

<b>Název a číslo úlohy</b>	#4 - Holografie
<b>Datum měření</b>	9. 4. 2015
<b>Měření provedli</b>	Tereza Schönfeldová, David Roesel
<b>Vypracoval</b>	David Roesel
<b>Datum</b>	14. 4. 2015
<b>Hodnocení</b>	

## 1 Úvod

Holografie je nejen metoda záznamu trojdimenzionálního obrazu, ale jedná se dokonce o metodu realizace obecného transformačního optického elementu. Takový prvek má za úkol z definované vlny složit libovolný požadovaný tvar nové vlny vytvořením komplexní vlnoplochy definované jak její intenzitou, tak fázovým profilem. My jsme se však v této úloze věnovali pouze jejímu využití pro záznam 3D informace a zkusili si vytvořit transmisní hologram v dvousvazkovém schématu.

## 2 Pomůcky

Odpružený stůl Melles Griot, He-Ne laser LASOS LKG 7665-P, závěrkový systém JODON, měřič výkonu Newport, dělič svazku s proměnným dělicím poloměrem, prostorový filtr s mikroskopovým objektivem, spojná čočka pro úpravu svazku, zrcadla a magnetické držáky firmy Thorlabs, reflexní matnice, držák záznamového materiálu s absorpční podložkou, záznamový materiál AGFA GEVAERT 8E75, chemikálie pro zpracování, provázek a mobilní telefon.

## 3 Postup a výsledky

Když jsme přišli k úloze, všechny optické prvky již byly umístěny na stole, některé i na příbližných pozicích. jediným použitým zdrojem světla pro záznam byl He-Ne laser o vlnové délce  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ . Po úvodním probrání teoretického úvodu jsme přešli k sestavování aparatury. Nejprve jsme se seznámili s jednotlivými komponenty budoucího optického schématu a vyzkoušeli jsme si zapínání a vypínání magnetických zámků. Schema jsme si sice doma určitým způsobem připravili, avšak na místě nám bylo asistentem prozrazeno jiné a ověřené uspořádání optických prvků, kterým jsme se tedy řídili. Použité schéma je uvedeno na Obr. 1.

Námi sestavované schéma má tu výhodu, že po vhodném nastavení signální větve lze pouze posunem dvou zrcátek (3, 5) nastavit libovolnou délku té referenční. Vzhledem k požadavku koherence světla nám nezáleželo na absolutní vzdálenosti, kterou laserové světlo urazí, ale pouze na dráhovém rozdílu referenční a signální větve. Po sestavení celé aparatury nám tedy toto schéma umožnilo upravit rozdíl obou drah na méně než centimetr.

### 3.1 Nastavení signální větve

Jako první jsme umístili na optický stůl dělič svazku a dvě zrcátka (2, 4) vedoucí signální svazek, přičemž zrcátko 1 již na stole bylo připraveno. Poté jsme na stůl umístili držák na záznamový materiál tak, aby na něj budoucí referenční svazek dopadal pod úhlem  $45^\circ$ . Před něj jsme postavili vzor a za držák záznamového materiálu (a mírně nad něj) jsme postavili matnici, na kterou jsme drobným nastavením šroubů zrcátka 4 nasměrovali paprsek. Vzdálenost mezi vzorem a záznamovým materiálem jsme volili co nejmenší, ale takovou, aby vzor nebránil průchodu referenčního světla. Dále jsme ještě ověřili, že maximum intenzity dopadá na střed

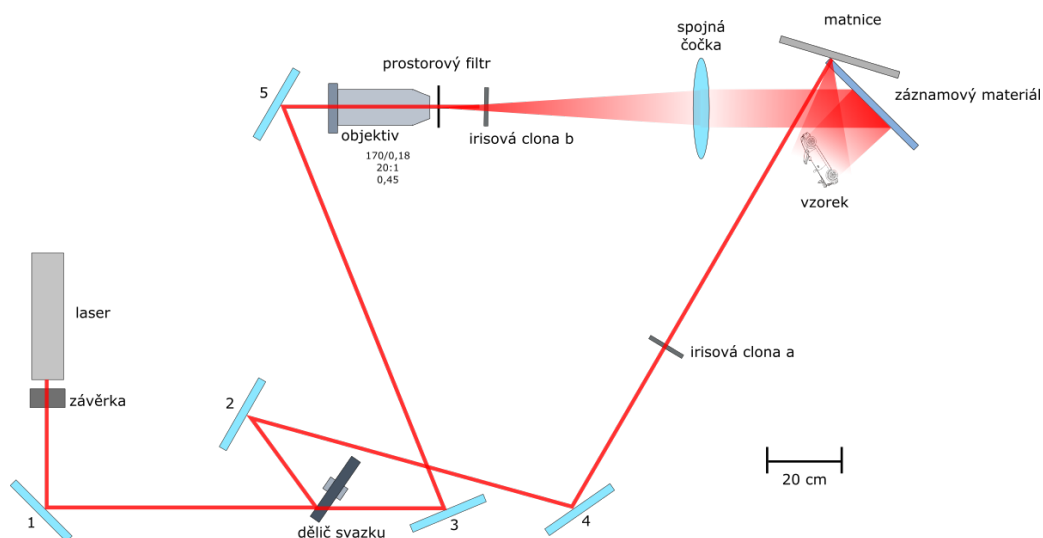
držáku záznamového materiálu. Od této chvíle již byla signální větev takřka hotová a zbývalo ji jen drobně zdokonalit po nastavení referenční větve.

### 3.2 Nastavení referenční větve

Pro nastavování referenční větve jsme umístili stínítko do dráhy signální větve. Následně jsme přibližně nastavili zrcátka 3 a 5 a nasměrovali jsme svazek tak, aby dopadal na střed záznamového materiálu. Svazky v tuto chvíli dopadaly tam, kde jsme je chtěli mít, ale referenční svazek nebyl dostatečně rozšířený. Za zrcátko 5 jsme tedy vložili objektiv, nastavili jsme ho tak, aby paprsek procházel jeho optickou osou, a přidali jsme na jeho konec prostorový filtr. Poté jsme pomocí šroubů na objektivu nastavovali horizontální a vertikální polohu prostorového filtru a zároveň jemným posunem hýbali s objektivem tak, aby střed prostorového filtru ležel v jeho ohnisku. Vzhledem k tomu, jak malý byl otvor v prostorovém filtru, bylo třeba správnou polohu ověřovat jinak než přímým pohledem. K tomu jsme využili stínítko a za optimální situaci jsme brali, když na stínítku nebyly patrné žádné difrakční obrazce. V tu chvíli totiž procházelo světlo středem filtru a nedocházelo k difrakci na některé z hran kruhového otvoru. Tento krok vylepšil vlastnosti svazku, jelikož nedokonalosti na vlnoploše se soustřeďují ve fokální rovině mimo osu a neprojdou systémem. Po průchodu prostorovým filtrem máme tedy víceméně čistou sférickou vlnu.

Jako další krok bylo třeba vlnu přetvořit na rovinnou, tak aby na záznamový materiál dopadla co největší intenzita referenčního svazku. K tomu jsme využili spojnou čočku o neznámém ohnisku. Její optimální pozici jsme mezi prostorovým filtrem a záznamovým materiálem našli umístěním stínítko do určité vzdálenosti za čočku a hledáním takové polohy čočky, ve které byl obraz záznamového držáku na stínítku stejně velký jako držák samotný. To odpovídá poloze prostorového filtru přesně v ohnisku čočky.

Před dalším postupem jsme ještě vyrovnali vzdálenosti obou ramen. Nejprve jsme tedy pomocí provázku určili vzdálenost, kterou urazí signální svazek od děliče po záznamový materiál. Poté jsme provázek táhli po dráze referenčního svazku a mírným přemístěním zrcátka 3 jsme dorovnali délku tak, aby byl rozdíl co nejmenší.



Obrázek 1: Uspořádání experimentu; dvousvazkové záznamové schéma pro transmisní hologram.

### 3.3 Měření výkonů

Dalším krokem bylo zajištění dostatečného výkonu světla na záznamovém materiálu, jeho správné rozdělení po povrchu a odpovídající poměry signálního a referenčního svazku. Pomocí

detektoru Newport jsme měřili energii dopadající na plochu. Ověřili jsme tedy, že na držák záznamového materiálu dopadá dostatečná energie a že jde většina energie do středu záznamového materiálu. Pokud tomu tak nebylo, doladili jsme šrouby na zrcátka 5 jemně referenční větví. Každou úpravu zrcátka 5 jsme museli kompenzovat odpovídajícím nastavením šroubů na objektivu s prostorovým filtrem.

V tuto chvíli již byla intenzita na stínítku dostatečná a dobře rozmístěná. Zbývalo jen nastavit dělič svazku tak, aby byl poměr intenzit signálního ku referenčnímu svazku přibližně 1:10 -1:15. Bylo nám prozrazeno asistentem, že na referenčním svazku chceme začínat na intenzitě přibližně  $30 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  a jít z tohoto bodu níž. Otáčením děliče svazku jsme tedy postupně snižovali intenzitu v referenčním svazku z této hodnoty a průběžně u toho (se zakrytým referenčním svazkem) kontrolovali intenzitu v signálním. Nakonec jsme se tímto postupem dostali k hodnotám intenzity v referenčním ( $P_{\text{ref}}$ ) a signálním ( $P_{\text{sig}}$ ) svazku

$$P_{\text{ref}} = 14,86 \mu\text{J}/\text{cm}^2,$$

$$P_{\text{sig}} = 1,158 \mu\text{J}/\text{cm}^2,$$

což odpovídá přibližně poměru  $\approx 1 : 13$ . Obě tyto energie byly měřeny kolmo v daném svazku, takže jejich pouhým sečtením nezjistíme, kolik energie nám dopadá na záznamový materiál. Správnou hodnotu bychom nedostali ani v případě, že bychom měřili energii z obou svazků najednou přímo na stínítku. Detektor Newport je totiž kalibrován na kolmý dopad, takže by hodnota nebyla přesná. Pro určení energie a následný výpočet expozičního času bylo tedy třeba využít jednoduchého vzorce

$$P = P_{\text{ref}} \cos \alpha + P_{\text{sig}},$$

kde  $P$  je celková hustota energie dopadající na záznamový materiál a  $\alpha$  je úhel dopadu referenčního svazku na rovinu záznamového materiálu. Úhel  $\alpha$  jsme určili přibližně jako  $\alpha = 46^\circ$ . Z toho pak pro hodnotu celkové hustoty energie plyne hodnota

$$P = 11,48 \mu\text{J}/\text{cm}^2$$

a podle následujícího vzorce také doba expozice  $t$  jako

$$t = \frac{E}{P} = \frac{300}{11,48} = 26,15 \text{ s},$$

kde  $E = 300 \mu\text{J}/\text{cm}^2$  je hustota expoziční energie námi použitého záznamového materiálu. V tuto chvíli zbývalo jen drobně doladit schéma zařazením irisových clon pro vyčištění svazků, ta v referenčním svazku měla průměr  $\varnothing_b = 1,1 \text{ cm}$ , ta ve svazku signálním  $\varnothing_a = 0,6 \text{ cm}$ .

### 3.4 Záznam hologramu

Se sestavenou aparaturou již stačilo pouze zatáhnout závěsy na bocích odpruženého stolu, který asistent během úlohy dofoukl, a nastavit na závěrkovém systému čas nejbližší námi určené době expozice (přibližně 26,6 s). Se zhasnutými světly jsme pak jen ve svitu zelené žárovky vyjmuli záznamový materiál z obalu, jemným poškrábáním a dýcháním na obě strany zjistili, na které straně skla je nanášena emulze a po nánosu vrstvy isopropylalkoholu umístili záznamový materiál na držák. Ten jsme dali zpět do optického schématu, zatáhli i poslední závěs a jali se ve vedlejší místnosti připravovat roztoky potřebné ke zpracování fotomateriálu, čímž jsme dali celému systému asi deset minut na relaxaci. Roztoky jsme připravili podle návodu v zadání [1] do předem připravených nádob. Po dostatečné relaxační době ( $> 8 \text{ min}$ ) jeden z nás došel zpět do místnosti k ovladači závěrky, dvě minuty ani nedutal, aby došlo ke zmírnění vibrací způsobených chůzí v místnosti, a poté spustil expozici.

Po skončení záznamu jsme vyjmuli záznamovou desku z držáku a nechali ji ponořenou ve vývojce po dvě minuty míchání, přičemž jsme pozorovali její zčernání. Po několikaminutovém očištění vodou jsme ji ponořili do běličky a míchali jsme tak dlouho, dokud nebyla destička opět úplně průhledná (opět něco málo přes dvě minuty). Desku jsme znovu vyprali v tekoucí vodě a po několika minutách jsme ji ponořili do destilované vody se smáčedlem (1% roztok). Po vytažení jsme ji nechali okapat a volně uschnout.

### 3.5 Rekonstrukce hologramu

Na závěr jsme studovali vlastnosti námi vyrobeného hologramu. Umístili jsme ho tedy zpět do původní pozice na stole a dívali jsme se skrze sklíčko na původní autíčko. Po odebrání vzoru jsme zřetelně viděli hologram přesně na původním místě autíčka. Rekonstruovaný objekt byl očividně zaznamenán z určitého rozsahu úhlů. Pozorovaný virtuální obraz z jednoho úhlu jsme zaznamenali na mobilní telefon a je vidět na Obr. 2.



Obrázek 2: Vytvořený transmisní hologram; pohled skrze sklíčko na virtuální obraz.

Dále jsme zkusili v držáku otočit sklíčko, což vzhledem k osvětlování rovinnou vlnou odpovídalo rekonstrukci vlnou konjugovanou. Do oblasti před sklíčkem jsme potom umístili stínítko a podle vzdálenosti od sklíčka jsme pozorovali zaostření různých částí autíčka. Nejprve přední světla, poté kapotu a tímto způsobem až k zadním kolům. Jeden ze studentů praktika, který měl po ruce cigaretu, pro nás foukl do oblasti reálného obrazu cigaretový kouř a snažili jsme se sledovat, jestli v něm uvidíme 3D obraz autíčka. Ten jsme bohužel nepozorovali, ale mírné zakouření místnosti vedlo ke krásné vizualizaci laserových svazků ve schématu na celém stole.

Po tomto pokusu jsme zkoušeli citlivost hologramu na přesné dodržení schématu narušením některých parametrů. Zjistili jsme, že změna poloměru rekonstrukční vlny vede ke změně měřítko obrazu. Dále se ukázalo, že transmisní hologram opravdu v polychromatickém světle nefunguje, jelikož každá vlnová délka vytvoří obraz na trochu jiném místě a v hologramu je tedy při pohledu do světla zářivky vidět pouze změň barev s velice těžko rozpoznatelným autíčkem. Úhel rekonstrukční vlny měl za následek pokles intenzity částí obrazu, což odpovídá

poklesu difrakční účinnosti. Na závěr jsme zkoušeli osvětlovat hologram pouze úzkým svazkem, což vedlo k vytvoření reálného obrazu, pozorovatelného pouze z jednoho úhlu.

## 4 Diskuse a závěr

V zadání nezmíněnou zajímavostí je, že autíčko bylo přizpůsobeno úloze tak, že mělo poškrábaný povrch pro menší odlesky, které by vedly k přesycení záznamového materiálu, a bylo přestříkáno červeným lakem, aby se od něj dobře odráželo světlo použitého He:Ne laseru. Transmisní hologram se nám pomocí dvousvazkového schématu vyrobit podařilo. Vzdálenosti na optickém stole explicitně neuvádíme, ale schéma na Obr. 1 je v daném měřítku věrné rozměrům experimentu, ač například velikosti prvků neodpovídají. Rozdíl signální a referenční dráhy jsme pomocí provázku určili jako menší než 1 cm. Vlastní expozice i vyvolávání probíhalo podle návodu bez větších odchylek, na žádné problémy jsme během procesů nenarazili.

Ohledně rekonstrukce nás zaujalo, v jak velkém rozpětí úhlů dopadající rekonstrukční vlny je obraz pozorovatelný (ač někdy mírně deformovaný). Při rekonstrukci je vidět, že se nejvíce světla odráželo od předního okénka autíčka a zbytek je mnohem hůře osvětlen. Nejpatrnější jsou lesklé hrany, které evidentně poškrábání a přelakování nekompenzovalo dostatečně. Pro zlepšení finálního obrazu by stálo za to osvětlovat vzor několika svazky z různých úhlů tak, aby byl rovnoměrně nasvícen.

Přímo u úlohy jsme si zkoušeli, co se stane, pokud zakryjeme polovinu sklíčka (simulace rozštípnutí hologramu na poloviny). Autíčko jsme nadále pozorovali celé, ale již jsme se na něj nemohli dívat z tolika úhlů. U úlohy si danou situaci šlo velice dobře představit tak, že omezení sklíčka nám zmenšuje okénko skrz které se můžeme dívat na původní vzor.

Rekonstrukce konjugovanou vlnou se nám také podařila, ač ne jako 3D obraz do cigaretového kouře. Při domácí rekonstrukci jsme nejlepšího tvaru reálného obrazu dosáhli při použití zeleného laserového ukazovátka z presenteru. Úhel pozorování autíčka v reálném obrazu se měnil v závislosti na místě hologramu osvětleném laserovým svazkem (stále však pod stejným úhlem). Virtuální obraz byl naopak nejlépe patrný při nasvícení hologramu červeným laserem z myši k počítači. Nedodržení optimálních úhlových podmínek při rekonstrukci vede vždy k deformaci, rozostření až úplnému zmizení obrazu.

## Reference

- [1] *Návod k úloze 4 - Holografie* [online], [cit. 12. dubna 2015], [http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_04.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_04.pdf)