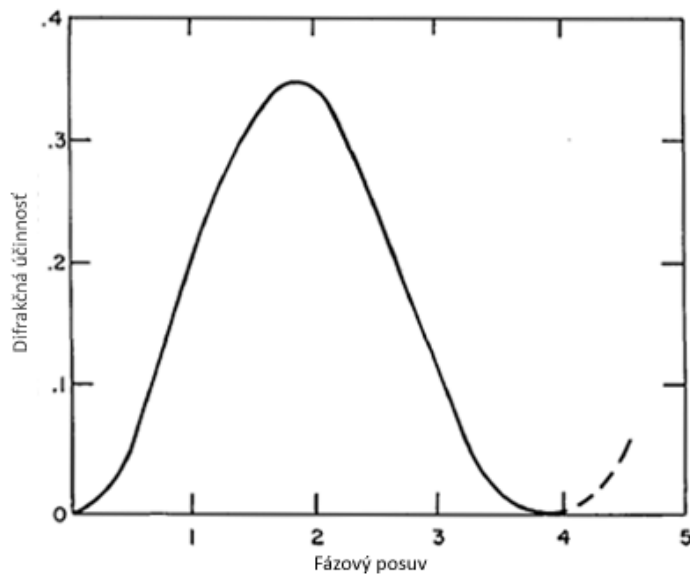
alebo odrazeného svetla. Rekonštruovaná amplitúda z hologramu produkujúceho kolísanie sínusovej fázy je daná vzťahom:

$$|A| = kJ_1(\phi), \quad (16)$$

Kde ϕ je odchýlka fázového posunu v radiánoch, k je amplitúdový odraz prenosového koeficientu a J_1 je Besselova funkcia prvého rádu. Indexy r a t sú použité pre rozlíšenie odrazu a prenosu. Difrakčná efektivita tenkého fázového hologramu je zobrazená na Graf 1 Teoretická difrakčná účinnosť pre tenké hologramy [11]. pre $k = 1$. Pre malú deformačnú amplitúdu, hologram povrchovej deformácie má vyšší fázový posun, keď je použitý pre rekonštrukciu odrazom, než pre rekonštrukciu prenosom. Toto vyplýva z nasledujúcich vzťahov medzi ϕ a deformačnou odchýlkou E :

$$\phi_r = (4\pi/\lambda)E \quad (17)$$

$$\phi_t = [2\pi(n - 1)/\lambda]E. \quad (18)$$



Graf 1 Teoretická difrakčná účinnosť pre tenké hologramy [11].

Hrubé fázové hologramy

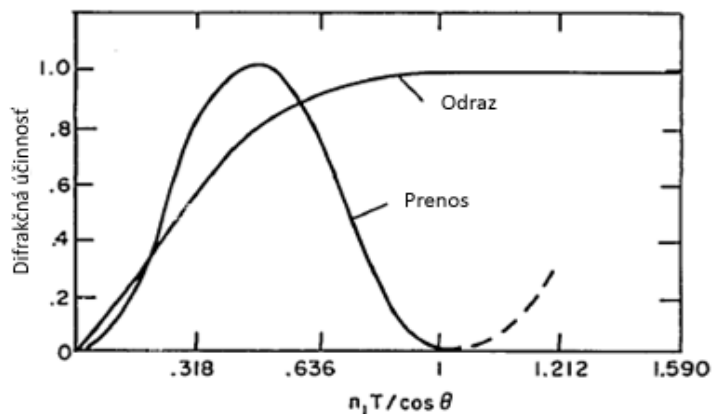
Hologramy, ktoré majú kolísanie indexu lomu dané $n = n_0 + n_1 \cos(2\pi x/d)$ a majú zanedbateľnú absorpciu, môžu byť označené ako hrubá fázová mriežka. Keď θ sleduje Braggov vzťah, vznikne rekonštrukcia amplitúdy, ktorej magnitúda je:

$$|A| = \sin(\pi n_1 T / \lambda \cos \theta). \quad (19)$$

Ak $n_1 T = \frac{1}{2}(\lambda \cos \theta)$, teoreticky sme môžeme dosiahnuť difrakčnú efektivitu 100%. Hologramy, vyrobené v dichromovanej želatíne, experimentálne dosiahli účinnosť 95%. Odrazové fázové hologramy rekonštruujú obrazy s amplitúdou:

$$|A| = \tanh(\pi n_1 T / \lambda \cos \theta). \quad (20)$$

Tento typ hologramu sa približuje k efektivite 100%, so zväčšujúcim sa $n_1 T$. Difrakčná účinnosť je zobrazená na Graf 2 Teoretická difrakčná účinnosť na hrubej vrstve [11].



Graf 2 Teoretická difrakčná účinnosť na hrubej vrstve [11].

3 Rozdelenie holografie podľa frekvencie vlny (vlnovej dĺžky):

3.1 Akustická holografia

[3] Gáborova myšlienka, ktorá je aplikovateľná rovnako pre zvukové aj elektónové vlnenie, je transformovať priestorovú moduláciu z neviditeľných vlnových polí nesúcich informáciu o obraze na svetelný lúč. Po tejto transformácii môžeme pomocou vysoko rozvinutej zobrazovacej technológie generovať obrazy lepšie ako tie na originálnom médiu.

Tento modulačný presun so sebou prináša nevyhnutné skreslenie obrazu. Ak napríklad hologram v akustickej rovine bol vyhotovený zvukom s vlnovou dĺžkou λ_s a prehratý späť s rozlišovacou zmenou s ohraničeným svetelným lúčom vlnovej dĺžky λ_L , rekonštruovaná vlna nezmení svoje rozloženie v (x,y) dimenziách, ale s hĺbkovým skreslením, úmerným pomeru vlnových dĺžok λ_s/λ_L . Ak zmeníme lineárnu mierku hologramu faktorom m , oba rozmery sa zmenšia rovnako, teda:

$$x' = mx \quad (21)$$

$$y' = my \quad (22)$$

a hĺbkový rozmer sa zmení na

$$z' = m^2 \frac{\lambda_s}{\lambda_L} z. \quad (23)$$

Pre získanie neskresleného zobrazenia musíme zvoliť pomer $m = \lambda_s/\lambda_L$. V najbežnejšom prípade pre ultrazvuk má m hodnotu 10^{-3} . Nezkreslené zobrazenie je teda veľmi malé, takže musíme použiť optické zväčšenie pre získanie použiteľných obrázkov a takto regenerujeme hĺbkové skreslenie. Táto situácia nám znemožňuje pokračovať v realistickej trojdimenzionálnej rekonštrukcii optickej holografii v akustike.

Znovuobjavenie algoritmu rýchlej Fourierovej transformácie (ktoré sa postupne stalo kľúčovou aktivitou v akustickej holografii), dostupnosť rýchlych počítačov a relatívne malé objemy dát, ktoré bolo treba spracovať (v porovnaní s optickou holografiou), sa stala digitálna holografia veľmi diskutovanou pre rekonštrukciu obrazu.



Obrázok 5 Akustický obraz Britskej pence [3]; získaný skenovaním na frekvencii 10 MHz.

Metódy záznamu:

1. Plošné detektory citlivé na intenzitu

Sú generované analógovo k optickým hologramom zvukovou vlnou (ktorá je reflektovaná z alebo prenesená cez objekt) a referenčnou vlnou dopadajúcou spolu na plošný detektor citlivý na intenzitu. Rovina intenzity dvoch interferujúcich lúčov je potom zaznamenaná ako akustický hologram. Niekedy je samotný akustický hologram použitý ako svetelný modulátor. Všetky plošné detektory citlivé na intenzitu vhodné pre konvenčné akustické použitie sú potenciálne holografické materiály. Zo všetkých týchto detektorov najviac pozornosti dostali detektory s rozhraním kvapalina-plyn, pretože môžu byť priamo použité ako svetelné modulátory, bez prechodného spracovania.

Zvuk reflektovaný z povrchu vyvolá tlak, nazývaný radiačný tlak. Tento tlak je úmerný dopadajúcej intenzite. Povrch reaguje na tento tlak a deformuje sa, kým gravitácia a povrchový tlak sa znova nedostanú do rovnovážneho stavu. Deformácia h povrchu meraná kolmo k neporušenému povrchu je spojená s dopadajúcou intenzitou vzťahom:

$$h \propto I_s * K. \quad (24)$$

Symbol $*$ znamená konvolúciu, I_s je intezita zvuku a K je impulzná odozva kvapalného povrchu. Pod Fourierovou transformáciou dostávame vzťah:

$$\tilde{h} \propto \tilde{I}_s \cdot \tilde{K} = \tilde{I}_s / (1 + \gamma^2 v^2), \quad (25)$$

kde \tilde{h} , \tilde{I} a \tilde{K} sú Fourierove transformácie h , I a K . Fourierova transformácia \tilde{K} impulznej odozvy K je modulačná prenosová funkcia kvapalného povrchu:

$$\tilde{K} = \frac{1}{1 + \gamma^2 v^2} \quad (26)$$

kde $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ je priestorová frekvencia a γ je charakteristická dĺžka, ktorá závisí na povrchovom napätí σ a hustote ρ kvapaliny:

$$\gamma = 3.2 \times 10^{-2} \sqrt{\sigma/\rho} [cm]. \quad (27)$$

2. Plošné detektory citlivé na amplitúdu

V akustike, lineárne prijímače môžu byť použité na detekovanie priestorovej a časovej závislosti akustického poľa dopadajúceho na danú plochu. Tieto dáta, podľa Hygensovhovho princípu, môžu byť použité pre analytickú rekonštrukciu zvukového poľa a získanie zobrazenia cez počítačovú rekonštrukciu. Vďaka zvyšujúcej sa rýchlosti počítačov môžeme tieto využiť k akustickému zobrazovaniu.

Akustické dáta môžeme získať viacerými spôsobmi. Ak je akustické pole stacionárne, môžeme ho navzorkovať v danom priestore mechanickým skenovaním pomocou malého mikrofónu alebo hydrofónu. Táto technika, napriek vyššej spotrebe času, je použiteľná pre aplikácie, ktoré vyžadujú veľké účinné plochy, ale nie rýchlu operáciu. Omnoho rýchlejšie vzorkovacie operácie sú možné pomocou súbežne vzorkujúcich detektorových polí alebo s elektrónovými, či piezoelektrickými detektormi. Tretia možnosť je použiť dynamickú (lineárnu) odozvu opticky zrkadlových prostredí na fázovo modulované dopadajúce svetlo s akustickým buđením.

Ideálny lineárny plošný detektor generuje signál $S(x,y,t)$, ktorý je pre každú pozíciu x,y v detekčnej ploche úmerný akustickému buđeniu $A(x,y)\cos[\Phi(x,y)-\omega_s t]$. To je:

$$S \propto A(x,y)\cos[\phi(x,y) - \omega_s t] = \text{Real } F_s e^{-i\omega_s t} \quad (28)$$

s komplexnou amplitúdou definovanou ako:

$$F_s = A(x,y)e^{i\phi(x,y)}. \quad (29)$$

V pomalých vzorkovacích systémoch alebo fixných poliach, pre generovanie nevyhnutných dát na konštrukciu hologramu, pridávame elektronicky k signálu $S(x,y,t)$ v každej vzorkovacej pozícii (x,y) signál simulujúci lokálnu amplitúdu a fázu zvolenej referenčnej vlny $R\cos(kx-\omega t)$. Po tejto korekcii bude výstupom pre každú vzorkovaciu pozíciu:

$$|F_s|^2 + |R|^2 + F_s R^* + F_s^* R, \quad (30)$$

ktorý korešponduje s požadovaným lokálnym amplitúdovým prenosom pre mimoosový hologram.

Pre rýchle skenovacie systémy je lepším spôsobom na získanie potrebných dát nasledujúci postup. Detekovaný signál $S(x,y,t)$ je zmiešaný s referenčným signálom $R\cos\omega_r t$, ktorý osciluje na frekvencii ω_r skôr ako na akustickej frekvencii ω_s . Tento proces nám dáva komponent $AR\cos(\Phi-\omega' t)$, ktorý osciluje s frekvenciou $\omega'=(\omega_s-\omega_r)$. Tento komponent môže byť izolovaný vhodným pásmovým filtrom a použitý priamo ako mimoosový hologram na TV monitore, ak pridáme vychýľovací člen B a interpretujeme ω' ako rovinnú prenosovú frekvenciu β výstupu súradnice x :

$$B + AR\cos[\phi(x,y) - \beta x]. \quad (31)$$

3. Syntetické apertúry

Využívame techniky, v ktorých hologramy sú konštruované zo vzoriek nestacionárnych polí, získaných z miest fyzickej apertúry, ktoré nemusia nevyhnutne korešpondovať s lokáciami v syntetickej apertúre daného hologramu. Klasickým príkladom syntetickej apertúry je radar bočného obzoru (side looking radar), v ktorom vysielateľ aj prijímač sú skenované simultánne.

Koherentne detekovaný signál ako funkcia skenovacej súradnice x , v prípade pevného vysielateľa:

$$F(x) = \cos\left(\frac{2\pi r_0}{\lambda_s} + \frac{2\pi r(x)}{\lambda_s}\right) = \cos\left(\beta_0 + \frac{2\pi Z_0}{\lambda_s} \left(1 + \frac{(x-x_0)^2}{z_0^2}\right)\right) \quad (32)$$

a v prípade simultánneho skenovania:

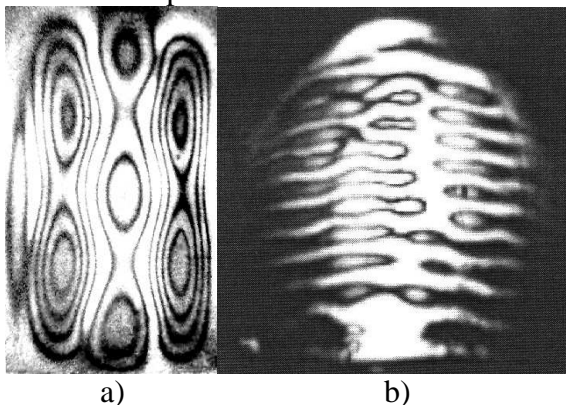
$$F(x) = \cos \frac{4\pi T(x)}{\lambda_s} = \cos \left(\frac{4\pi z_0}{\lambda_s} \left(1 + \frac{(x - x_0)^2}{2z_0^2} \right) \right) \quad (33)$$

V oboch prípadoch je výsledkom jednorozmerná zóna, ktorá je hologramom bodového rozptylu. V simultánnom skenovaní, keďže hologram sa javí ako by bol vzatý poľom polovičnej vlnovej dĺžky, má dvojnásobné rozlíšenie.

3.2 Ultrazvuková holografia

[5] Výskum ultrazvukových vibrácií je asociovaný s amplitúdovým meraním vibrujúcich povrchov pomocou laserových metód. Modulačná fotometrická metóda nám umožňuje eliminovať hlavnú nevýhodu interferometrických metód – senzitivitu k externým vibráciám. Ďalšie modifikácie tejto metódy nám umožňujú merať energetické parametre pulzných vibrácií., kalibrovať ultrazvukové čidlá, merať akustický tlak (ultrazvukovú intenzitu) v danom bode ultrazvukového poľa pomocou optickej sondy. Aj keď laserové metódy merania vibrácií sú viacmenej presné, s rešpektom k informatívnosti, sú menej kvalitné ako optické metódy ktoré dokážu zobrazit', merať a skúmať trojdimenzionálne akustické pole v reálnom čase.

Pomocou klasickej repetitívnej expozičnej interferenčnej metódy, kedy sa zobrazovací laserový lúč difúzne odráža od vibrujúceho povrchu a interferuje s referenčným lúčom, boli získané kvalitatívne obrázky ohybových vibrácií malých plochých povrchov čidla (Obrázok 6), podľa geometrickej kalkulácie rozdelenia tlaku akustického poľa trojrozmerného obrazu. Komplikovanejšia je vizualizácia vibrácií nerovných vibračných povrchov a kalkulácia akustického poľa.



Obrázok 6 Holografické interferogramy ohybových vibrácií plochých povrchov [5];
a) ohybové vibrácie čidla ($f=30\text{kHz}$); b) smerový tvar tenko-stennej schránky žiariča ($43,3\text{kHz}$).

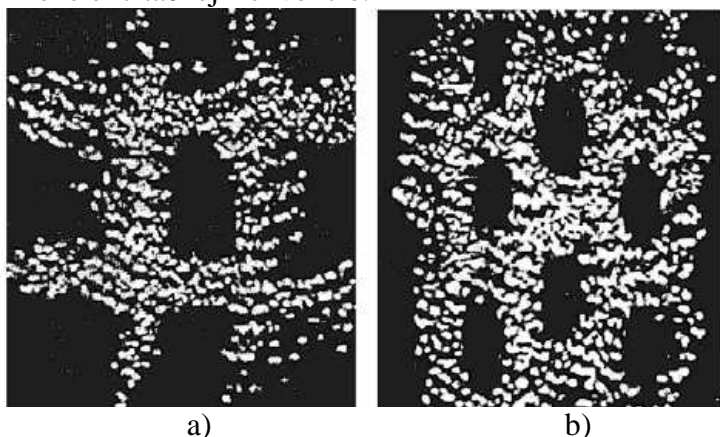
Repetitívna expozičná holografická metóda je efektívna len v rozsahu nízkych ultrazvukových frekvencií, kedy amplitúdy povrchových vibrácií ζ sú dlhšie ako optická dĺžka λ_0 ($\zeta \geq \lambda_0$). Pre zobrazenie akustického poľa vyšších ultrazvukových frekvencií môžeme použiť difrakčné metódy. Difrakčná efektivita svetla je závislá na akustickej vlnovej dĺžke, preto obzvlášť kvalitné obrázky môžeme získať na vyšších ultrazvukových frekvenciách. Ak jednoduchá tieňová meracia metóda dáva integrálny plochý obraz akustického poľa, potom použitím kombinácie tieňovej a holografickej metódy v pulznom móde získame geometrický (holografický) obraz jedného ultrazvukového pulzu (Obrázok 7).



Obrázok 7 Holografický obraz ultrazvukového pulzu ($\tau_i=5\mu\text{s}$) [5].

Efektivita svetelnej difrakcie nezávisí len na holografickom impulznom spektre, ale aj na jeho dĺžke, preto pre zachytenie krátkych (polovičná vlnová dĺžka) ultrazvukových pulzov potrebujeme silné laserové impulzy (energia impulzu $W \cong 0,5 \text{ mJ}$; doba trvania impulzu $t = 3 \cdot 10^{-8} \text{ s}$). Nevýhodou metódy je, že vyžaduje laboratórne podmienky.

Táto nevýhoda neplatí pre holografickú interferenčnú metódu zrnitých štruktúr (bodová holografia), kedy hologram nerovného povrchu je snímaný video kamerou (Obrázok 8). V tomto prípade na obrazovke monitora môžeme sledovať rôzne vibračné módy čidla, pri zmene excitačnej frekvencie.

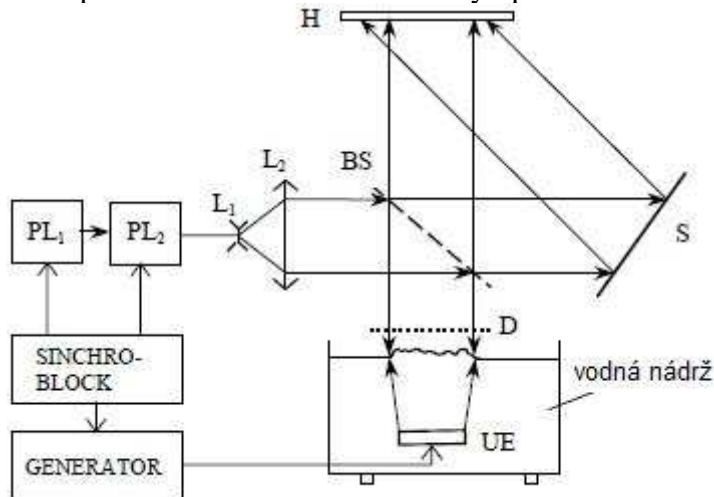


Obrázok 8 Holografické interferogramy [5].
Rezonančné frekvencie vibračných módov: a) $f=30\text{kHz}$; b) $f=74,5\text{kHz}$.

Nevýhodou metódy je, že obraz je zrnitý nie je dostatočne zreteľný. Niekedy je možné zvýšiť kvalitu pomocou digitálneho filtra, ale veľkosť informácie nie je zväčšená.

Optické holografické metódy sú použiteľné v meraní ultrazvukových energetických charakteristík – radiačnom tlaku, intenzite a pre meranie povrchového reliéfu tekutiny. Pre

meranie povrchového reliéfu tekutiny používame schému, ktorú zobrazuje Obrázok



9.

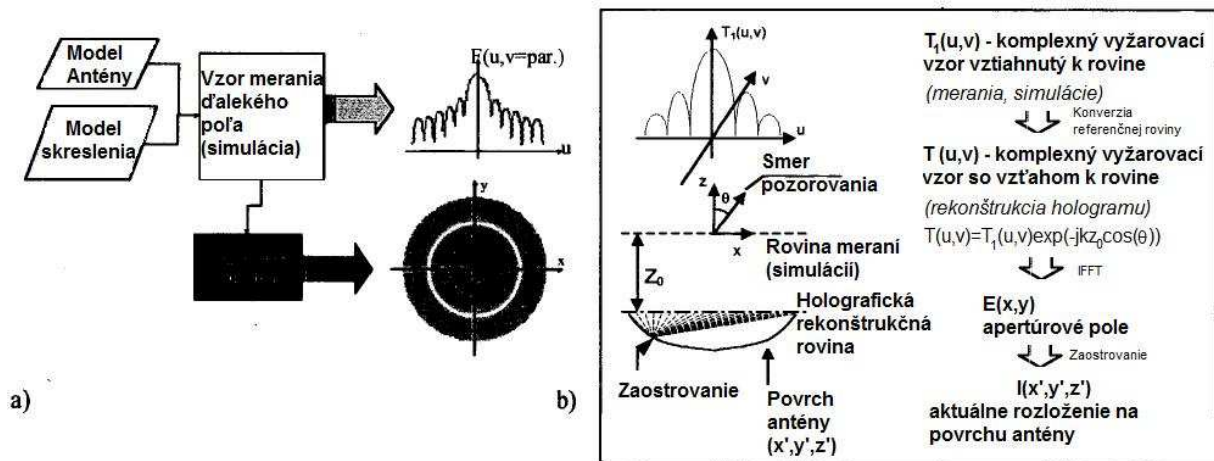
Obrázok 9 Schématický diagram impulznej holografie akustického poľa ultrazvukového čidla [5]; (PL_{1,2} – impulzné lasery ($\lambda=694\text{nm}$); UE – ultrazvukový emitor; L_{1,2} – šošovky; BS – delič lúča; D – rozptyľovač svetla; S – zrkadlo; H – holografická doska).

3.3 Gigahertzová (mikrovlnná) holografia

[10] Postup generovania anténnych hologramov pomocou mikrovlnných signálov sa podobá procedúre generovania optických hologramov laserami. Anténny hologram vzniká interferenciou medzi mikrovlnným signálom získaným z referenčnej antény a testovacej antény. Interferenčné pole anténneho hologramu vzniká spracovaním interferenčného vzoru pomocou prijímacieho zariadenia a počítačového programu. Použitie mikrovlnnej holografie vidíme napríklad v meraní povrchu veľkých pozemných antén. Hladký povrch takýchto antén je dôležitý, pretože povrchový koeficient zrkadlenia môže znehodnotiť cenu danej antény a môže spôsobiť stratu hodnôt dát komunikačného systému, v ktorom anténa pracuje.

Teória mikrovlnnej holografie

Teória mikrovlnnej holografie veľmi úzko súvisí s ďalšími poliami, ako napríklad merania blízkych polí antén, seizmológia a metóda apertúrnej syntézy v rádioastronómii. Všetky tieto metódy využívajú koncept transformácie vlnoplôch na uhlové spektrum. Mikrovlnná holografická transformácia je hlavne inverzná operácia fázovej korekcie. Vstupom do mikrovlnnej holografickej transformácie sú komplexné merania alebo simulácie elektrického poľa E a magnetického poľa H v ďalekom poli (Obrázok 10). Počítač konvertuje dáta pre blízke polia, pomocou dvojdimenzionálnej Inverznej Fourierovej Transformácie (IFFT). Mapa clonovej oblasti alebo zrkadlového povrchu (anténneho poľa) elementárnych váh s asociovanou fázovou informáciou je výstupom holografickej procedúry.



Obrázok 10 Metodológia aplikácie mikrovlnnej holografie pre komplexné dáta v ďalekom poli [10]; (a), kroky holografickej procedúry (b).

Väčšina mikrovlnných holografických transformácií je vykonaná použitím vlnoplôch ďalekých polí, zaostrením a inverznou transformáciou v niekoľkých nasledujúcich krokoch:

1. Meranie (simulácia) dát komplexného ďalekého poľa (alebo transformácia do tejto domény ak sú dáta získané v blízkom poli).
2. Aplikovanie filtrácie, ak je to potrebné, k minimalizovaniu zdrojov chýb.
3. Interpolácia meraní do jednotnej mierky v (u,v) priestore.
4. Aplikácia fázovej korekcie pre dáta ďalekých polí pre posunutie vlnoplôch k rovine blízko povrchu apertúry antény.
5. Vykonanie dvojdimenzionálnej inverznej rýchlej Fourierovej transformácie (IFFT), pre konverziu (u,v) priestorového spektra do apertúrového poľa. Výstupom sú vlnoplochy blízkeho poľa blízko ohniska povrchu.
6. Vyčistenie apertúry poľa iteračnou aplikáciou FFT. Tento krok je voliteľný, v mnohých prípadoch nemá žiadny efekt na výsledok. Operácia sa bude mať efekt, ak vyžarovacie pole reflektora nebude kužeľovité.
7. Získanie relatívneho rozdelenia fázy.
8. Použitie metódy najmenších štvorcov pre vyriešenie rozostrenia, rozmiestňovacích chýb vo vyžarovacej anténe alebo geometrických chýb atď., ak je to požadované.

Mikrovlnná holografia reflektorovej antény:

Pomocou vyššie popísanej procedúry môžeme realizovať holografiiu reflektorovej antény. Elektrické pole E parabolickej reflektorovej antény môžeme vyjadriť pomocou konceptu fyzikálnych optických metód ako:

$$E = -\frac{j120k \exp(-jkr)(T_\theta \mathbf{1}_\theta + T_\phi \mathbf{1}_\phi)}{4r}, \quad (34)$$

kde: $T = \iint_S J(x',y') \exp[jk(z' + ux' + vy')] dx' dy'$ je žiarenie roviny pre malý uhlový úsek, súvisiaci s indukovaným tokom $\vec{J} = 2\mathbf{1}_n \times \vec{H}^i$, cez Fourierovu transformáciu a H^i je dopadajúce magnetické pole generované zdrojom, $u = \sin\theta \cos\phi$ a $v = \sin\theta \sin\phi$. Vstupom mikrovlnnej holografie sú koherentné merania (simulácie) polí E a H a ostatné merania, ktoré definujú geometriu systému. Základná holografická transformácia je v podstate inverziou Fourierovej transformácie ďalekého poľa na pole blízke $J(x',y') \exp(j\delta) = \mathfrak{F}^{-1}[T(u,v)] \exp(j2kF)$, kde $\delta = 4\pi \left(\frac{\epsilon}{\lambda}\right) (1 + (x'^2 + y'^2)/4F^2)^{-1/2}$ je úplná chyba skreslenia fázy a $\epsilon(x',y')$ je povrchová nerovnosť v smere normály k povrchu reflektora, F je ohnisková vzdialenosť. So zaostrovacou operáciou (fázovou kompenzáciou) je výsledkom funkcia nerovnosti povrchu (princíp mikrovlnnej holografie reflektorovej antény):

$$\epsilon(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\left(1 + \frac{x^2 + y^2}{4F^2}\right)} \text{phase} \left\{ e^{j2kF} \mathfrak{S}^{-1}[T(u, v)] \right\}. \quad (35)$$

Mikrovlnná holografia v praxi:

Výhody voči konvenčnej technike merania antén:

1. Priamy vzťah (vizualizácia) dát ďalekého poľa s rozdelením prúdu alebo s povrchovou chybou.
2. Lepšie rozlíšenie merania (rms nerovností <0.2 mm, rozlíšenie amplitúdovej charakteristiky 1% napät'ovej osi).
3. Lacnejší merací proces, ktorý môže byť kedykoľvek pozastavený a reštartovaný.

Nevýhody:

1. Dlhá doba získavania dát.
2. Musíme fyzicky skenovať apertúru antény.
3. Dlhé spracovanie dát.

3.4 Terahertzová holografia

Úvod:

[6] V posledných rokoch bolo terahertzovému (THz) žiareniu, medzi mikrovlnným a infračerveným žiarením, venovanej mnoho pozornosti. THz žiarenie je obvykle označované ako elektromagnetické vlnenie s frekvenciou od 100 GHz do 10 THz, čo korešponduje s vlnovými dĺžkami od 3 mm do 30 μm . Toto žiarenie má tri hlavné výhody: (I) THz vlny prechádzajú materiálmi, ktoré blokujú svetlo. (II) Fotón v THz rozsahu má veľmi malú energiu a preto je relatívne bezpečný pre človeka. (III) Mnoho významných materiálov ako sú drogy a výbušniny, majú jasne viditeľné spektrum v THz rozsahu. THz žiarenie má ďalej uplatnenie v informačných a komunikačných technológiách, v biológii a medicíne, v bezpečnostnej technike, v kontrole kvality potravín a poľnohospodárskych produktov, v globálnom environmentálnom monitoringu atď.

THz spektroskopia a zobrazovacia technológia sú dôležité pre praktickú aplikáciu. Vďaka tomu, že mnohé nepriehľadné materiály sú v THz rozsahu priehľadné, THz zobrazovanie nám poskytuje vyššie rozlíšenie ako mikrovlny.

Digitálna holografia je nová technológia pre extrahovanie plnej informácie z originálneho objektu. THz impulzná zobrazovacia technológia je kombinovaná s digitálnou holografiou pre získanie informácie o objekte v reálnom čase. Príslušné kroky v THz digitálnej holografii sú: (I) CCD (charge-coupled device; zariadenie s viazanými nábojmi) kamera je použitá pre nahrávanie časových oblastí kriviek dvojdimenzionálneho rozloženia THz poľa, potom ako prdže cez alebo je odrazená od objektu. (II) Je použitý rekonštrukčný algoritmus pre konštrukciu rozdelenia optického poľa za objektom. (III) Takto môže byť vyňatá presná informácia o objekte z rekonštruovanej krivky časovej oblasti.

Počas rekonštrukcie frekvenčná zložka THz pulzu je vykreslená použitím Fourierovej transformácie, a teória uhlového spektra je použitá k obnove originálneho rozdelenia pre každý komponent. Nakoniec, pomocou inverznej Fourierovej transformácie získame krivku časovej oblasti. Takto môžeme dosiahnuť informácie o objekte ako je absorpčné spektrum a index rozdelenia. Ako CCD nahráva všetky informácie obsahujúce fázovú informáciu poľa v krivke časovej oblasti, môžeme ju nazvať digitálna holografia.

Unikátnou vlastnosťou THz žiarenia je jeho spektrálna šírka pásma, ktorá je porovnateľná s nosnou frekvenciou alebo väčšia než centrálna frekvencia, takže šírenie teórie popisujúcej quazi-monochromatické svetlo sa nehodí pre THz pulz. Pulz šíriaci sa z dopadajúcej roviny do paralelnej pozorovacej roviny vo voľnom priestore sa šíri následovne: (I) Vstupný zväzok impulzov je rozložený na spojitú sumu monochromatických

vln, ktoré môžu byť spracované nezávisle pomocou Fourierovej transformácie. (II) Šírenie každej monochromatickej zložky je spracované angulárnou spektrálnou metódou. (III) Nakoniec, tvar pulzu v pozorovanej rovine je získaný inverznou Fourierovou transformáciou.

Predpokladajme, že vyžarovacia a pozorovacia rovina sú v jednom súradnicovom systéme (x, y, z) a vyžarovacia rovina sa nachádza v $z=0$. Vstupné impulzné komplexné rozdelenie $u(x, y, 0; t)$ je najprv rozložené na súvislý sled monochromatických vln pomocou Fourierovej transformácie

$$u(x, y, 0; \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, y, 0; t) \exp(-i2\pi\omega t) dt \quad (36)$$

Každý monochromatický komponent pulzného THz lúča sa šíri zo vstupnej roviny do koaxiálnej paralelnej výstupnej roviny. Komplexná vlnová funkcia $u(x, y, 0, \omega)$ vyžarovacej roviny je priradená k fyzicky realizovateľnému vlnovému poľu Fourierovou transformáciou pomocou uhlových frekvencií ξ a η ,

$$U(\xi, \eta, 0; \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, y, 0; \omega) \times \exp(-i2\pi(\xi x + \eta y)) dx dy. \quad (37)$$

Obdobne môžeme vyjadriť aj pozorovaciu rovinu. Vzťah medzi oboma funkciami dostaneme vyriešením Helmholtzovej rovnice s komplexnou vlnovou funkciou $u(x, y, 0; \omega)$:

$$U(\xi, \eta, z; \omega) = U_0(\xi, \eta; \omega) \exp\left[i\frac{2\pi z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda\xi)^2 - (\lambda\eta)^2}\right]. \quad (38)$$

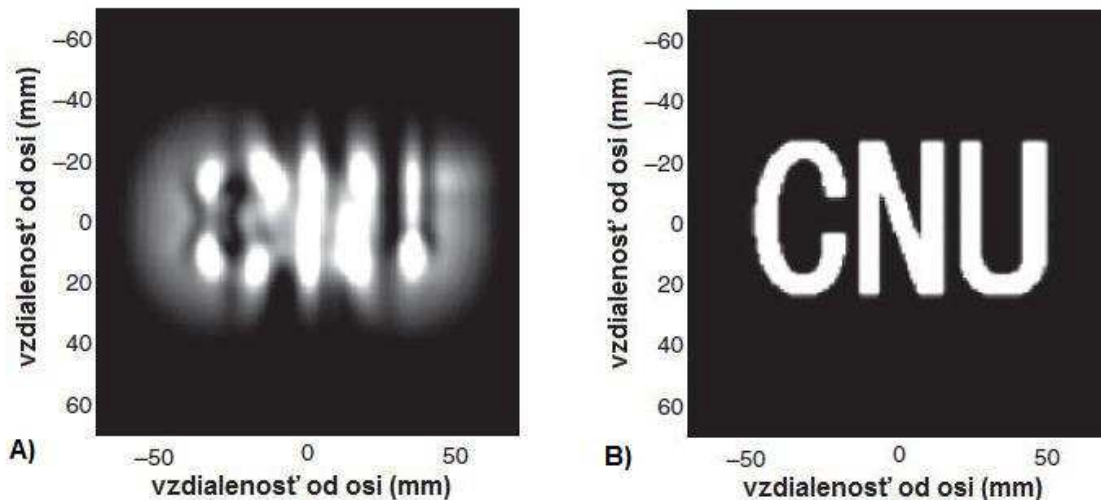
Táto rovnica vyjadruje fázový rozdiel medzi korešpondujúcimi rovinnými vlnami spôsobenými šírením medzi dvoma paralelnými rovinami, kde

$$H = \exp\left[i\frac{2\pi z}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda\xi)^2 - (\lambda\eta)^2}\right] \quad (39)$$

je šíriteľ a $\omega=2\pi c/\lambda$.

Časopriestorová reprezentácia prenášaného pulzu je získaná pomocou

$$u(x, y, z; t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(x, y, z; \omega) \exp(i2\pi\omega t) dt. \quad (40)$$



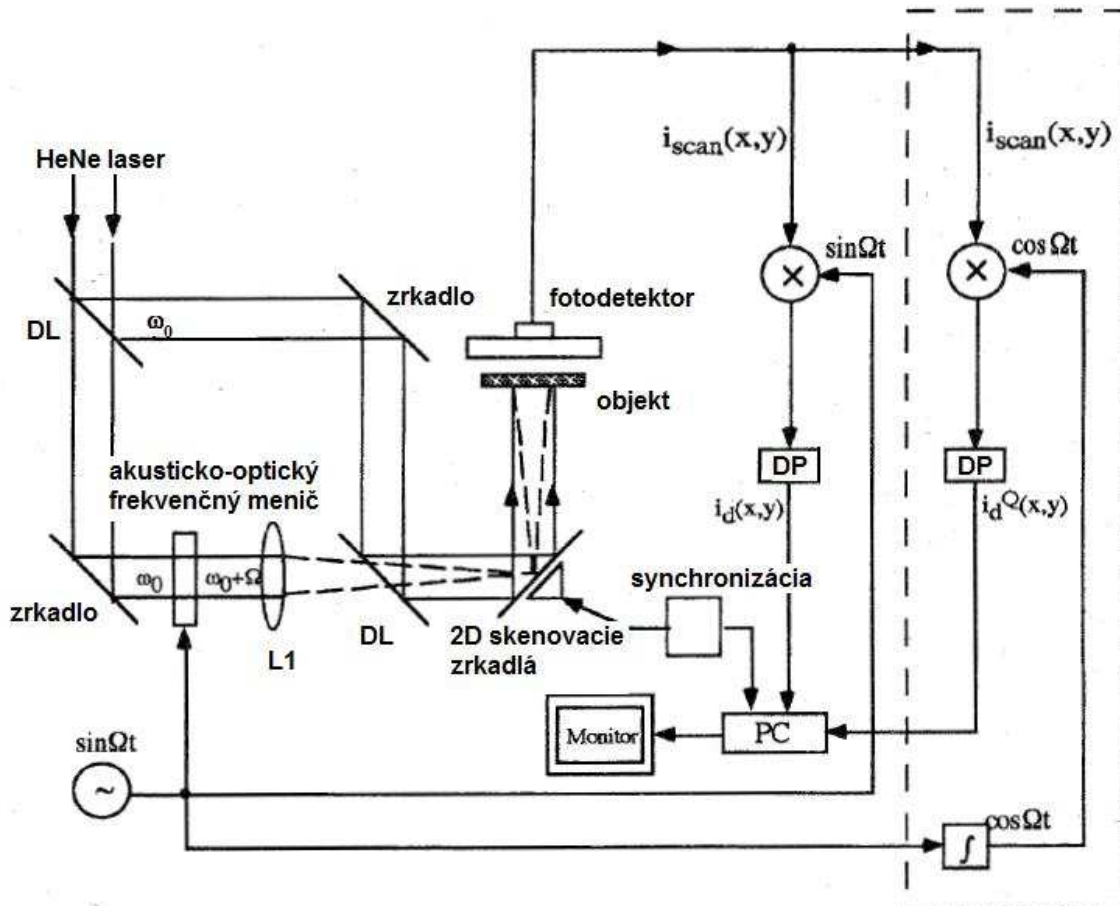
Obrázok 11 Rekonštrukcia písmen CNU [6];

A) Vývojový obraz písmen CNU; B) Rekonštruovaný obraz písmen CNU.

3.5 Optická holografia

[8] Optická skenovací holografia je technika prvý krát predstavená Poonom a Korpelom v roku 1979, v ktorej holografická informácia objektu môže byť nahrávaná pomocou zmiešavacieho optického skenovania. Táto technika pozostáva z dvoch častí: nahrávacej (kódovacej) časti a rekonštrukčnej (dekódovacej) časti. V nahrávacej časti je objekt skenovaný dvojrozmernou pomocou časovo závislej roviny Fresnelovej zóny. Táto vznikne superpozíciou rovinnnej vlny a sférickej vlny rôznych frekvencií. Kým je objekt skenovaný, fotodetektor zachytáva svetlo, ktoré prejde objektom (ak objekt svetlo neprepúšťa, ale odráža, fotonásobič môže byť použitý na zachytávanie odrazeného svetla) a privádza zmiešaný prúd $i_{scan}(x,y)$ ako výstup. Prúd nesie informáciu o rovine Fresnelovej zóny, je zmiešaný a stáva sa demodulovaným signálom $i_d(x,y)$. Keď je demodulovaný signál zosynchronizovaný so súradnicami x a y optického systému x - y a naplnený do 2D displeja, to čo je na displeji zobrazené, je hologram alebo kódovaná informácia vo rovine Fresnelovej zóny objektu, ktorý je skenovaný. Pre dekódovanie, 2D displej môže byť odfotený ako diapozitív. Laser môže potom osvietiť tento diapozitív pre rekonštrukciu 3D obrazu.

Pre nahrávanie potrebujeme vytvoriť časovo závislú rovinu Fresnelovej zóny. Na Obrázok 12 vidíme praktickú implementáciu optického skenovacieho systému. Dva deliče lúča (DL) a dve zrkadlá (Z) predstavujú štandardnú konfiguráciu interferometra. Šošovka (L1) je vložená na nižšie rameno interferometra pre vytvorenie sférickej vlny na objekt, zatiaľ čo akusticko-optický frekvenčný menič poskytuje frekvenčnú zmenu Ω dopadajúcej rovinnnej vlny. Táto spolu s časovo závislou rovinou Fresnelovej zóny, vytvorenou pomocou interferencie vzájomne koherentných sférickej a rovinnnej vln, je tvarovaná na objekte.



Obrázok 12 Praktická implementácia optického skenovacieho systému [8].

Rozloženie intenzity časovo závislej roviny Fresnelovej zóny je potom dané nasledujúcim vzťahom

$$\left| A \exp(\omega_0 t) + B \left(\frac{jk_0}{2\pi z} \right) \exp[jk_0(x^2 + y^2)/2z] \times \exp[j(\omega_0 + \Omega)t] \right|^2, \quad (41)$$

kde A a B sú konštanty, reprezentujúce amplitúdu rovinatej vlny a divergujúcej sférickej vlny. Frekvencie ω_0 a $\omega_0 + \Omega$ sú frekvencie rovinatej a sférickej vlny. Parameter z je hĺbkový parameter meraný mimo ohniskovej roviny šošovky (L1) k objektu. Rovnica (41) môže byť rozšírená a prepísaná ako

$$I(x, y; \Omega) = A^2 + C^2 + 2AC \sin \left[\frac{k_0}{2z} (x^2 + y^2) - \Omega t \right], \quad (42)$$

kde $C = Bk_0/2\pi z$. Toto je bežné vyjadrenie roviny Fresnelovej zóny. Časovo závislá rovina Fresnelovej zóny je využitá na skenovanie 3D objektu v dvoch dimenziách a fotodetektor prijíma všetko prenášané svetlo. Predpokladajme, že bodový objekt $\delta(x-x_0, y-y_0)$ sa nachádza vo vzdialenosti z_0 od ohniskovej roviny šošovky (L1). Skenovanie časovo závislej roviny Fresnelovej zóny na danom objekte vyvolá prúd na fotodetektore $i(x, y; z, t)$ daný

$$i_{\text{sken}}(x, y; z, t) \sim \sin \left\{ \frac{k_0}{2z_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] - \Omega t \right\}. \quad (43)$$

Po elektronickom delení $\sin(\Omega t)$ a filtrácii dolnou priepusťou, skenovaný demodulovaný elektrický signál i_d je daný

$$i_d(x, y) \sim \sin \left\{ \frac{k_0}{2z_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \right\}, \quad (44)$$

kde x a y sú determinované pohybom skenovacieho mechanizmu. Signál i_d obsahuje polohu (x_0, y_0) , aj hĺbkovú informáciu (z_0) daného objektu. Ak je skenovaný demodulovaný signál uložený v synchronizácii s súradnicovým systémom x - y skenovacieho zariadenia, je uložená trojrozmerná informácia o objekte. Uložená informácia je efektívne kódovaná informácia alebo hologram daný

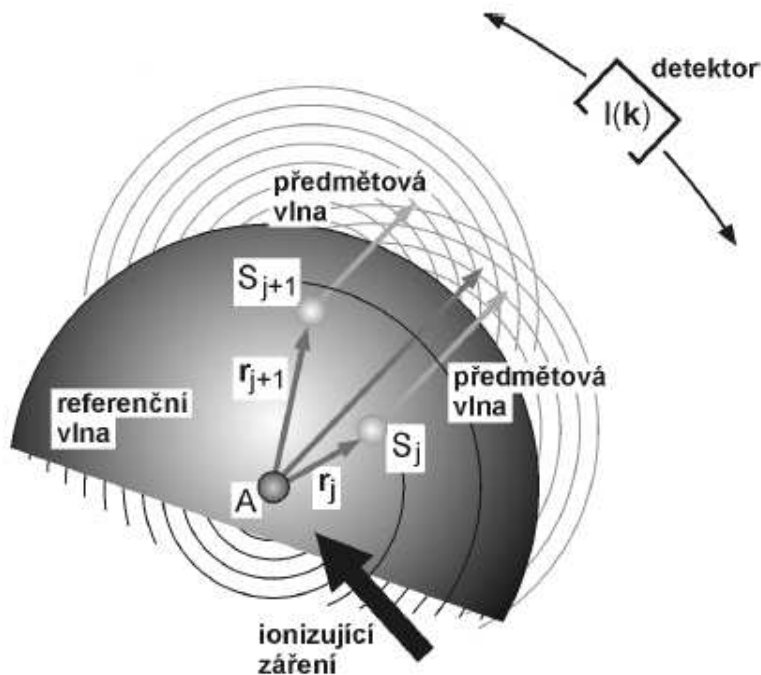
$$\begin{aligned} t(x, y) &\sim \text{konštantné vychýlenie} + i_d \\ t(x, y) &\sim 1 + \sin \left\{ \frac{k_0}{2z_0} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2] \right\}. \end{aligned} \quad (45)$$

Konštantné vychýlenie bolo pripočítané k i_d pre uchovanie fázovej informácie.

Táto technika umožňuje skenovanie v reálnom čase, bez použitia záznamového filmu. Ďalšou výhodou je konštantné vychýlenie počas nahrávania. Stačí nám menšie geometrické rozlíšenie záznamového média pre vyššiu kvalitu rekonštrukcie.

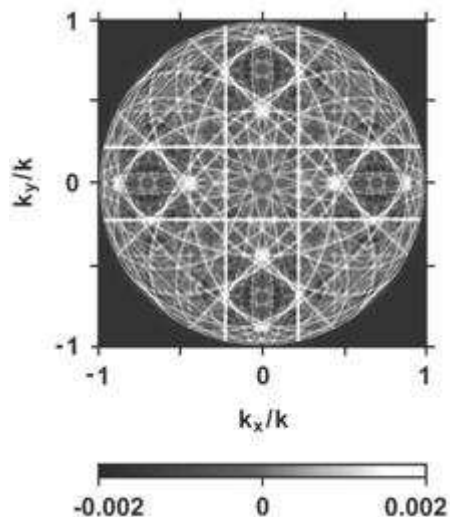
3.6 Rentgénová (X-ray) Holografia

[9] V roku 1986 prišiel Abraham Szöke s myšlienkou, že interferenčné obrazce charakteristického rentgénového žiarenia, fotoelektrónov, či Augerových elektrónov vyžiarených atómami v pevných látkach sú v podstate hologramy, ktoré môžu byť využité k priestorovému zobrazeniu okolia vyžarujúcich atómov. Jedná sa v podstate o Fourierovu holografiiu s veľmi vysokým rozlíšením daným atomárnymi rozmermi zdroja.



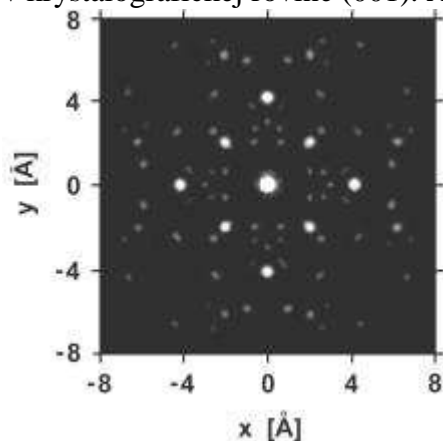
Obrázok 13 Holografia s atomárnym rozlíšením [9].

Uvažujme atóm A, ktorý vyžaruje buď spontánne alebo vďaka excitácii ionizujúcim žiarením z vonkajšieho zdroja (Obrázok 13). Neporušená vlna, ktorá dopadne do vzdialeného detektora bez toho, aby došlo k jej rozptylu, slúži ako referenčná vlna. Zároveň dochádza k rozptylu emitovaného žiarenia na ostatných atómoch S_j s polohovými vektormi r_j , k vzniku predmetových vln a k ich interferencii s referenčnou vlnou. Zo zmeranej závislosti intenzity na smere vyžarovania $I(\mathbf{k})$, kde \mathbf{k} je vlnový vektor, je potom možné zrekonštruovať okolie atómu A. Rekonštrukcia reálneho obrazu (presnejšie rekonštrukcia rozptýleného vlnového poľa) sa tu na rozdiel od klasických holografických metód prevádza výhradne numericky na základe Helmholtzovho-Kirchhoffovho integrálneho teorému. Táto teória bola experimentálne potvrdená najprv pre prípad elektrónovej holografie, neskôr bola úspešne využitá k holografickému zobrazeniu atómov aj rentgénové žiarenie. V roku 1996 bola navrhnutá a experimentálne overená inverzná schéma rentgénovej holografie. Hlavná výhoda tejto metódy spočíva v tom, že dovoľuje merať hologramy nielen pre niekoľko jeho charakteristických energií ako je to v prípade klasickej rentgénovej holografie popísané vyššie, ale pre ľubovoľnú energiu fotónov nad absorpčnou hranou vybraného atómu. Pritom rekonštrukcia hologramov nameraných pri viacerých energiách umožňuje lepšie potlačenie virtuálnych obrazov atómov. Rentgénová holografia poskytuje v porovnaní s elektrónovou holografiou radu výhod, ale zároveň prináša aj radu praktických problémov pri realizácii experimentu. Rozptyl rentgénového žiarenia na atómoch je omnoho slabší a viac izotropný než rozptyl elektrónov, čo umožňuje získať kvalitnejšie obrazy atómov. Na druhej strane holografický signál od najbližších stredne ťažkých atómov tvorí v prípade rentgénového žiarenia približne len 0,1 % celkovej intenzity, čo kladie vysoké nároky na presnosť merania. Ako príklad uvediem využitie absorpčnej holografie k zobrazeniu okolia atómov kobaltu monokryštáľa CoO. Experiment bol provedený v difrakčnej sekcii synchrotrónu Elettra v Terste pri energii zväzku 13 keV. Zmeny lineárneho absorpčného koeficientu $\mu(\mathbf{k})$ v závislosti na smere dopadu synchrotrónového zväzku znázorňuje Obrázok 14.



Obrázok 14 Závislosť lineárneho absorpčného koeficientu $\mu(k)$ zmeraná na planárnej doštičke kryštáľa CoO pri energii zväzku 13 keV [9].

Okrem ostrých čiar v smeroch, v ktorých dochádza k difrakcii, sú tu vidieť aj pomalšie oscilácie. Tieto oscilácie v rozsahu $\pm 0,2\%$ tvoria vlastný hologram, ktorý môžeme využiť k rekonštrukcii okolia atómov kobaltu. Obrázok 15 zobrazuje príklad obrazu atómov kobaltu v kryštalografickej rovine (001). Atómy kyslíka nie sú vidieť v dôsledku ich malej hmotnosti.



Obrázok 15 Holografická rekonštrukcia atómov kobaltu v kryštalografickej rovine (001) [9].

Holografia s atomárnym rozlíšením je nová metóda, ktorá umožňuje zobrazit' okolie atómov vybraného prvku. Napriek tomu, že sa pomocou holografie doteraz nepodarilo vyriešiť žiadnu neznámu štruktúru, javí sa táto technika ako veľmi perspektívna hneď z niekoľkých dôvodov. Na rozdiel od difrakčného obrazu obsahuje holografický záznam informáciu o amplitúde rozptýlenej vlny, ale aj o jej fáze. Odpadá tak nutnosť riešiť fázový problém vlastný difrakčným metódam. Holografia nevyžaduje translačnú periodicitu atomárnej štruktúry, čím sa otvára možnosť určovať štruktúry aj organických látok, ktoré nie je možné skryštalizovať, či kvazikryštáľov, študovať lokálne okolie nečistôt, implantovaných iontov s malými koncentraciami, okolie atómov absorbovaných na povrchu materiálu atď.

4 Záznam hologramu

4.1 Záznamové prostredie

[1] Záznamovým prostredím budeme nazývať prostredie, v ktorom pôsobením svetla dochádza k trvalým zmenám jeho fyzikálnych vlastností, t. j. nevratný spôsob záznamu. Môžeme sem zaradiť fotografické emulzie na báze svetlocitlivých zlúčenín striebra, ktoré patria k najstarším ale v súčasnosti stále najčastejšie používaným záznamovým prostrediam holografickej interferometrie. Ako záznamové prostredie sa najviac využíva fotografická citlivá vrstva s vysokou rozlišovacou schopnosťou.

Podmienky pre záznam hologramu musia byť volené tak, aby sa skutočne získal hologram a aby mal dobrú kvalitu. Jedným z najdôležitejších predpokladov je voľba záznamového prostredia, ktorého rozlišovacia schopnosť musí umožniť záznam jemnej štruktúry hologramu. Vzďialenosť prúžkov mriežky, ktorá vznikne interferenciou dvoch rovinných vln závisí na uhle medzi týmito dvoma vlnami. Preto prostredie pre holografiiu musí byť upravené tak, aby použitý materiál dovolil zaznamenať túto mriežku.

V experimentálnej praxi sa štandardne používajú záznamové prostredia, ktoré je možné klasifikovať z rôznych hľadísk podľa mechanizmu interakcie svetelného žiarenia s materiálom s predpokladaným využitím. Podľa toho, či dopadajúca vlna ovplyvňuje priepustnosť, index lomu alebo hrúbku prostredia poznáme amplitúdové alebo fázové záznamy.

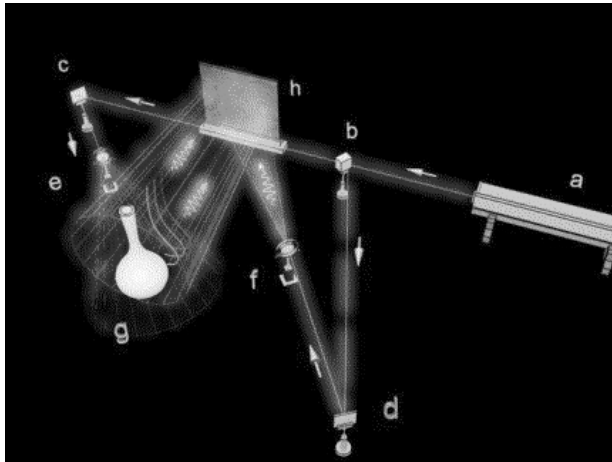
Toto delenie platí pre interakciu záznamu s rekonštrukčnou vlnou, pri ktorej sa ovplyvňuje amplitúda alebo fáza vlny. V praxi sa vyskytujú komplexné záznamy vplyvajúce na obidve charakteristiky.

Na holograme sa nezaznamenáva samotný obraz predmetu, ale štruktúra svetelnej vlny, ktorá sa odrazila a rozptýlila na predmete. Na získanie hologramu je potrebné, aby na fotografickú emulziu dopadali súčasne dva zväzky svetelných lúčov: zväzok rozptýlený na predmete (alebo ktorý prešiel transparentným predmetom), ktorý nesie informáciu o predmete – objektový zväzok a zväzok vychádzajúci z toho istého zdroja, referenčný zväzok, ktorému v ceste nestojí nijaká prekážka.

Tieto dva zväzky musia spolu interferovať. Ďalej je potrebný záznamový materiál, ktorý je citlivý na vlnovú dĺžku použitého laserového žiarenia a má dostatočné rozlíšenie (min. 1500 čiar/mm). Interferenčný obraz sa zaznamená na holografickú dosku. Tento prvý krok sa nazýva záznam na holografickú dosku. Exponovaná a fotochemicky spracovaná holografická doska sa nazýva hologram.

Zjednodušene možno princíp holografie popísať podľa Obrázok 16. Z lasera vychádza úzky zväzok lúčov, ktorý sa na deliči rozdelí na dva zväzky. Zväzok, ktorý prejde deličom je odrazený od zrkadla a usmernený do rozptylnej šošovky, ktorou je rozšírený a dopadá na predmet, na ktorom sa difúzne odráža k holografickej doske.

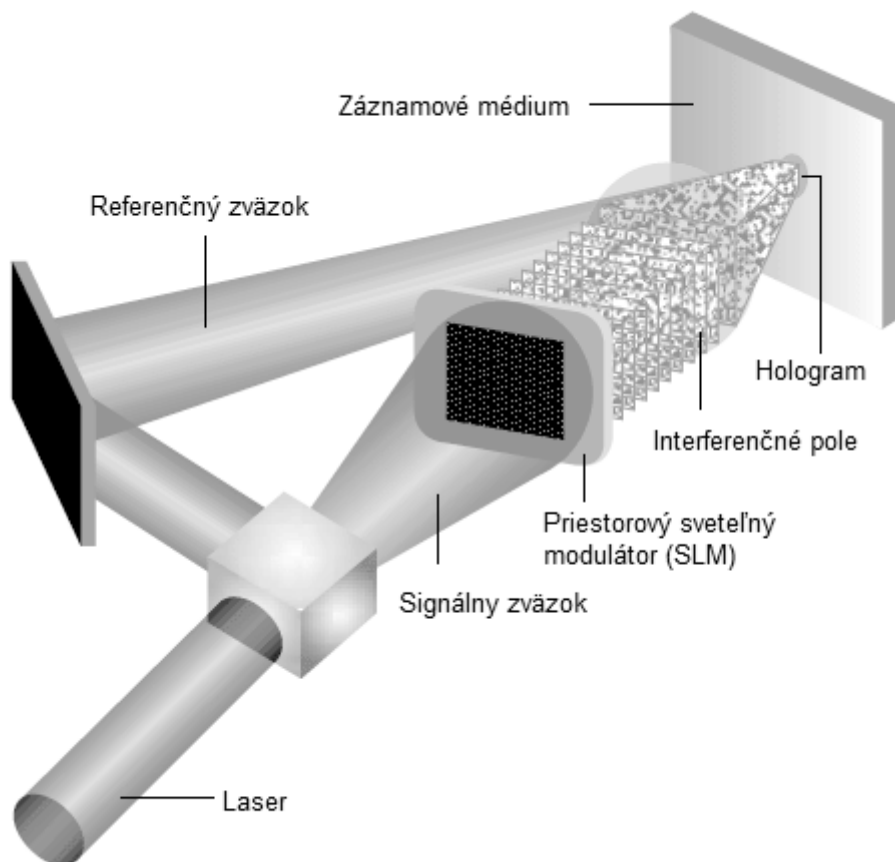
Tento zväzok tvorí predmetovú vlnu. Druhý zväzok, referenčný, vznikne odrazom od deliacej doštičky a je odrazený od zrkadla a ďalej usmernený do mikroobjektívu, ktorým je rozšírený a ďalej objektívom pretransformovaný na rovinné svetelné vlny, ktoré dopadajú na holografickú dosku. Vybraný bod predmetu je zdrojom svetelnej vlny, ktorá vo vyšrafovej časti interferuje s referenčnou vlnou. Takto s referenčnou vlnou interferujú všetky svetelné zväzky odrazené od jednotlivých bodov osvetlenej časti predmetu P. Výsledné interferenčné pole možno zaznamenať v na holografickú dosku alebo film.



Obrázok 16 klasický záznam hologramu [1];

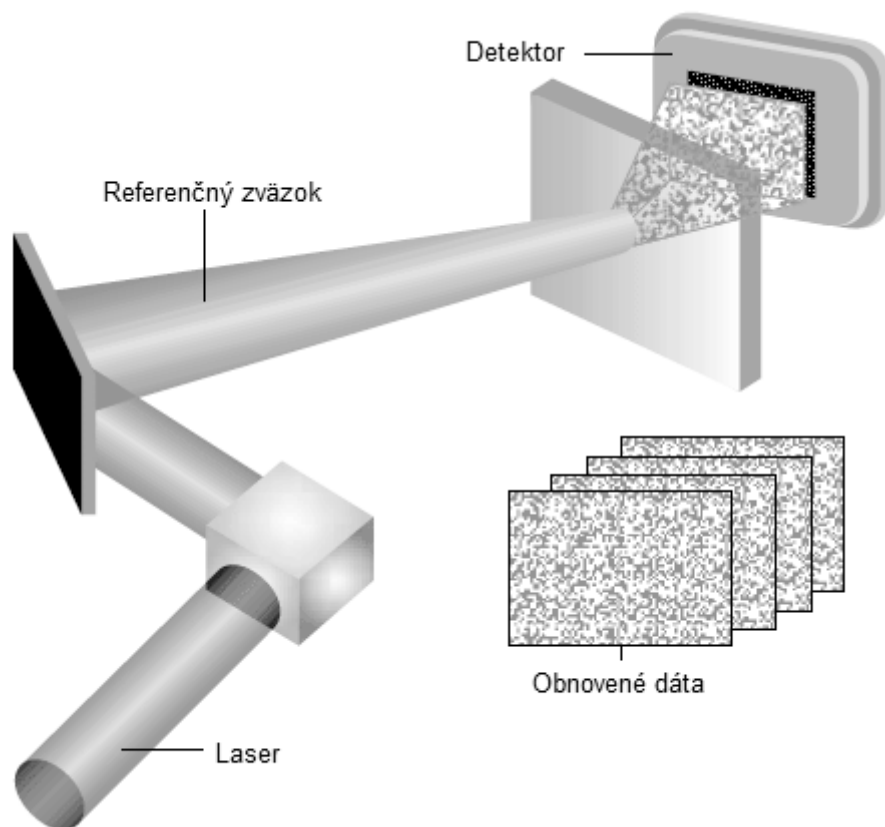
a – laser, b – delič, d – zrkadlá, f – mikroskop, e – objektív, g – predmet, h – holografická doska.

[2] V prípade, že ide o digitálne dáta, ktoré majú byť uložené, nakódujú sa na signálny zväzok pomocou priestorového svetelného modulátora (Spatial Light Modulator - SLM). Dáta (reťazce bitov) sa najprv usporiadajú do stránok alebo veľkých dátových polí. Logické hodnoty "0" a "1" sa prekladajú do pixelov na priestorovom svetelnom modulátore, a to tak, že buď svetlo pohlcujú, alebo ho propúšťajú. Signálny lúč teda po priechode modulátorom neise "šachovnicový" vzor dátovej stránky. Tento signálny zväzok potom na fotocitlivom záznamovom médiu interferuje s referenčným zväzkom, pričom dôjde k uloženiu dátovej stránky.



Obrázok 17 Schéma ukladania dát [2].

Čítanie holografického záznamu je založené na ohybe čítacej vlnoplochy na zázname interferenčného poľa. Ak je záznam ožiarený vlnoplochou zhodnou s jedným z oboch zväzkov za rovnakých podmienok, za akých prebehol záznam (smer, tvar), zobrazí sa aj druhý zväzok. Práve tak sa používa referenčný lúč pri čítaní k tomu, aby spôsobil ohyb na zaznamenaných mriežkach, čím dochádza k rekonštrukcii poľa bitov. Zrekonštruovaná sada dát sa premieta na detektor, ktorý sa skladá z poľa pixelov a dokáže tak čítať dáta paralelne (princíp CMOS známy z digitálnych fotoaparátov). Rýchlosť takéhoto holografického čítania sa potom môže pohybovať od 10 do 100 MB/s.



Obrázok 18 Schéma čítania dát [2].

Premenlivou hodnotou referenčného lúča, napr. pri zmene uhla dopadu alebo zmene vlnovej dĺžky, je možné čítať z rovnakého miesta rôzne dáta, ak sa použije vždy práve taká úroveň referenčného lúča, ktorá bola použitá pri zápise. Čítanie je tak závislé na promenlivej hodnote referenčného lúča. Takýto spôsob multiplexovania dát prináša enormnú kapacitu zápisu holograficky uložených dát. Z podstaty holografického zobrazenia vyplýva tiež možnosť asociatívneho vybavovania dát. Dá sa zistiť, či je daný hľadaný dátový súbor v pamäti zapísaný alebo pomocou ním modulovaného signálu dokonca vybavovať s ním spojené (asociované) dáta. Dochádza tak jediným osvetlením k paralelnému porovnaniu štruktúry hľadanej informácie (alebo jej časti) so všetkými záznamami, uloženými v pamäťovom zázname.

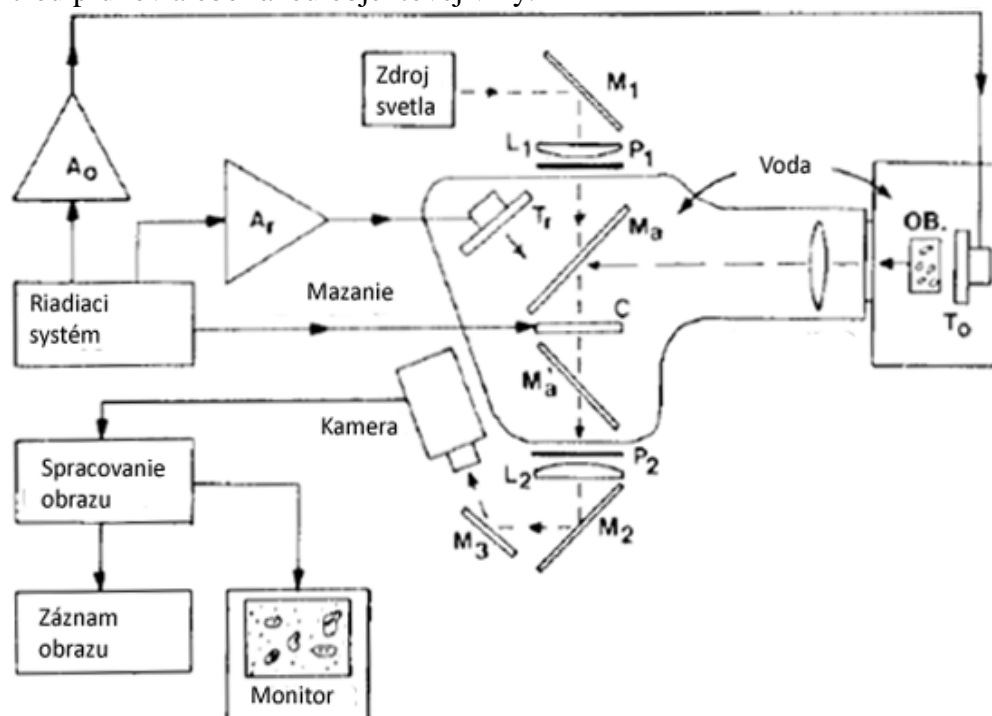
4.2 Metódy záznamu fázového hologramu

LCC kamera

[14] Ultrazvuková LCC kamera je schematicky zobrazená na obrázku č.1. Jadrom systému je mriežka tekutého kryštálu alebo konvertor (LCC) C, ktorý bude opísaný neskôr. skúmaný objekt je ožiarený vysielačom T_0 a energia prenesená do druhej nádrže sa sústreďí v C pomocou hydroakustickej šošovky po odraze na zrkadle M_a (sklenená doska). LCC je vysoko priehľadný pre frekvencie okolo 3,6 MHz. Nakoniec sú vlny absorbované po odraze na zrkadle M'_a . Rovinná referenčná vlna prichádzajúca z vysielača T_r prechádza M_a a interferuje s objektovou vlnou vo vrstve tekutého kryštálu C. Ultrazvukový kontrolný systém generuje vhodné sínusové signály s premenným oneskorením medzi referenčnými a objektovými kanálmi pre vznik prekryvania vlnovej postupnosti na C. Dva lúče sa stanú koherentnými a vznikne stabilný interferenčný vzor alebo hologram vo vrstve, kde dochádza k interakcii s molekulárnou orientáciou.

Tento vzor je obrazový hologram (prúžkový obraz), ktorý je priamo viditeľný pomocou cylindrického polarizovaného svetelného lúča, vzniknutého sústredením žiariaceho svetelného zdroja, šošoviek, polarizérov a zrkadiel.

Pruhový kontrast je funkciou vlnovej intenzity objektu na danú referenčnú vlnovú intenzitu. Ich pozícia je funkciou fázy objektovej vlny. Video kamera poskytuje korešpondujúce signály zobrazovací systém. Jeden video sa skladá z kvázi sínusového nosného signálu, ktorý je amplitúdovo modulovaný kontrastom pruhov a fázovo modulovaný pozíciou pruhov alebo fázou objektovej vlny.

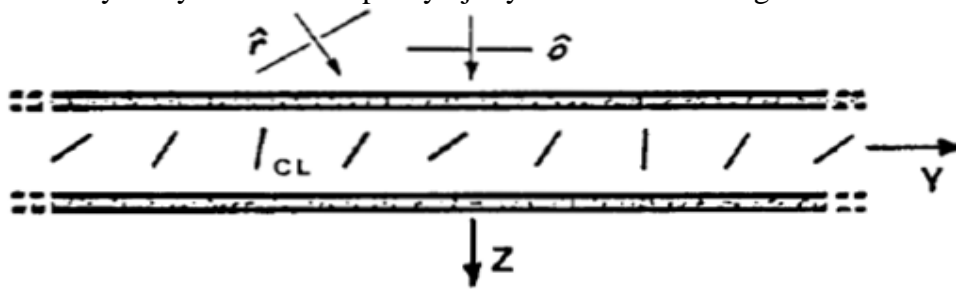


Obrázok 19 Ultrazvuková holografická kamera s detektorom z tekutého kryštálu. [14]

Konvertor z tekutého kryštálu:

Prierez LCC je zobrazený na Obrázok 20 Prierez konvertorom z tekutého kryštálu [14]. Rozvrstvené steny pozostávajúce z dvoch sklenených dosiek, ktoré sú oddelené vrstvou polyméru, majú celkovú hrúbku približne 350 μm . Táto štruktúra je vysoko transparentná pre ultrazvukové vlny na frekvencii 3,6 MHz pre rôzne uhly dopadu. To je dôležitá podmienka pre akustickú interakciu. Tekutý kryštál má homotropickú štruktúru (molekuly zvislo k stenám) a jeho hrúbka je okolo 250 μm . Nematická zložka má pozitívnu dielektrickú anizotropiu, ktorá jej dovoľuje rapidnú reorientáciu molekúl v striedavom elektrickom poli,

vzniknutom medzi polopriepustnou elektródou na jednej stene a opačnom vodnom povrchu naprieč tekutým kryštálom. Toto poskytuje rýchle mazanie hologramu.



Obrázok 20 Prierez konvertorom z tekutého kryštálu [14].

Referenčné akustické pole rýchlosti vo vrstve tekutého kryštálu môže byť zapísané ako:

$$\vec{U}_r(x, y, z, t) = |\vec{U}(x, y, z)| \hat{r} \cdot \exp j[\omega t + \Phi_r(x, y, z)]. \quad (46)$$

Pole objektivej vlny:

$$\vec{U}_o(x, y, z, t) = |\vec{U}(x, y, z)| \hat{\delta} \cdot \exp j[\omega t + \Phi_o(x, y, z)]. \quad (47)$$

kde \hat{r} a $\hat{\delta}$ sú vektory v smere šírenia. Súčet vektorov je:

$$\vec{U} = \vec{U}_o + \vec{U}_r. \quad (48)$$

Napríklad, ak sa dve rovinné vlny šíria v rovine x-z, výsledná vlna je eliptická a periodická pozdĺž osi x. Vzniká šum, ktorý je najväčší v strede roviny. Pomocou vhodného osvetlenia je tento viditeľný ako paralelné pruhy, orientované pozdĺž osi y.

Spracovanie obrazu:

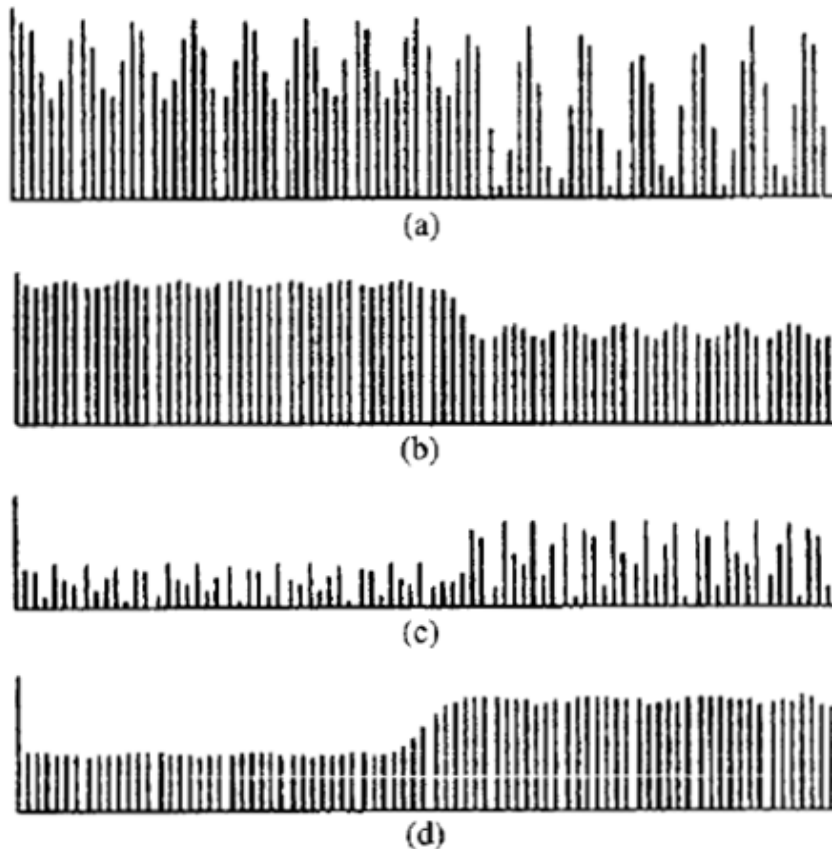
Odstránenie pruhov na holograme je vykonávané analógovými technikami.

Zobrazovanie intezity: Viditeľný obraz akustických intenzít môžeme získať pomocou amplitúdovej modulácie videosignálu. Signál môže byť aproximovaný:

$$S(t) = C(t) + A(t) \cos[\omega_1 t + \psi(t)], \quad (49)$$

Kde $C(t)$ je nízko-frekvenčná zložka (korešpondujúca s jasom pozadia) a $A(t)\cos(\dots)$ je nosný signál, amplitúda $A(t)$ je modulovaná akustickou intenzitou. Fáza $\psi(t)$ je modulovaná pozíciou pruhov vzťahnutou k fáze objektivej vlny.

Digitálne spracovanie pre zobrazovanie intezity je simulované na Obrázok 21 Počítačová simulácia „odpruhovacieho“ procesu digitálneho hologramu. (a) 5 vzoriek za periódu s dvoma hodnotami kontrastu. (b) Filtrovanie pomocou DP. (c) Rozdiel (a) v absolútnej hodnote. (d) Filtrovanie (c), pomocou DP [14].



Obrázok 21 Počítačová simulácia „odpruhovacieho“ procesu digitálneho hologramu. (a) 5 vzoriek za periódu s dvoma hodnotami kontrastu. (b) Filtrovanie pomocou DP. (c) Rozdiel (a) v absolútnej hodnote. (d) Filtrovanie (c), pomocou DP [14].

Holografická interferometria a fázové zobrazovanie: Pre získanie fázového obrazu korešpondujúceho k pruhovému posuvu, potrebujeme referenčný signál. To môžeme dosiahnuť nahraním hologramu pozadia. Jeden video riadok môže byť aproximovaný:

$$S_0(t) = C_0(t) + A_0(t) \cos[\omega_1 t + \psi_0(t)]. \quad (50)$$

Rozdiel medzi touto a predošlou rovnicou nám dáva interferometrický hologram a súvisiaci video signál $S'(t)$.

$$S'(t) = C'(t) + A'(t) \cos[\omega_1 t + \psi'(t)], \quad (51)$$

kde ak zjednodušíme $\psi_0(t) = 0$,

$$A'(t) = [A_0^2 - 2A_0A_r \cos\psi(t) + A_r^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (52)$$

Z tohto dôvodu nosná amplitúda $A'(t)$ bude sledovať fázu objektu, ktorá je vzťahovaná k $\psi(t)$.

Rekonštrukcia pomocou priestorového svetelného modulátora

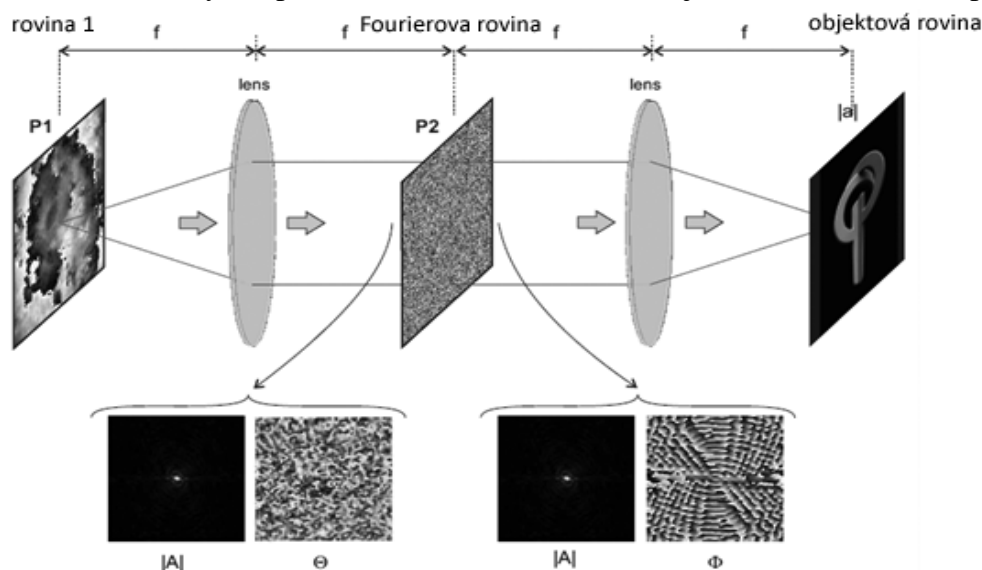
Táto realizácia bola predstavená v roku 1984 H. Barteltom. Umožňuje vytvoriť ľubovoľné komplexné svetelné pole použitím dvoch po sebe idúcich fázových difraktívnych optických elementov. Namiesto vzniku amplitúdovej modulácie s absorbčnou maskou, využijeme rozdelenie intenzity prichádzajúceho lúča pomocou osovej difrakcie na prvom fázovom holograme. To premietne požadovanú prepočítanú amplitúdovú moduláciu s teoreticky nekonečne vysokým kontrastom a bez akejkoľvek straty svetelnej intenzity na druhý fázový displej, ktorý opraví fázy príslušných Fourierových komponentov. Za druhou maskou je generovaná amplitúda vypočítaného rozloženia poľa. Komplexná modulácia vytvorí hologram,

kde amplitúda aj fáza nastavované nezávisle. Aj keď je hologram rekonštruovaný na ose, generované svetelné pole neobsahuje neželané príspevky ostatných difrakčných smerov.

Implementácia tejto techniky využíva statické difrakčné elementy, ako bielené filmy, ktorých výroba je relatívne zložitá a časovo nákladná.

Princíp metódy:

Obrázok 22 Princíp metódy [15]. zobrazuje schematicky princíp techniky. Metóda vyžaduje dva fázové difrakčné elementy, uložené v združených Fourierových rovinách v trase lúča(plane 1, Fourier plane), čo znamená že svetelné polia v týchto rovinách sú matematicky spojené Fourierovou transformáciou. Tieto dva elementy sú na obrázku ako P1 a P2. Obrázky pred a za P2 zobrazujú aktuálnu amplitúdu a fázu.



Obrázok 22 Princíp metódy [15].

Vytvorenie poľa $a(x, y) = |a(x, y)| \exp[i\phi(x, y)]$ v objektivej rovine vyžaduje konečné komplexné pole $A(u, v) = |A(u, v)| \exp[i\Phi(u, v)]$ vo Fourierovej rovine, ktorá môže byť vyjadrená ako:

$$A(u, v) = \frac{1}{\lambda f} \int_x \int_y a(x, y) \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (ux + yv) \right] dx dy, \quad (53)$$

kde λ je vlnová dĺžka lasera a f je ohnisková vzdialenosť Fourierovej transformačnej šošovky. Fáza poľa $A(u, v)$ môže byť priamo tvarovaná elementom P2 vo Fourierovej rovine (amplitúda nie). Amplitúda je tvorená pomocou P1, ktorá môže byť iteratívne optimalizovaná použitím špecifických algoritmov fázových difrakčných optických elementov tak, že vytvoria požadovaný modul $|A(u, v)|$ vo Fourierovej rovine, ak je homogénne osvetlená. Pracuje to aj ak $|A(u, v)|$ má veľmi veľký kontrast, tak ako typické Fourierove hologramy. Dôsledkom tejto optimalizačnej procedúry je, že pole vytvorené pomocou P1 v rovine P2 bude mať náhodne rozloženú fázu $\Theta(u, v)$. Zvyčajne, táto fáza nebude korešpondovať s požadovanou fázovou funkciou $\Phi(u, v)$. Aj keď fáza $\Theta(u, v)$ nemôže byť kontrolovaná, pokiaľ je použitá ako optimalizačný parameter pre vznik $|A(u, v)|$, poznáme ju. Myšlienkou je modifikovať Θ pomocou P2 tak, že výsledok je $\Phi(u, v)$. P2 teda vypočítame ako:

$$P2 = \text{mod}2\pi\{\phi - \Theta\}, \quad (54)$$

kde $\text{mod}2\pi\{\dots\}$ symbolizuje „modulo-“ operáciu, ktorá obmedzí fázu P2 do intervalu medzi 0 a 2π . Táto procedúra generuje požadované komplexné pole $A(u, v)$ priamo za

druhou fázovou maskou P2 a ďalej $a(x,y)$ v objektovej rovine. Teoreticky nie je stratené žiadne svetlo, pretože táto metóda používa neabsorbčné fázové elementy.

4.3 Záznamový materiál

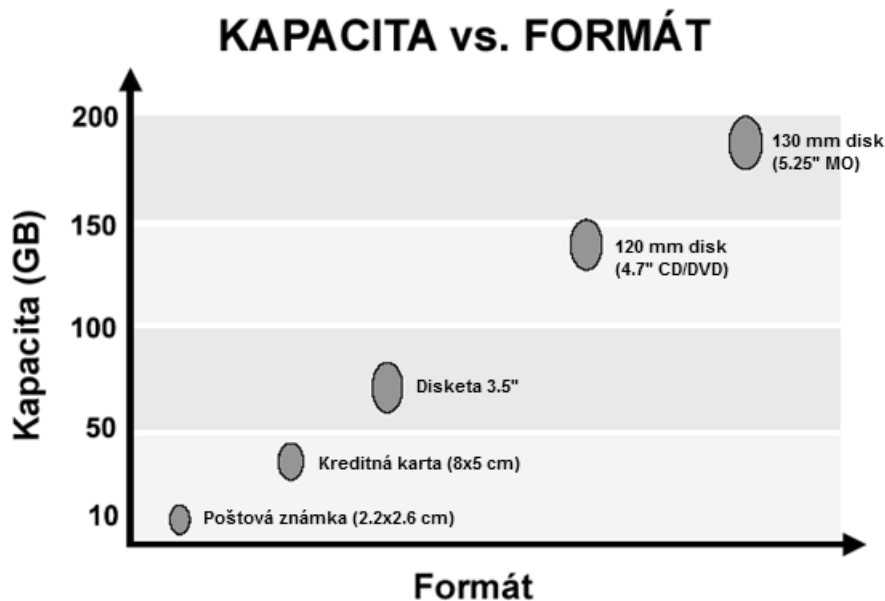
[2] Na záznamový materiál pre holografické pamäte sú kladené vysoké nároky. Zpôsob záznamu vyžaduje dostatočnú optickú priepustnosť, citlivosť, homogenitu, rozmerovú a teplotnú stabilitu. Dôležité je tiež nedeštruktívne čítanie a malá hrúbka.

Už od prvých pokusov o holografický záznam informácie je v strede záujmu niobičnan lítny (LiNbO_3) dopovaný železom (Fe) a prvkami vzácnych zemín (napr. prazeodymom Pr). Tento materiál sa získava rastom z taveniny podobne ako polovodičové materiály. Vyznačuje sa piezoelektrickými vlastnosťami, spojenými so zmenou indexu lomu v dôsledku odlišného vnútorného pnutia.

Inými významnými kandidátmi záznamových materiálov sú polyméry. Pre trvalý záznam je možné využívať difúziu farbiva za tepla, viazaného na polymérové reťazce alebo zmeny absorpcie fotochrómnych molekúl ožiarení. Ďalší mechanizmus je založený na vzniku optickej anizotropie v dôsledku polymerizácie pod vplyvom ožiarenia, takže záznam je zobrazený zmenou dvojlomných vlastností. Dvojlomný je aj záznam využívajúci reorientácie chromoforov na báze azo-farbív v dôsledku ožiarenia. Vlastnosti polymérov väčšinou preyšujú vlastnosti niobičnanu lítneho. Zatiaľ sa polyméry javia ako vhodnejšie pre trvalý holografický záznam. To ukazujú aj výskumy firiem, ktoré sa holografickými záznamami zaoberajú. Napr. firma InPhase tech. vytvorila špeciálny fotopolymér vykazujúci potrebné parametre. Je tvorený zmesou dvoch nezávisle polymerovaných, ale ešte kompatibilných chemických materiálov. Zapisovateľné disky sú tvorené miestnou polymerizáciou jednej zložky, ktorá vytvorí maticu média. Druhá zložka, ktorá je fotocitlivá, zostane bez reakcie a roztrúsená v tejto matici. Záznam hologramov nastáva skrz priestorový vzor generovaný počas holografického zápisu (zjednodušene: v nosnom médiu sa vytvorí vďaka jednej chemickej zlúčenine matice, do ktorej sa vďaka druhej zlúčenine zapisujú dáta).

Dôležitá skutočnosť oproti klasickým CD a DVD diskom je tá, že holografické média sú priepustné. Teda žiadny odraz. Na jednej strane sa médium osvieti a na druhej sa dáta čítajú. Tieto materiály umožňujú zaznamenať až 31,2 Gb na štvorcový palec, čo v prepočte na veľkosť klasickej 5.25" diskety obnáša 45 GB! Samozrejme novo vyvíjané materiály sú schopné zaznamenať až 300 Gb na štvorcový palec aj so zachovaním veľmi rýchleho dátového prenosu. Táto technológia nevyžaduje vysoké otáčky média, aby bol zachovaný rýchly prenos dát, tak ako to vidíme u dnešných CD a DVD.

Na nasledujúcom grafe Graf 3) je znázornená závislosť kapacity na veľkosti použitého média, pri použití modrého lasera (405-407 nm) a jednoduchého spôsobu zápisu u média Tapestry™ vyvinutého firmou InPhase Technologies:



Graf 3 Závislosť kapacity a formátu (rozmerov) média [2].

Výhody holografického záznamu sú teda zrejmé. Jedinú nevýhodu - nemožnosť prepisu holografického zápisu - sa snaží prekonať niekoľko firiem, treba povedať že s nádejnými výsledkami.

[4] Ideálne fyzikálne vlastnosti záznamových materiálov:

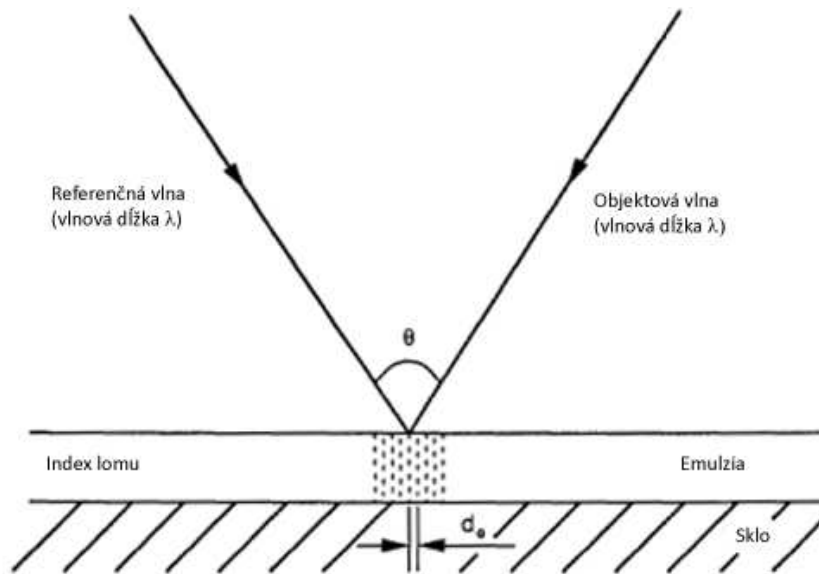
- *Nahrávacie zariadenie* – veľký dynamický rozsah, optickej indukovnej a pokiaľ možno opticky zmazateľnej, zmeny indexu lomu ($\Delta n_{\max} \cong 10^{-3}$ až 10^{-2}), zanedbateľná absorpcia;
- *Citlivosť* – reagujúca na (široko a lacno dostupné) červené vlnové dĺžky, značná citlivosť holografického zápisu, vyžadujúca malé nahrávacie výkony;
- *Optická kvalita* – vhodná pre odlievanie vo forme tenkých doštičiek s veľkými povrchovými plochami, vysoké rozlíšenie, zanedbateľný rozptyl;
- *Stabilita* – udržanie nahratých dát nekonečne dlho pri širokej škále pôsobenia prostredia (teplota, vlhkosť, atď.), malé opotrebovanie pri mnohých (miliónoch) cykloch nahrávanie-čítanie-mazanie;
- *Priechodnosť* – fyzikálny význam „fixovania“ nahratých hologramov, aby neboli poškodené ďalšími nahrávacími a čítacími lúčmi;
- *Samospracovanie* – bez potreby spracovania alebo vyvolávania akéhokoľvek druhu (chemického, magnetického, termálneho, UV, IR, atď.) pred alebo po nahrávaní;
- *Cena* – materiál ľahko a lacno dostupný alebo vyrobiteľný.

Rozlíšenie obrazu závisí na viacerých parametroch. Ak λ je vlnová dĺžka laserového svetla použitého pre záznam hologramu, potom najnižšia vzdialenosť d_a medzi prúčkami v interferenčnej rovine (vo vzduchu) je:

$$d_a = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (55)$$

V záznamovej vrstve, medzera medzi pásmi d_s bude závisieť na indexe lomu n emulzie:

$$d_s = \frac{\lambda}{2n \sin(\theta/2)} \quad (56)$$



Obrázok 23 Požiadavky pre záznam hologramu [10].

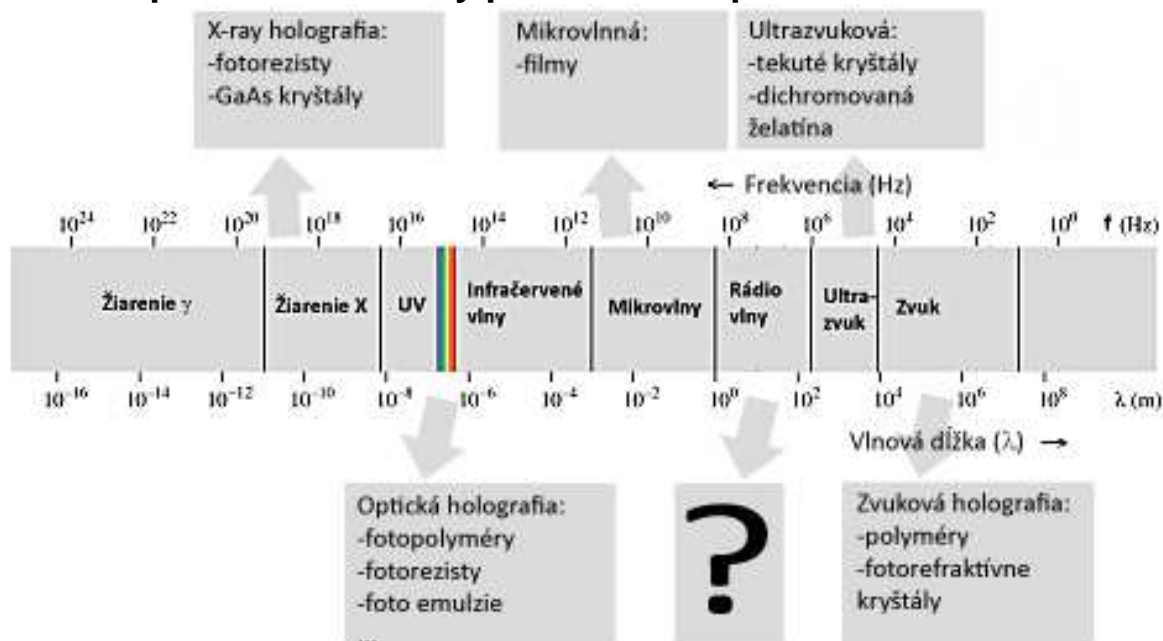
Rozlíšenie obrazu

[10] Teoreticky, rozlíšenie holografického obrazu by malo byť difrakčne limitované rozlíšenie, ktoré môže byť získané, ak informácia je získaná pomocou apertúry zhodnej s veľkosťou nahrávacej holografickej dosky. Čím väčšia bude holografická doska, tým väčšie rozlíšenie získame. Limitom je rád vlnovej dĺžky, keď rozmer dosky je nekonečný. Ak je doska príliš veľká, rozlišovacia schopnosť nahrávacieho média dosiahne pravedpodobne hranicu rozlíšenia obrazu. V praxi, pre emulziu budeme potrebovať podporu (napríklad sklenenú dosku), ktorá udrží pozíciu pásov emulzie bez fixácie. Najväčším obmedzením rozlíšenia je skreslenie samotnej emulzie.

Tieto chyby vznikajú:

- kolísaním hrúbky záznamového média pred spracovaním
- kolísaním hrúbky záznamového média vzniknutého počas spracovania
- kolísaním indexu lomu záznamového média vzniknutého počas spracovania
- deformáciou záznamového média, ktoré nastane medzi záznamom a rekonštrukciou

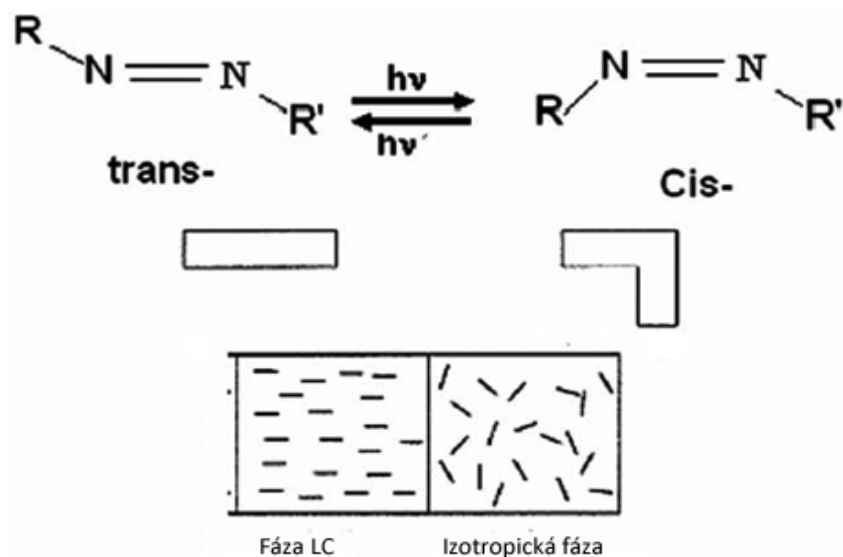
4.4 Perspektívne materiály pre záznam v pásme MHz vln



Obrázok 24 Známe druhy materiálov pre záznam jednotlivých druhov holografie.

Fotoaktívny polymér z tekutého kryštálu

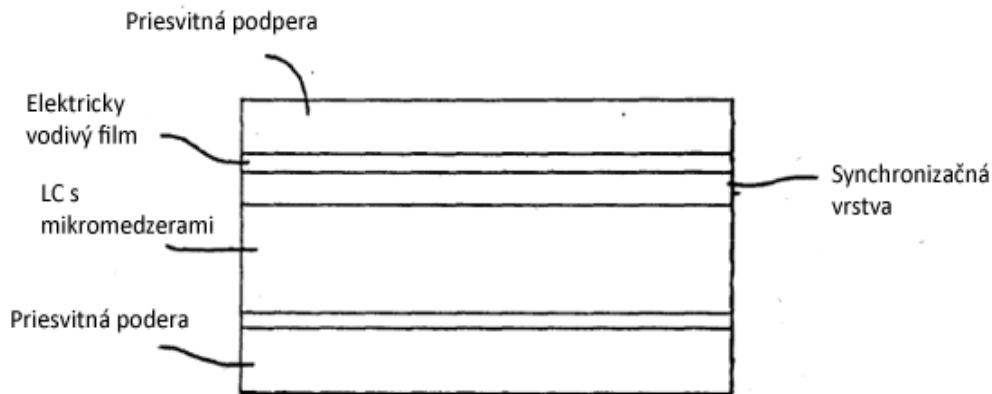
Azobenzénové polyméry patria medzi najviac skúmané fotoaktívne polyméry. Ak používame azobenzénové polyméry pre nahrávanie hologramu, jednoduché mriežkovanie vzhľadom k periodickej modulácii indexu lomu medzi neusporiadanými trans- a cis-azobenzénom vytvára iba malú zmenu indexu lomu. Obrázok 25 Cis-trans vzájomná premena a zmena LC počas ožiarenia [19]. ukazuje cis-trans premenu a zmenu stavu tekutého kryštálu ožiarením. Veľká modulácia indexu lomu vyvstáva z fázového prechodu medzi nematickým a izotropickým stavom. Nematický stav je kompatibilný s tyčovým trans-azobenzénom a neusporiadaný stav vzniká disorganizáciou stavu tekutého kryštálu otočením cis-azobenzénu. Holograficky formované polymérové disperzné tekuté kryštály sú fázovo oddelené zložky, ktoré umožňujú elektricky meniteľné holografické záznamy. Tieto vzniknú pomocou holografickej expozície, z ktorej vznikne interferenčný vzor, ktorý je snímaný polymerizáciou a vytvorí Braggovu mriežku. Aplikácia elektrického poľa eliminuje Braggovu mriežku a materiál sa stane opticky priepustným.



Obrázok 25 Cis-trans vzájomná premena a zmena LC počas ožiarenia [19].

Záznamové médium môže byť zmazané a uvedené do pôvodného stavu zvýšením teploty a následným ochladením. Hustota holografického zápisu je 5000-6000 riadkov/mm. Toto záznamové médium nie je vhodné pre komerčné využitie, pretože výrobné procesy sú zložité pre sériovú výrobu a tým sa zvyšuje aj chybovosť finálneho produktu. Polyméry z tekutého kryštálu majú malú molekulárnu hustotu, čo má za následok slabé mechanické vlastnosti.

[17] Ďalšou vhodným materiálom pre záznam fázového hologramu je tekutý kryštál s mikromedzerami medzi prúžkami.



Obrázok 26 Štruktúra záznamového materiálu [17].

Zvukové fázové hologramy alebo holograficko optické elementy snímajú informáciu ako moduláciu indexu lomu média, v ktorom prebieha záznam hologramu. Polymerizácia monomeru prezentuje laserovú holografickú expozíciu ako rovinu pruhov alebo súvrstvia polyméru. Polymér obsahujúci pruhy má iný index refrakcie než materiál medzi pruhmi. Výsledná modulácia svetla ako funkcia rozdielu indexov umožňuje rekonštrukciu hologramu.

Je možné vytvoriť teda hologram, kde sú mikromedzery medzi pruhmi, ktoré modifikujú optické a ďalšie vlastnosti hologramu, nahradením vzduchu medzi pruhmi iným materiálom. Tieto mikromedzery sú aspoň z časti zakryté tekutým kryštálom. Orientácia tekutého kryštálu môže byť zmenená pôsobením elektrického poľa. Tekuté kryštály sú charakterizované tým, že majú jeden index lomu pre dlhú osu a druhý pre krátku osu. Zmena indexu lomu na základe reorientácie je funkciou dvojlomného tekutého kryštálu. Výberom tekutého kryštálu, ktorý má index lomu zhodný s refrakciou média, je možné redukovať difrakčnú účinnosť hologramu, až na úroveň, kedy hologram úplne eliminujeme (tekutý kryštál je príliš orientovaný).

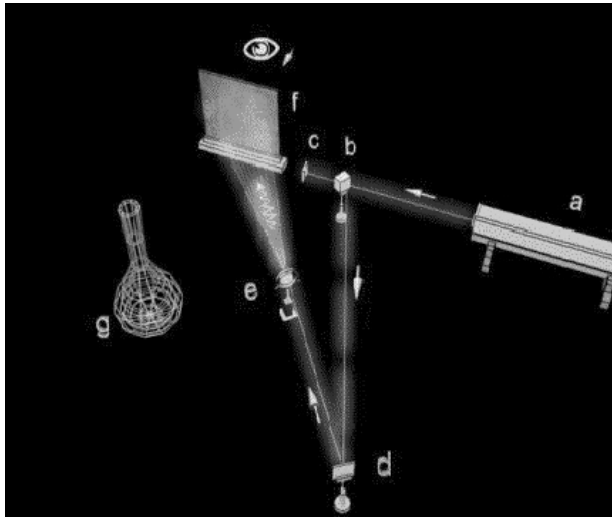
Vhodným materiálom pre mikromedzery v tekutom kryštáli, prípadne pre emulziu v želatíne sa javia nanoferity. Ich vlastnosti môžu zlepšiť záznamové vlastnosti daných materiálov.

Ďalším materiálom sú polymérovo disperzné tekuté kryštály (PDLC). Sú unikátnou kombináciou vlastností polymérovej matice a medzifázy. Tieto systémy môžu vytvoriť filmy veľkých rozmerov, ktoré majú dobré fotovodivé a elektrooptické vlastnosti a taktiež vysokú orientačnú kapacitu. Pri absencii elektrického alebo svetelného poľa, PDLC štruktúry efektívne odrážajú laserové žiarenie vzhľadom k náhodnému rozloženiu dipólov LC v polymérovej matici. Keď je na PDLC aplikované pôsobenie elektrického alebo svetelného poľa, úroveň indexu lomu molekúl polymérov a tekutých kryštálov sa menia. LC dipóly sú orientované pozdĺž elektrického poľa alebo pozdĺž elektrického vektora svetelnej vlny. Výsledkom je, že PDLC sa stane transparentným (priesvitným). Zistilo sa, že fullerén

obsahujúce PDLC štruktúry sú svetlejšie, kvôli otáčavej sile fullerénu, aj bez pôsobenia elektrického poľa. Neobvyklá reorientačná schopnosť fullerénov podstatne zjednoduší metódy kontroly fotosenzitívnych systémov a vedú k výrobe nových pasívnych holografických materiálov. Používajú inverzné nahrávanie dát založené na zmene indexu lomu média bez pôsobenia elektrického poľa.

5 Rekonštrukcia (kvalita)

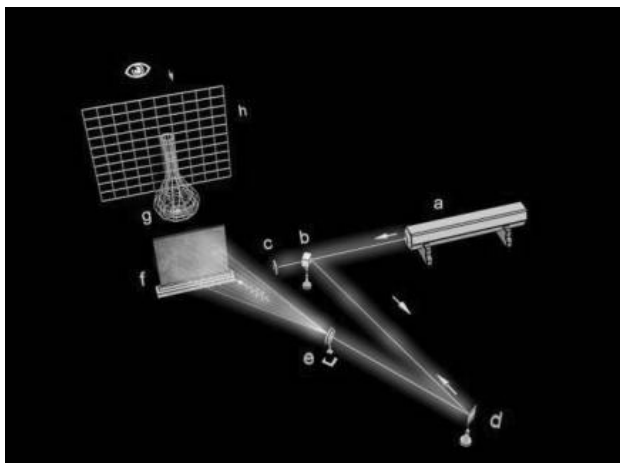
[1] Po vyvolaní filmu je hologram vložený do pôvodnej polohy ako pri jeho zázname a osvetlený len referenčným zväzkom (uzavretím predmetového zväzku uzávierkou (c)), pričom pôvodný predmet je odsunutý mimo optickú sústavu. Pozorovateľ v dôsledku difrakcie osvetľujúceho referenčného zväzku vidí cez hologram v dôsledku mriežkovej štruktúry hologramu predmet (g) v pôvodnej polohe, pričom ho vidí trojrozmerne ako v skutočnosti. Tento druhý krok sa nazýva rekonštrukcia hologramu (Obrázok 27) Obrázok 27 Rekonštrukcia hologramu. Ak je namiesto oka použitý fotografický aparát alebo videokamera, možno predmet fotograficky alebo iným spôsobom zdokumentovať.



Obrázok 27 Rekonštrukcia hologramu [1];

a – laser, b – delič, d – zrkadlo, e - mikrobjektív, f – hologram, g – virtuálny obraz.

Ak je hologram obrátený fotografickou emulziou k pozorovateľovi, potom sa skutočný obraz nachádza na tej strane hologramu, kde je aj pozorovateľ. Takéto zobrazenie sa nazýva pseudoskopickým. Toto zobrazenie je skutočné, preto je možné zaznamenať ho bez pomoci šošoviek – umiestnením holografickej dosky do roviny, kde sa zobrazenie vytvára (Obrázok 28).

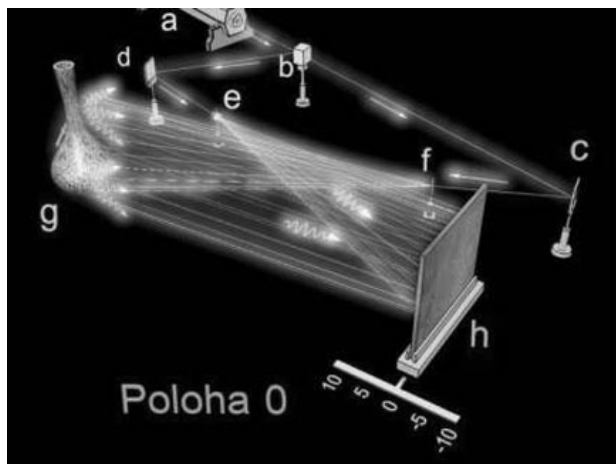


Obrázok 28 Rekonštrukcia združeného skutočného obrazu [1];

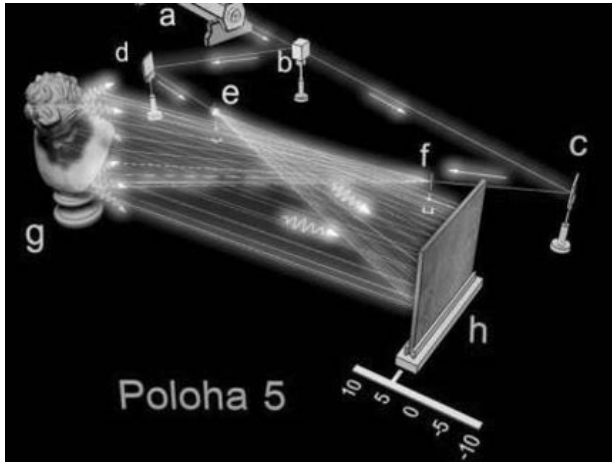
a – laser, b – delič, d – zrkadlo, c – uzávierka, f – hologram, e – mikroobjektív, g – skutočný obraz, h – rovina zobrazenia.

Pre technickú realizáciu experimentu musí byť rozdiel optických dráh referenčnej a predmetovej vlny menší ako je koherentná dĺžka lasera. Takže v schéme zobrazenej na Obrázok 28. vzdialenosť ABC musí byť rovná vzdialenosti ADEC. Viditeľnosť interferenčných prúžkov, tvoriacich hologram sa znižuje, ak sa zväčšuje rozdiel optických dráh lúčov a to vedie k zhoršeniu kvality rekonštruovaného holografického zobrazenia.

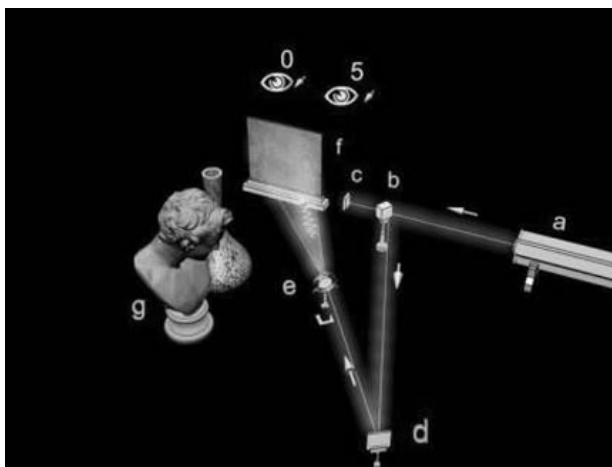
Ak sú holografické obrazy zaznamenávané každý z iného uhla, potom ich možno získať pri rekonštrukcii selektívne jeden po druhom a oddelene od seba z tej istej emulzie filmu tak, že sú presne napodobnené pôvodné podmienky (uhol laserového lúča) použité pri expozícii (Obrázok 32). Jednotlivé holografické obrazy možno vnímať ako navzájom oddelené individuálne formy, avšak takýto záznam možno považovať za úplne nediferencované pole svetla, ktoré následkom špecifickej interferenčnej štruktúry vytvára dojem oddelenosti objektu.



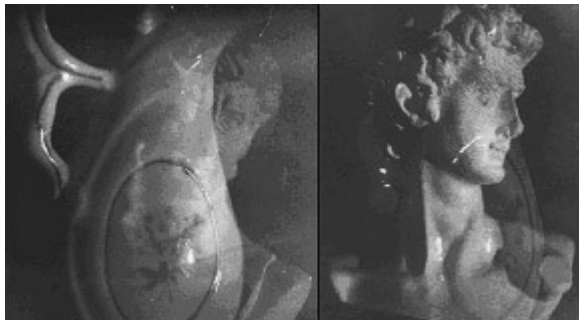
Obrázok 29 Objekt 1, váza [1].



Obrázok 30 Objekt 2, busta [1].



Obrázok 31 Rekonštrukcia oboch obrazov [1].



Obrázok 32 Rekonštrukcia hologramu z polohy 0 do polohy 5 [1].

6 Záver

Bol zaznamenaný aktuálny stav v oblasti holografie a jej záznamu. V krátkosti je zhrnutá história holografie a jej základné princípy. Je spracovaný prehľad základných vlastností vln, využívaných v holografii.

V práci je rozobraná všeobecná problematika záznamu hologramu. Bola prevedená rešerž naprieč metódami využívanými v jednotlivých frekvenčných pásmach. Pre jednotlivé typy holografií sú rozobrané konfigurácie úloh v závislosti na aplikovanej frekvencii, prehľad základných vlastností, vzťahov, prípadne problémov týkajúcich sa daného typu holografie. Bola spracovaná problematika záznamových médií, prehľad požadovaných vlastností a používaných materiálov pre záznam hologramu. Uvedené sú základné princípy rekonštrukcie hologramu.

Ťažisko práce je venované výberu vhodnej metódy pre záznam hologramu pre MHz holografii. Nemenej dôležitou časťou bol výber vhodného záznamového média.

Použitá literatúra:

- [1] Doc. Ing. ČERNECKÝ, Jozef, CSc., Mgr. PIVARČIOVÁ, Elena, PhD. *Holografia a jej technické aplikácie* [online]. Posledná aktualizácia 26.10. 2009 [cit. 2009-26-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.holografia.wz.cz/holografia/>>.
- [2] FIALA, Petr. *Holografické paměti* [online]. Posledná aktualizácia 12.11. 2007 [cit. 2009-27-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.fi.muni.cz/usr/jkucera/pv109/2004/xfiala4.htm>>.
- [3] MUELLER, Rolf. *Acoustic holography* [online]. Posledná aktualizácia 7.3. 2005 [cit. 2009-27-10]. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1450337&isnumber=31148>>.
- [4] TIMUCIN, Dogan, DOWNIE, John. *Holographic Optical Data Storage* [online]. Posledná aktualizácia 7.9.2000 [cit. 2009-1-11]. Dostupné z WWW: <[http://ti.arc.nasa.gov/m/pub/192h/0192%20\(Timucin\).pdf](http://ti.arc.nasa.gov/m/pub/192h/0192%20(Timucin).pdf)>
- [5] SAJAUSKAS, S. *Optical holography in ultrasonic research* [online]. Posledná aktualizácia 15.6.2005 [cit. 2009-28-10]. Dostupné z WWW: <http://www.ktu.lt/ultra/journal/pdf_38_1/38-2001-Vol.1_02-S.Sajauskas.pdf>.
- [6] ZHANG, Y., ZHOU, W., WANG, X., CUI, Y., SUN, W. *Terahertz Digital Holography* [online]. Posledná aktualizácia 11.9.2005 [cit. 2009-28-10]. Dostupné z WWW: <<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/121404408/PDFSTART>>.
- [7] Doc. Ing. WILFERT, Otakar, CSc. *Optoelektronika*. Brno: Vysoké Učení Technické. Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, 2004. 155 s.
- [8] POON, Ting-Chung, HSIEN WU, M., SHINODA, K., SUZUKI, Y. *Optical Scanning Holography* [online]. Posledná aktualizácia 5.1996 [cit. 2009-26-10]. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00488744&tag=1>>.
- [9] KOPECKÝ, Miloš, KUB, Jiří. *Rentgenová holografie s atomárním rozlišením* [online]. Posledná aktualizácia 6.9.2002 [cit. 2009-26-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.xray.cz/ms/bul2002-1/kub.pdf>>.
- [10] BJELKHAGEN, Hans I., Ph.D. *New recording materials for holography* [online]. Posledná aktualizácia 13.2. 2000 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: <<http://www.holography.co.uk/hcon1hb1.pdf>>.
- [11] MEIER, Reinhard W., URBACH, John C. *Properties and Limitations of Hologram Recording Materials* [online]. Posledná aktualizácia 12.6. 2008 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: <http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww.opticsinfobase.org%2FDirectPDFAccess%2F8DAE30B6-BDB9-137E->

- [CFBF46CB32DDCF4C_16055.pdf%3Fda%3D1%26id%3D16055%26seq%3D0&org=Vysoke%20Uceni%20Tech%20Brne%20Ustredni%20Knihovna](#)>.
- [12] CHAPMAN, Glenn H. *Holography* [online]. Posledná aktualizácia 10.3. 2008 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: <http://www.ensc.sfu.ca/~glennce/e376/e376116a.pdf>>.
- [13] SHANKOFF, T. A. *Phase Holograms in Dichromated Gelatin* [online]. Posledná aktualizácia 28.4. 2003 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: http://www.opticsinfobase.org/view_article.cfm?gotourl=http%3A%2F%2Fwww.opticsinfobase.org%2FdirectPDFAccess%2FC5FD0233-BDB9-137E-C3712DC0765D4DEA_15494.pdf%3Fda%3D1%26id%3D15494%26seq%3D0&org=Vysoke%20Uceni%20Tech%20Brne%20Ustredni%20Knihovna>.
- [14] DION, Jean-Luc, JACOB, André D. *Ultrasonic Intensity and Phase Imaging at 3.6 MHz Using Liquid Crystal Conversion* [online]. Posledná aktualizácia 1.11. 2000 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01539952>>.
- [15] JESACHER, Alexander, MAURER, Christian, SCHWAIGHOFER, Andreas, BERNET, Stefan, RITSCH-MARTE, Monika. *Near-perfect hologram reconstruction with spatial light modulator* [online]. Posledná aktualizácia 11. 2. 2008 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: http://www.rayscience.com/holoeye/HEO1080P_--%20Near-perfect%20hologram%20reconstruction%20with%20a%20spatial%20light%20modulator.pdf>.
- [16] BRENDEN, Byron B. *Ultrasonic Holography* [online]. Posledná aktualizácia 29.4.1975 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: <http://www.google.sk/patents?hl=sk&lr=&vid=USPAT3879989&id=eP8xAAAAEB AJ&oi=fnd&dq=ultrasonic+holography+liquid+crystal&printsec=abstract#v=onepage&q=ultrasonic%20holography%20liquid%20crystal&f=false>>.
- [17] INGWALL, T. Richard, TROLL, Mark A., WHITNEY, Duncan H. *Volume phase hologram with liquid crystal in microvoids between fringes* [online]. Posledná aktualizácia 30.3. 1993 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: <http://www.freepatentsonline.com/5198912.pdf> >.
- [18] SHANKOFF, T. A. *Recording of Thin Phase Holograms in Polymer-Dispersed Liquid-Crystal Composites Based on Fullerene-Containing π -Conjugated Organic Systems* [online]. Posledná aktualizácia 26.4. 2006 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: <http://www.springerlink.com/content/535376u33087311m/fulltext.pdf> >.
- [19] SAMUI, Asit B. *Holographic Recording Medium* [online]. Posledná aktualizácia 3.12. 2007 [cit. 2010-6-5]. Dostupné z WWW: <http://www.bentham.org/mats/samples/mats%201-1/Asit%20B.%20Samui.pdf>>.
- [20] KRZYSZTOFIK, Wojciech J. *Microwave holography* [online]. Posledná aktualizácia 24.5.2000 [cit. 2009-26-10]. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00914003>>.