



Fyzikální optika

Holografie, výroba a demonstrace hologramu.

19. dubna 2016

Autoři: Roman Čížmarik,
Tomáš Mlynarič,

xcizma04@stud.fit.vutbr.cz
xmlyna06@stud.fit.vutbr.cz

Fakulta Informačních Technologii
Vysoké Učení Technické v Brně

Abstrakt

V této práci je představena holografie, zejména její fyzikální princip. Dále se pojednává o historickém vývoji holografie, metodě získávání hologramů, různých typech a použití v praxi.

Klíčová slova

holografie, hologram, laser, koherentní světlo, Dennis Gabor, interference, ochranné prvky, datové úložiště

Obsah

1	Úvod	3
2	Holografie	4
3	Princip	6
3.1	Komplexní amplitudová propustnost	6
3.2	Záznam hologramu	7
3.3	Holografický kód	8
3.4	Rekonstrukce hologramu	8
4	Typy hologramů	10
4.1	Transmisní	10
4.2	Reflexní	10
4.3	Duhový	10
4.4	Stereogram	11
5	Použití	12
5.1	Ochrana proti kopírování	12
5.2	Datové úložiště	13
5.3	Další	13
6	Závěr	14
	Literatura	15

Kapitola 1

Úvod

Holografie je jednou z podoblastí fyzikální optiky. Je to sofistikovaná forma záznamu obrazu, pomocí které je možné zaznamenat a poté rekonstruovat trojrozměrnou strukturu obrazu. Přestože byla objevena již v první polovině minulého století, nebyla jí věnována přílišná pozornost. Dnes se s hologramy každý z nás setkává téměř denně, možná aniž by o tom věděl.

Cílem této práce je blíže se seznámit s technologií holografie, ukázat jaké druhy hologramů existují představit možné využití v praxi.

V kapitole 2 tohoto dokumentu se čtenář může seznámit s historií holografie. Dále, v kapitole 3, následuje fyzikální princip záznamu a rekonstrukce hologramu. Kapitola 4 pojednává o různých typech hologramů. Dokument uzavírá kapitola 5 věnující se využití holografie v praxi.

Kapitola 2

Holografie

Holografie je způsob záznamu obrazu, který umožňuje zachytit jeho trojrozměrnou strukturu. Název pochází z řeckého *holos* – úplný a *grafie* – záznam.

Počátky holografie se datují od roku 1947, kdy britský fyzik maďarského původu, Dennis Gabor (5.6.1900 – 8.2.1979), zkoušejíc vylepšit rozlišení elektronového mikroskopu, teoreticky popsal její princip. Jelikož ale v té době neexistoval vhodný zdroj koherentního světla (nejvhodnější byla oblouková lampa), nebylo možné teorii dokázat experimentem a ten byl odložen pro další generace vědců.

Tento problém byl překonán v roce 1960, což je rok, kdy byl vynalezen laser. O pár let později byl zhotoven první transmisní hologram vědci Emmett Leithem a Juris Upatniekem při použití stejné techniky, jakou popisoval právě Dennis Gabor. Vznikl tak historicky první zhotovený hologram – vlak a pták (viz obrázek 2.1) [2]. Tento hologram nebyl příliš kvalitní, jelikož holografická mřížka absorbovala velkou část dopadajícího světla. Během let byl způsob zachycení hologramu vylepšován a byly nalezeny způsoby, jak zkvalitnit výsledek (např. tzv. bílení hologramu (z ang. *hologram bleaching*)).

V roce 1962 byl poprvé zaznamenán reflexní hologram vědcem Jurij Denisjukem, který umožňoval zobrazení (rekonstrukci) klasickým bílým světlem.



Obrázek 2.1: První zhotovený hologram (zdroj [2])

V roce 1969 byl také objeven hologram duhový, jehož autorem je Stephen Benton. Tyto hologramy se v jisté formě používají dodnes jako jednoduchý bezpečnostní prvek.

Autor, Dennis Gabor, byl v roce 1971 za vynález a rozvoj holografické metody odměněn Nobelovou cenou v oblasti fyziky. Technika, kterou vymyslel, se dodnes používá v elektronové mikroskopii, kde je známá jako elektronová holografie. [5]

Kapitola 3

Princip

Světelné pole se v každém bodu prostoru vyznačuje amplitudou vlny a fází. Když bychom byli schopni zaznamenat obě tyto složky, bylo by možné zachytit a rekonstruovat úplný obraz v daném místě.

Klasická fotografie zaznamenává pouze amplitudu vlny, čímž se však ztrácí informace o fázi vlny a tudíž i prostorová informace. Holografie, na rozdíl od klasické fotografie, zaznamenává jak informaci o amplitudě, tak o fázi vlny. Takto zaznamenaný obraz se nazývá hologram. Z fyzikálního hlediska je hologram optický prvek s určitou komplexní amplitudovou propustností.

3.1 Komplexní amplitudová propustnost

Veličina komplexní amplitudové propustnosti popisuje, jakým způsobem se změní optická vlna po průchodu určitým optickým prvkem.

Uvažme rovinnou vlnu šířící se ve směru osy z — $U(x, y, z)$ a transparentní destičku s indexem lomu n a šířce d . Nebudeme brát v úvahu vnitřní a vnější odrazy ani absorpci. Pak poměr vlny před a po průchodu daným optickým prvkem představuje komplexní amplitudovou propustnost [4]:

$$\tau(x, y) = \frac{U(x, y, d)}{U(x, y, 0)} = e^{-jnk_0d} \quad (3.1)$$

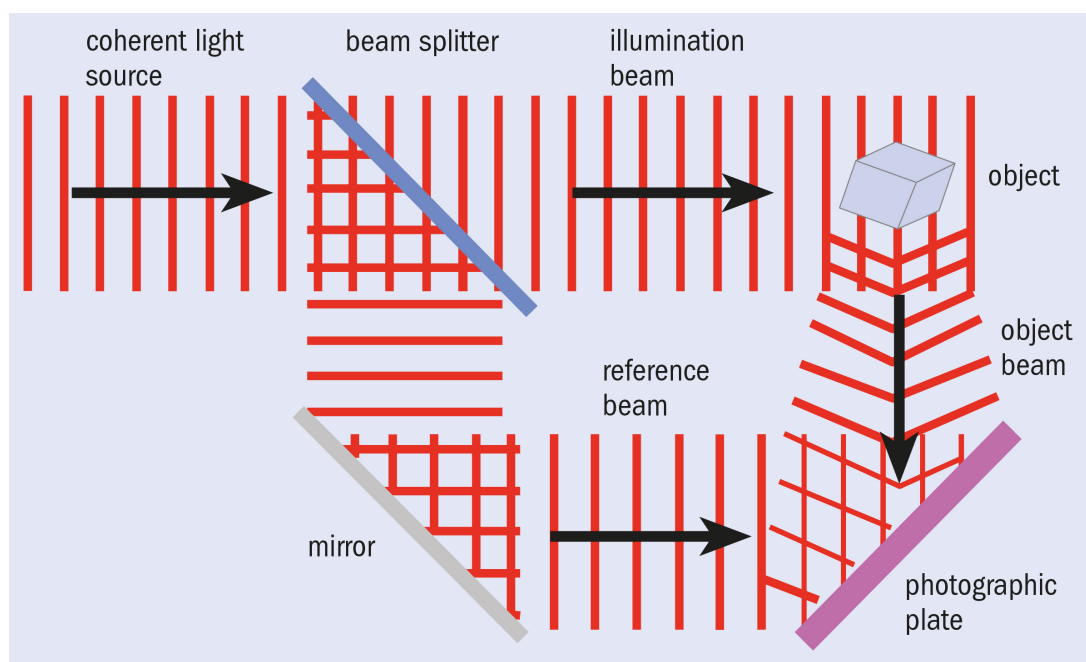
kde k_0 je vlnové číslo ve vakuu. To znamená, že destička způsobila fázový posun vlny o $nk_0d = 2\pi(d/\lambda)$

Pokud je vlna odchýlena o úhel ϕ ve směru osy z , pak platí:

$$\tau(x, y) = e^{-jnk_0(d \cos \phi + x \sin \phi)} \quad (3.2)$$

3.2 Záznam hologramu

Podstatou vytváření hologramu je interference dvou vln, předmětové a referenční, šířících se v rovině $z = 0$. Interferenci dvou vln je možné pozorovat, pouze pokud jsou obě vlny koherentní, proto je vhodným zdrojem světla laser. Princip vytvoření hologramu je zobrazen na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1: Princip vytváření hologramu

Zaznamenávaný objekt je ozářen koherentním světlem. Vlna odrážející se od objektu k fotocitlivé desce (hologramu) se nazývá předmětová. Stejným koherentním světlem je ozařována i fotocitlivá deska samotná což se označuje jako vlna referenční. Tyto vlny navzájem interferují a na povrchu hologramu se zaznamenávají jejich interferenční obrazce [4]. K zaznamenání hologramu je potřeba velké stability pracovní plochy. I velmi malé otřesy mohou kompletně znehodnotit zaznamenaný obraz.

3.3 Holografický kód

Dle [4] se holografickým kódem označuje intenzita interferenčních obrazců vytvořených superpozicí referenční vlny U_r a objektové vlny U_o na povrchu hologramu. Jedná se v podstatě o komplexní amplitudovou propustnost hologramu danou interferencí těchto vln a platí:

$$\tau(x, y) = (U_o + U_r) * (U_o + U_r)^* = I_o + I_r + U_o U_r^* + U_r U_o^* \quad (3.3)$$

kde I_o je intenzita objektové vlny a I_r intenzita referenční vlny. Je zřejmé, že třetí a čtvrtý člen nese informaci o intenzitě a fázi vlny U_o .

3.4 Rekonstrukce hologramu

K dekódování informace uložené v hologramu a rekonstrukci předmětové vlny je potřeba použít stejný zdroj světla, aby vznikla identická (co nejvíce podobná) referenční vlna, kterou se poté hologram osvítlí. Výslednou vlnu po průchodu hologramem je možné zapsat jako:

$$U = \tau U_r = I_o U_r + I_r U_r + I_r U_o + U_o^* U_r^2 \quad (3.4)$$

První dva členy nenesou žádnou informaci o fázi předmětové vlny. Zajímavý je především člen $I_r U_o$, který představuje původní předmětovou vlnu násobenou intenzitou referenční vlny a člen $U_o^* U_r^2$, který označuje konjugovanou původní vlnu modulovanou komplexní funkcí U_r^2 [4].

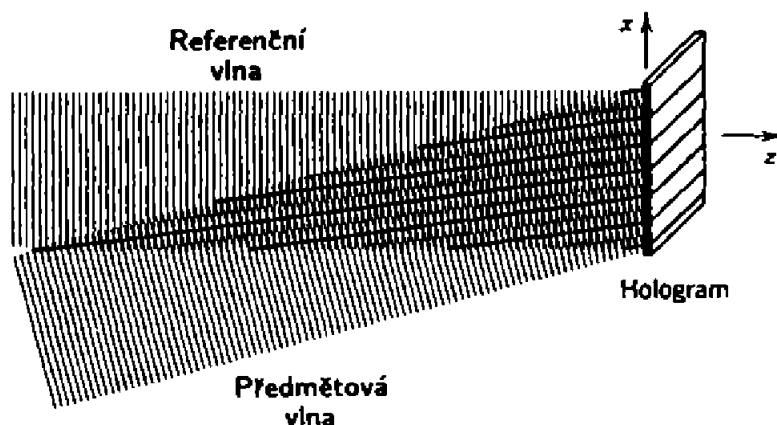
Tyto dva členy by bylo vhodné od sebe oddělit, abychom mohli pozorovat pouze rekonstruovanou objektovou vlnu. Toho je možné docílit, pokud se objektová vlna bude šířit pod úhlem ϕ v rovině $z = 0$ (viz obrázek 3.2)

$$U_o = \sqrt{I_o} e^{-jk \sin \phi} \quad (3.5)$$

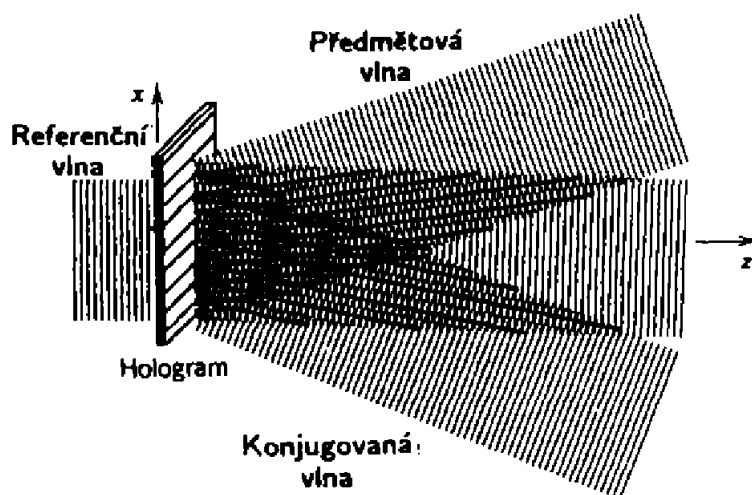
Po průchodu hologramem bude výsledná vlna rovná:

$$U(x, y) = I_o + I_r + \sqrt{I_r I_o} e^{-jkx \sin \phi} + \sqrt{I_r I_o} e^{+jkx \sin \phi} \quad (3.6)$$

Kde třetí člen je předmětová a čtvrtý konjugovaná vlna. Je zřejmé, že rekonstruovaná předmětová vlna je oddělena od ostatních vln (viz obrázek 3.3). Hologram je tedy možné vnímat jako difrakce mřížku, která dělí dopadající referenční vlnu do tří vln, šířících se pod úhly 0 , ϕ a $-\phi$ [4].



Obrázek 3.2: Záznam šikmo dopadající předmětové vlny
(Zdroj: [4])



Obrázek 3.3: Rekonstrukcia záznamu šikmo dopadajúcej predmetovej vlny
(Zdroj: [4])

Při rekonstrukci původní předmětové vlny je možné použít koherentní vlnu s kmitočtem odlišným od toho, kterým byl hologram vytvořen. V tom případě bude mít obraz nejen jinou barvu ale i rozměry. Při použití vlny s nižším resp. vyšším, kmitočtem, se bude rekonstruovaný objekt jevit zvětšený, resp. zmenšený. Na rekonstrukci zaznamenané scény není dokonce nutný ani celý hologram. Záznam je možné pozorovat přes libovolně malý zlomek původního hologramu, avšak jakoby přes adekvátně zmenšený průzor. Libovolné malou část hologramu je tedy možné chápat jako kompletní hologram zaznamenaný přes odpovídající zúžený průzor [3].

Kapitola 4

Typy hologramů

Existuje několik druhů hologramů, které se liší jak způsobem, kterým je můžeme zaznamenat, tak způsobem rekonstrukce. Mezi základní hologramy bychom mohli zařadit transmisní a reflexní a také duhový. Zmíněny jsou také „falešné“ hologramy, tzv. stereogramy.

4.1 Transmisní

U tohoto typu hologramu, při záznamu dopadají referenční a předmětová vlna ze stejné strany na holografický nosič. Při rekonstrukci se obraz formuje při přechodu hologramem a jeví se na stejném místě, jako při záznamu. V praxi je při použití této metody potřeba více zrcadel, aby bylo možné světlo správně „nasměrovat“.

4.2 Reflexní

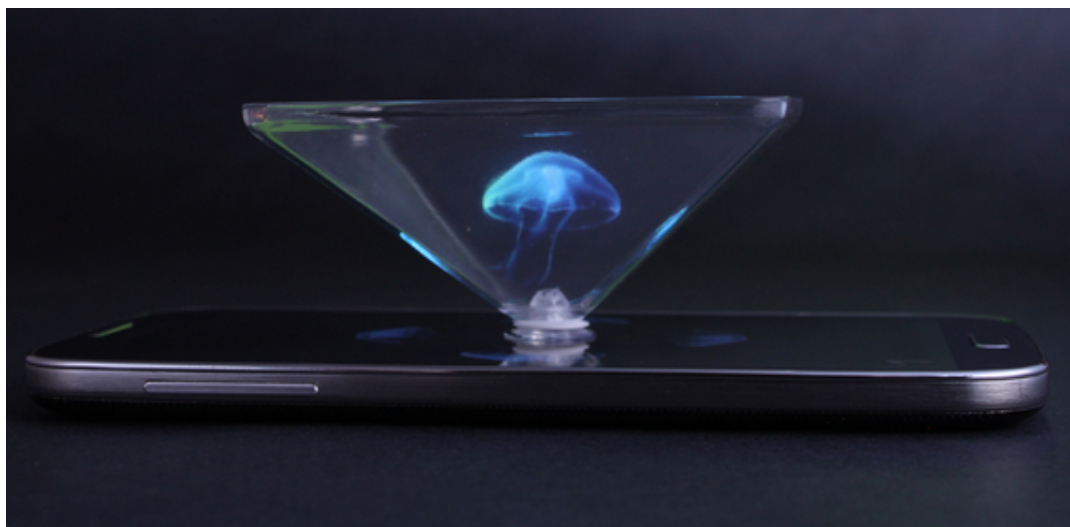
Při záznamu dopadají referenční a předmětová vlna z různých stran, což umožňuje rekonstruovat jej klasickým bílým světlem. Tento jev je díky tomu, že při rekonstrukci bílým světlem difraktuje do oka pozorovatele pouze úzké spektrum vlnových délek, ostatní nejsou ovlivněny a projdou hologramem beze změny.

4.3 Duhový

Duhový hologram je typ transmisního hologramu, který je vytvořen „bílým“ světlem a je tedy možné jej jednoduše rekonstruovat. Tyto hologramy jsou obvykle lisovány do fólie a dále využívány v různých odvětvích (viz sekce [5.1](#)). Hologram může být barevný, ale barvy jsou reálné pouze v jednom pozorovacím úhlu, v ostatních směrech dochází k duhovému efektu.

4.4 Stereogram

Za jeden z typů hologramu by bylo možné považovat falešné hologramy, tzv. stereogramy, které nepracují s vlastnostmi světla, ale pouze s nedokonalostí lidského oka. Jedná se o několik obrazů promítaných z různých směrů do soustředěného bodu (např. na průhledném materiálu) a tím vytvoření jevu, který se podobá 3D obrazu (viz obrázek 4.1). Takový obraz může být jakkoliv barevný, animovaný apod.



Obrázek 4.1: Iluze hologramu (zdroj:

<http://livescience.com/53334-3d-hologram-illusion-on-smartphones.html>

Kapitola 5

Použití

Z hlediska použití je metoda v dnešní době často aplikovaná. Tradiční hologramy, které vytvářejí obrazy určené pro pozorování lidským okem, ale nejsou tím hlavním, proč se je dnes využívá.

5.1 Ochrana proti kopírování

Největším zastoupením jsou hologramy určené pro ochranu dokumentů a autenticitu různých produktů (dokumenty, ceniny, kreditní karty atd.). Ochranná funkce spočívá v jednoduché vizuální kontrole, ke které není zapotřebí žádné vybavení a je možné provést ji pouhým okem. Z fyzikálního hlediska je to založeno na difrakci světla na struktuře s detaily v nanometrickém měřítku. Právě díky jemné struktuře jsou tyto hologramy těžce kopírovatelné a tím zaručují originalitu. Vyrobit je však není tak obtížné, jelikož je možné je mechanicky lisovat a tudíž masově vyrábět. [6]



Obrázek 5.1: Duhový hologram na kreditní kartě

(zdroj: <https://www.flickr.com/photos/40193179@N03/6117242647/>)

5.2 Datové úložiště

Dalším možným využitím hologramů je oblast datových úložišť. V současnosti využívané techniky pro ukládání dat, jakými jsou např. Blue-ray disky, dosahují maximální možné kapacity kvůli problematickému zmenšování plochy nesoucí elementární informace (bity) z důvodu difrakčně omezených zapisovacích paprsků. Holografická média, na rozdíl od stávajících, využívají objemová data a tím umožňují zvětšit hustotu zápisu. Z hlediska technického řešení nemusí být laser, kterým se data zaznamenávají, drahou záležitostí (realizace např. pomocí diodových laserů). Také ukládaná data nemusí být jako reálný nasnímaný objekt, ale může být jako syntetický hologram, tj. hologramová struktura vytvořená pomocí počítače.

V roce 2013 byl, vědci z univerzity v Southhamptonu (Anglie), představen 5D čip, kde data jsou strukturovány v klasickém tří dimenzionálním prostoru a dále jako intenzita a polarita laseru, který zaznamenával data. Autoři tvrdí, že každý čip umožňuje uložit až 360 terabytů dat, která dokážou přetrvat do teploty 1000°C a po prakticky neomezenou dobu (při teplotě 190°C, dokážou přetrvat 13.8 miliard let). [1]

5.3 Další

Mezi další využití holografie by se daly považovat projekce na displeje – HUD (z angl. *Head-Up Display*), kde je obraz projektován na průsvitnou plochu a umožňuje tak pozorování reálné situace obohacenou doplňujícími informacemi (často se používá při letecké dopravě).

Kapitola 6

Závěr

Holografie jako fyzikální oblast je velice zajímavá jak pro lajky (díky své nevšednosti oproti klasické fotografii), tak pro odbornou veřejnost (díky své jednoduchosti). Její využití je v dnešní době velmi výrazné, dalo by se říci, že prakticky „na každém kroku“. Co se týče využití do budoucna, díky možnostem při záznamových médiích, dá se očekávat, že hologramy budou jednou ovládat svět digitálních dat.

Literatura

- [1] Robin Andrews. Eternal 5D data chip can record all of human history [online]. <http://www.iflscience.com/technology/eternal-5d-data-chip-can-record-all-human-history>, [cit. 2016-03-20].
- [2] Holophile, Inc. The history and development of holography [online]. <http://www.holophile.com/history.htm>, [cit. 2016-03-17].
- [3] Ladislav Szántó. Holografie :animace feynmanovou metodou dráhových součtů [online]. <http://qed.ben.cz/holografie>, [cit. 2016-03-20].
- [4] Bahaa Saleh. *Základy fotoniky = Fundamentals of photonics*. Matfyzpress, 1994.
- [5] Wikipedia. Holography — Wikipedia, the free encyclopedia [online]. <https://en.wikipedia.org/wiki/Holography>, [cit. 2016-03-19].
- [6] Škereň M., Fiala P. Holografie: Jak ovládat světlo. *Pražská technika*, 12(3):21, červen 2010.