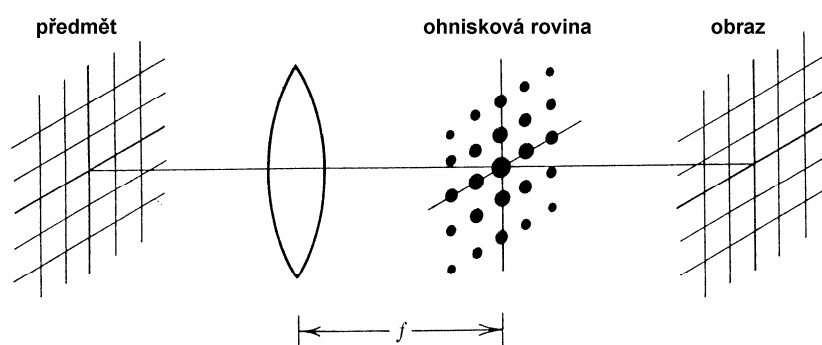


Prostorová filtrace

Uvažujme uspořádání na obr. PF-1. Koherentně osvětlený předmět leží v předmětové rovině yz . Optickým systémem je v rovině $y'z'$ (obrazová rovina) vytvořen obraz tohoto předmětu. V ohniskové rovině $\mu\nu$ se objeví difrakční obraz $E(\mu, \nu)$ předmětové funkce $g(y, z)$, který je jejím Fourierovým obrazem. Naopak obrazová funkce $g'(y', z')$, která se objeví v obrazové rovině bude Fourierovým obrazem funkce $E(\mu, \nu)$.



Obr. PF-1. Demonstrace mechanismu formování koherentního obrazu a základních principů Fourierovy analýzy (Abbeho a Porterův experiment).

Jestliže optický systém přenáší všechny prostorové frekvence v rozsahu $\mu = \pm\infty$, $\nu = \pm\infty$, potom, díky vlastnostem Fourierovy transformace, bude obrazová funkce $g'(y', z')$ přesně úměrná předmětové funkci $g(y, z)$; tedy obraz bude přesnou reprodukcí předmětu. Avšak konečné rozměry apertury v rovině $\mu\nu$ omezují rozsah prostorových frekvencí propouštěných optickým systémem. Navíc optické vady (aberace) a další nedokonalosti čočky (optického systému) mají za následek modifikaci funkce $E(\mu, \nu)$. Všechny tyto vlivy mohou být zahrnuty do funkce $T(\mu, \nu)$ nazývané **přenosová funkce** optického systému. Implicitně můžeme tuto funkci zavést vztahem

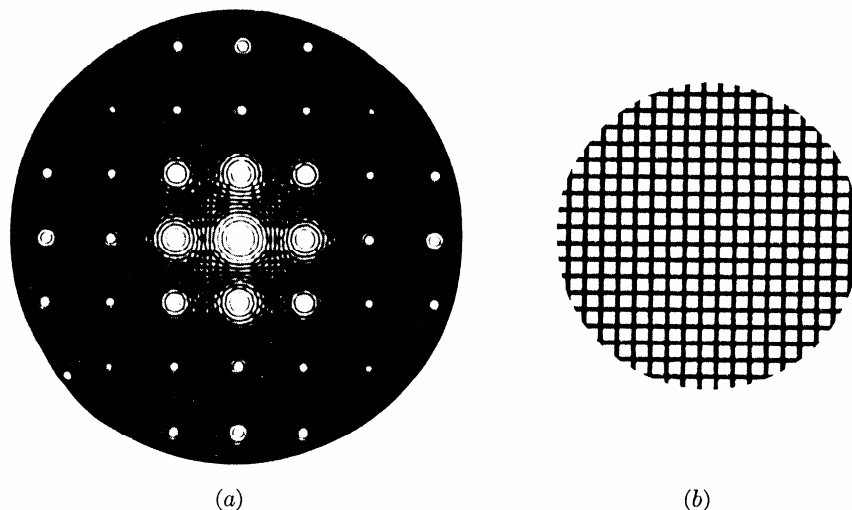
$$E'(\mu, \nu) = T(\mu, \nu) \cdot E(\mu, \nu)$$

Potom

$$g'(y', z') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(\mu, \nu) \cdot E(\mu, \nu) e^{-i(\mu y' + \nu z')} d\mu d\nu$$

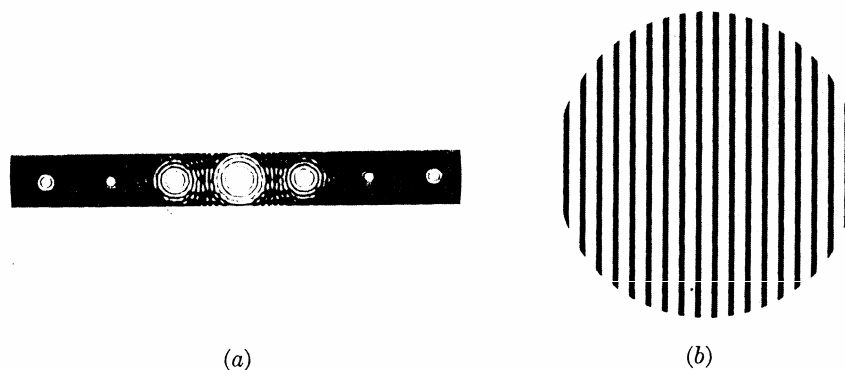
tedy obrazovou funkci $g'(x', y')$ dostáváme jako výsledek Fourierovy transformace součinu funkcí $T(\mu, \nu) \cdot E(\mu, \nu)$. Meze integrace $\pm\infty$ jsou do značné míry formální – skutečné meze jsou dány vlastnostmi přenosové funkce $T(\mu, \nu)$.

Přenosová funkce může být modifikována umístěním nejrůznějších apertur do roviny $\mu\nu$. To je známo jako **prostorová filtrace** (spatial filtering). Situace je analogická filtrování elektrického signálu pomocí pasivních obvodů. Předmětová funkce představuje vstupní signál a obrazová funkce představuje výstupní signál. Optický systém funguje jako filtr propouštějící některé prostorové frekvence a potlačující ostatní.



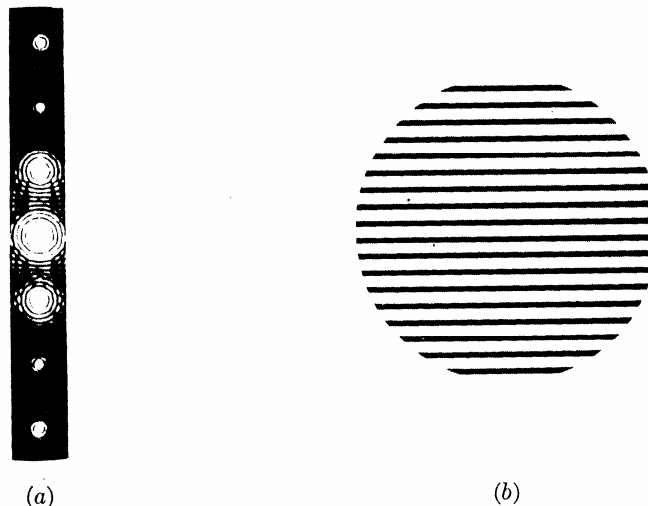
Obr. PF-2. Jemná drátěná síťka (předmět v experimentu na Obr. PF1) a její: (a) spektrum (Fourierův obraz), (b) nefiltrovaný obraz.

Na obr. PF-2 je znázorněn Fourierův obraz (funkce $E(\mu, \nu)$) jemné drátěné sítě (předmětová funkce $g(y, z)$) a její nefiltrovaný obraz (obrazová funkce $g'(y', z')$). Vliv horizontální štěrbinou umístěné v rovině $\mu\nu$ působící jako horizontální pásmová propust (propouštějící všechny horizontální frekvence μ a blokuující všechny vertikální frekvence ν) na obraz v rovině $y'z'$ je znázorněn na obr. PF-3.



Obr. PF-3. Síťka filtrovaná horizontální štěrbinou (horizontální pásmová propust): (a) spektrum, (b) obraz.

Vliv vertikální štěrbiny umístěné v rovině $\mu\nu$ působící jako vertikální pásmová propust (propouštějící všechny vertikální frekvence ν a blokující všechny horizontální frekvence μ) na obraz v rovině $y'z'$ je znázorněn na obr. PF-4.



Obr. PF-4. Síťka filtrovaná vertikální štěrbinou (vertikální pásmová propust): (a) spektrum, (b) obraz.

Rekonstrukce vlnoplochy pomocí difrakce a holografie

Holografie byla objevena roku 1948 Dennisem Gaborem, který za její objev obdržel v roce 1971 Nobelovu cenu za fyziku.

Co je holografie? Holografie zahrnuje záznam (takový způsob záznamu obrazu objektu, kdy je zaznamenána jak amplituda tak i fáze světla přicházejícího od objektu) a rekonstrukci optických vln. Hologram je transparent obsahující kódovaný záznam optické vlny.

Začneme srovnáním s fotografií. V běžné fotografii obraz objektu zaznamenáváme na film, jehož propustnost se mění v závislosti na časové střední hodnotě intenzity světla $\langle I \rangle$ dopadajícího na film.

V holografii používáme velmi odlišný způsob záznamu – není to zobrazovací metoda a nepoužívá zobrazovací prvek (čočku). Zaznamenáváme superpozici vln přicházejících od objektu včetně jejich amplitudy a fáze – tj. **úplnou** (v řečtině znamená "holos" znamená úplný) informaci o vlně přicházející od objektu. Hologram je také zaznamenáván na film ve formě zápisu časové střední hodnoty intenzity světla $\langle I \rangle$, v níž je však díky interferenci uchována i informace o fázi.

Fotografie je vlastně dvojrozměrný předmět, jehož obraz se při prohlížení vytváří na sítnici oka. Při prohlížení hologramu rekonstruujeme, díky difrakci světla na hologramu, vlny přicházející od původního objektu a pozorujeme jeho virtuální obraz.

Hologram má některé zajímavé vlastnosti:

- Každá byť malá část hologramu nese informaci generovanou každým bodem původního objektu. Rozřežeme-li hologram na menší kousky, stále budeme vidět celý objekt! Jediné co ztrácíme při dělení hologramu na menší kousky je rozlišení obrazu.
- Holografický obraz vykazuje paralaxu – je tedy prostorový!

Abychom vytvořili hologram, potřebujeme laserové záření (je koherentní!), které rozdělíme do dvou svazků, z nichž jeden osvětluje objekt. Druhý svazek, nazývaný referenční svazek, je odražen zrcadlem tak, aby dopadal na jemnozrný fotografickou desku. Referenční a od předmětu odražený svazek na fotografické desce interferují. Hologram je vlastně interferenční obrazec zaznamenaný na fotografické desce obsahující veškerou informaci potřebnou pro rekonstrukci vlnoplochy odražené od předmětu.

Jestliže vyvolaný hologram osvětlíme svazkem laserového záření, část výsledné difraktovaného vlnového pole bude přesnou prostorovou kopií původní vlny odražené předmětem. Pozorovatel dívající se na hologram vidí prostorový obraz předmětu a otáčením hlavy může měnit i perspektivu pohledu.

Pro jednoduchost budeme předpokládat, že referenční svazek je kolimovaný, je tedy tvořen rovinnými vlnami. Necht' x a y jsou souřadnice v rovině fotografické desky a necht' $U(x,y)$ označuje komplexní amplitudu odražené vlny v rovině xy . Protože $U(x,y)$ je komplexní číslo, můžeme ji psát ve tvaru

$$U(x, y) = a(x, y) e^{i\phi(x, y)}$$

kde $a(x,y)$ je reálné. Podobně necht' je $U_0(x,y)$ komplexní amplituda referenční vlny. Protože referenční vlna je komplexní, můžeme ji vyjádřit ve tvaru

$$U_0 = a_0 e^{i(\mu x + \nu y)}$$

kde a_0 je konstanta a μ a ν jsou prostorové frekvence referenční vlny v rovině xy vyjádřené vztahy

$$\mu = k \sin \alpha \quad \nu = k \sin \beta$$

kde k je vlnové číslo a úhly α a β specifikují směr referenčního svazku.

Zářivost $I(x,y)$ zaznamenaná na fotografickou desku je dána výrazem

$$\begin{aligned}
 I(x, y) &= |U_0 + U|^2 = (U_0 + U)(U_0 + U)^* = U_0U_0^* + UU^* + U_0U^* + U_0^*U = \\
 &= a_0^2 + a^2 + a_0ae^{i[\phi(x,y) - \mu x - \nu y]} + a_0ae^{-i[\phi(x,y) - \mu x - \nu y]} = a_0^2 + a^2 + 2a_0a \cos[\phi(x, y) - \mu x - \nu y]
 \end{aligned}$$

Tento výraz (mající tvar výrazu pro dvojsvazkovou interferenci) **obsahuje informaci ve tvaru amplitudově a fázově modulovaných prostorových frekvencí referenčního svazku**.

Osvětlíme-li vyvolaný hologram referenční vlnou U_0 , výsledná prošlá vlna U_T bude úměrná U_0 násobenou propustností hologramu v bodě (x, y) . Propustnost hologramu je ale úměrná $I(x, y)$, tedy

$$\begin{aligned}
 U_T(x, y) &= U_0 I = a_0 (a_0^2 + a^2) e^{i(\mu x + \nu y)} + a_0^2 a e^{i\phi} + a_0^2 a e^{-i(\phi - 2\mu x - 2\nu y)} = \\
 &= (a_0^2 + a^2) U_0 + a_0^2 U + a^2 U^{-1} U_0^{-2}
 \end{aligned}$$

Hologram působí jako difrakční mřížka – vytváří přímý svazek (člen $(a_0^2 + a^2)U_0$) a na každé straně přímého svazku difraktovaný svazek 1. řádu, Jeden z nich reprezentuje člen $a_0^2 U$.

Protože je až na konstantu roven U , představuje tento svazek rekonstruovanou vlnu odraženou od předmětu a vytváří **virtuální obraz předmětu**. Bez podrobného rozboru uvedeme, že poslední člen dává vzniknout reálnému obrazu.

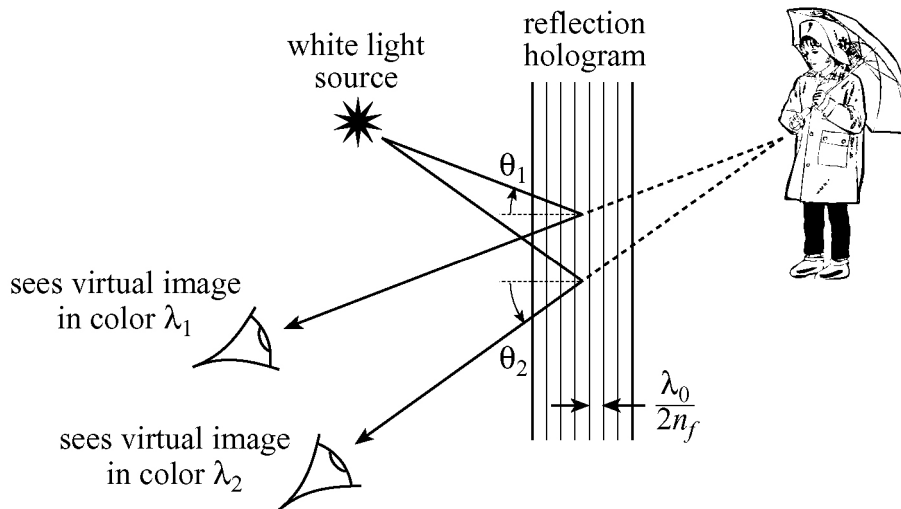
V holografii vždy vidíme **pozitivní** obraz předmětu bez ohledu na to, zda používáme pozitivní nebo negativní záznam hologramu. Je tomu tak proto, že negativní hologram vytváří vlnové pole fázově posunutě o π vzhledem k pozitivnímu hologramu. Protože oko k takovéto změně fáze není citlivé, pozorovatel vnímá v obou případech stejný pohled.

Barevný hologram – využívá tři různé vlnové délky laserového záření.

Objemový (reflexní) hologram – dosud jsme předpokládali, že hologram je tenký rovinný transparent, na kterém je zaznamenán interferenční obrazec vzniklý superpozicí předmětové a referenční vlny. Teď se budeme zabývat hologramem zaznamenaným v relativně hustém prostředí a ukážeme, že toto přináší jisté výhody. Interferenční obrazec je nyní funkcí proměnných x, y, z . Je-li zaznamenán, slouží tento obrazec jako tlustá difrakční mřížka – objemový hologram. Hologram je zaznamenán při určité vlnové délce. Jestliže ho osvětlíme bílým světlem, potom při daném úhlu pohledu uvidíme pouze barvu, která splňuje tzv.

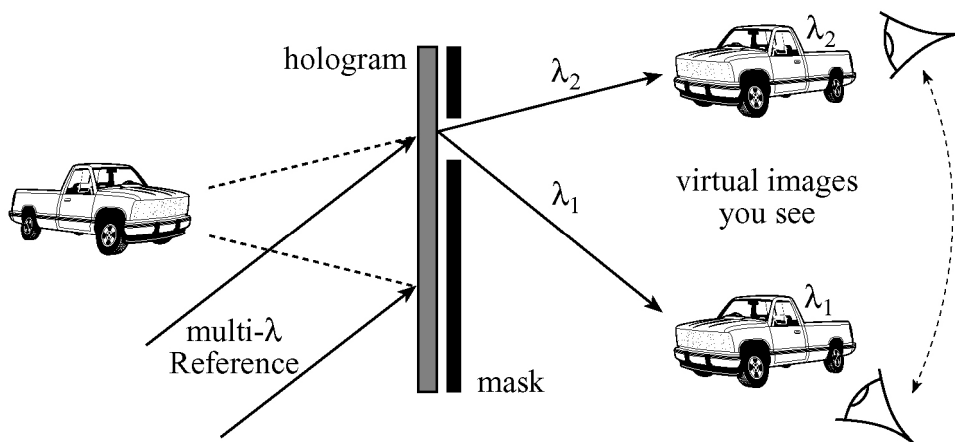
Braggovu podmínku

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\vartheta/2)}$$



Obr. PF-5. Objemový (reflexní) hologram.

Duhový hologram – další typ hologramu viditelného v bílém světle. Tento hologram je zaznamenáván přes úzkou štěrbinu, takže samozřejmě i zrekonstruovaný obraz vypadá, jako by byl viděn skrz štěrbinu. Je-li však vlnová délka jiná než vlnová délka použitá při záznamu, bude se zdát, jako by zrekonstruovaná vlna přicházela z posunuté štěrbině. Použijeme-li k rekonstrukci bílé světlo, vznikne dojem řady paralelních štěrbin, kterými je objekt vidět pokaždé v jiné barvě (na jiné vlnové délce). Obrazy spojené s jednotlivými štěrbinami vytvoří „duhu“. Každá štěrbinu zobrazuje objekt s „paralaxovým jevem“ ve směru štěrbin, ne však ve směru kolmém. Tedy bude-li štěrbinu orientována vodorovně, můžeme se podívat, jak předmět vypadá z „prava“ a „zleva“, nevidíme ho však „zdola“ či „shora“. I přesto, že paralaxa není v jednom směru zachována, vidíme třidimenzionální obraz předmětu. Duhové hologramy nacházejí rozsáhlé komerční použití (ochranné prvky např. na kreditních kartách).



Obr. PF-6. Duhový hologram.

Holografická interferometrie – aplikace holografie v interferometrii

klasická interferometrie – porovnávají se světelné vlnoplochy vzniklé ve stejném čase v různých místech

holografická interferometrie – porovnávají se vlnoplochy záření šířící se ze stejného místa vzniklé v odlišných časových okamžicích

holografická interferometrie s dvojitou expozicí – dvě samostatné expozice jsou zaznamenány na stejnou záznamovou desku. Jestliže studovaný povrch prodělal v čase mezi dvěma expozicemi nějakou deformaci či deformační pohyb, projeví se tento pohyb v rekonstruovaném obrazu ve formě interferenčních proužků.

holografie se dvěma pulsy – zaznamenány jsou dvě expozice vyvolané dvěma krátkými, intenzivními laserovými pulsy. Tyto pulsy jsou časově nepříliš odlehlé, a proto proužky v holografickém obrazu mohou prokázat pohyb, vibrace atd.