

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Ing. Karel Velechovský

VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK VYUŽITÍM FRESNELOVY DIFRAKCE

THE STRIGHT-LINE ALIGNMENT USING THE FRESNEL DIFFRACTION

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: Prof. RNDr. Jiří Komrska, CSc.

Oponenti: Prof. RNDr. Miroslav Liška, DrSc.
Doc. RNDr. Miloslav Švec, CSc.
Doc. Ing. Miloš Chmelík, CSc.

Datum obhajoby: 5. 5. 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

Fresnelova difrakce, fázová destička, vytyčování přímek

KEYWORDS

Fresnel diffraction, phase plate, alignment, straightness

Práce je uložena v areálové knihovně FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69.

© Karel Velechovský, 2004
ISBN 80-214-2693-4
ISSN 1213-4198

OBSAH

1 ÚVOD	5
2 SOUČASNÉ LASEROVÉ METODY VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK.....	6
2.1 Metody využívající prostého svazku.....	6
2.2 Difrakční metody vytyčování přímek	6
2.2.1 Kruhové mřížky.....	6
2.2.2 Pravoúhlá zonální lineární mřížka.....	7
2.2.3 Fázové filtry.....	7
2.3 Ostatní metody vytyčování přímek	8
2.3.1 Využití otvorové vady k vytyčení přímky	8
2.3.2 Využití axikonu k vytyčení přímky	8
3 NOVÉ LASEROVÉ METODY VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK.....	9
3.1 Vytyčování přímek besselovským svazkem ovlivněným difrakcí na NK-filtru	9
3.1.1 Rozložení intenzity v difrakčním obrazci.....	9
3.1.2 Chyba vytyčení přímky	12
3.2 Vytyčování přímek na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem osvětleném vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity	13
3.2.1 Rozložení intenzity v difrakčním obrazci.....	13
3.2.2 Chyba vytyčení přímky	16
3.3 Vytyčování přímek difrakcí na filtru omezeném kruhovým otvorem a osvětleném vlnou s gaussovským rozložením intenzity ovlivněnou otvorovou vadou čočky	17
3.3.1 Rozložení intenzity v difrakčním obrazci.....	17
3.3.2 Chyba vytyčení přímky	18
4 PŘÍSTROJ PRO VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK	19
4.1 Popis přístroje.....	19
4.2 Chyba vytyčení přímky	21
5 PŘÍSTROJ KE STANOVENÍ ZÁMĚRNÉHO BODU HLAVNĚ.....	22
5.1 Popis přístroje.....	22
5.2 Chyba stanovení záměrného bodu hlavně.....	23
6 ZÁVĚR.....	23
LITERATURA	25
SUMMARY.....	27
ŽIVOTOPIS.....	28

1 ÚVOD

V současné době se laserové systémy běžně používají ve všech aplikacích a oborech, kde je potřeba zajistit vysokou přesnost měřických, kontrolních a vytyčovací prací, např. v geodézii, ve stavebnictví a ve strojírenství, zejména při liniiových stavbách povrchových i podpovrchových, silničních i železničních.

Výhody laserových systémů spočívají zejména v možnosti vizuální kontroly laserového svazku, v jeho směrové stabilitě a v možnostech poměrně přesné detekce. Laserový svazek lze vhodně formovat optickými členy, lze jej zalomit, rozložit do roviny nebo rozdvojit podle potřeb.

Častým úkolem, jak v laboratořích, tak v technické i průmyslové praxi, je vytyčování přímek. Používají se dvě metody – dalekohledové a laserové. Při dalekohledové metodě je přímka určena body, jejichž obrazy se promítají do téhož bodu záměrné osnovy optického zařízení. Je tedy vyhodnocován svazek přicházející z měřického prostoru. V případě laserové metody vysíláme laserový svazek do měřického prostoru a přímku určují body, do nichž se promítá týž bod záměrné osnovy optického zařízení [3].

Výhodou laserových metod je, že jsou použitelné i za nestandardních světelných podmínek, tj. za tmy (v noci, v důlních prostorech apod.) a eventuálně za zhoršených světelných podmínek, kdy nelze použít dalekohledové metody.

Detekci laserového svazku lze provádět způsobem vizuálním, fotografickým nebo elektronickým. Pokud je požadována přesnost měření řádově desetin milimetru a lepší, je nutno použít některý systém elektronické detekce. Nejvíce se používají detektory typu kvadrantových fotodiód, na které necháme dopadat mód laserového svazku TEM_{00} . Dosažitelná přesnost je závislá především na optických vlastnostech prostředí, kterým laserový svazek prochází, a také na vlastnostech laserového systému (stabilita zařízení) a detekční soustavy. Atmosférické vlivy v běžné geodetické praxi podstatně omezují možnost použití elektronické detekce v normálních geodetických podmínkách [8, 9, 14].

Metody dalekohledové a laserové pracují se světlem procházejícím atmosférou. Světlo podléhá jejím vlivům. Hlavní odlišností je, že dalekohledové metody pracují s bílým světlem, laserové však s monochromatickým. Bílé světlo je tedy navíc zatíženo rozkladem do spektra vlivem nehomogenit v atmosféře. Rozklad do spektra způsobuje zneostření obrysů zaměřovaného objektu. Laserové metody pracují s monochromatickým světlem a tudíž k disperzi nedochází. Využívají převážně světlo červené barvy, které má nejmenší odklon refrakcí ze všech vlnových délek viditelné oblasti spektra. Až na výše uvedené rozdíly můžeme říci, že není podstatné s jakým světlem pracujeme, protože laserové i bílé světlo podléhá vlivům atmosféry stejně.

Cílem práce je zabývat se difrakční metodou vytyčování přímek, která je založena na Fresnelově difrakci na filtru tvořeném kvadranty s touž amplitudovou propustností, avšak posouvající fázi tak, že posuv fáze způsobený sousedními kvadranty se liší o π . Fresnelovy difrakční jevy pozorované za filtrem jsou velmi kontrastní, v různých vzdálenostech od filtru se liší pouze měřítkem, rozložení

intenzity má čtyřčetnou a zrcadlovou symetrii a přímky nulové intenzity, které vytváří temný kříž, jsou viditelné v jakékoli vzdálenosti od difrakčního filtru [1, 2, 26]. Centrální bod difrakčního obrazce je dán průsečíkem přímek nulové intenzity. Chyba stanovení středu difrakčního obrazce, tj. chyba vytyčení přímky, je srovnatelná se současnými metodami.

Úkolem práce je zmenšit chybu dosavadní difrakční metody nalezením takového Fresnelova difrakčního jevu, který svou strukturou umožní stanovit střed Fresnelova difrakčního obrazce s menší chybou a porovnat dosažené výsledky se současnými, zejména laserovými, metodami. Dalším úkolem je zkonstruovat mobilní přístroj zejména pro aplikaci vytyčování přímek, který umožní experimentálně ověřit praktickou využitelnost difrakčních jevů ve větších vzdálenostech v laboratorních podmínkách a v terénu.

2 SOUČASNÉ LASEROVÉ METODY VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK

2.1 METODY VYUŽÍVAJÍCÍ PROSTÉHO SVAZKU

V počátcích laserového vytyčování přímek byla snaha o využití vhodných vlastností laserového svazku generovaného zejména He-Ne laserem. Jde o gaussovské svazky s příčným modem rozložení intenzity TEM_{00} a TEM_{11} a vlnové délky 633 nm. Výhodou svazků je jejich malá divergence, možnost transformace a dobrá viditelnost středu stopy i za dne daná gaussovským rozložením intenzity.

Metoda je založena na fokusaci laserového svazku do místa detekce. V případě použití modu TEM_{00} je přímka určena osou laserového svazku, tj. středem kruhové stopy. Optimální průměr stopy je 8 – 12 mm [8]. Její střed lze určit s chybou asi jedné desetiny až dvacetiny průměru stopy [8]. U modu TEM_{11} je bod vytyčované přímky definován jako průsečík dvou kolmých přímek nulové intenzity. Pro většinu prací ve stavebnictví (vedení razících štítů, zemní práce, kladení potrubí apod.) je tato metoda vyhovující.

2.2 DIFRAKČNÍ METODY VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK

Princip difrakčních metod spočívá ve využití difrakčního členu (filtru, mřížky) při vytyčování přímek. Používá se výhradně Fresnelova difrakce. Vhodný difrakční filtr je většinou součástí optického systému laseru, přičemž difrakční jev se pozoruje v celém měřickém prostoru, tj. mezi difrakčním filtrem a cílem [2, 3, 7, 11, 14].

2.2.1 Kruhové mřížky

Používají se zonální mřížky, které jsou difraktivními čočkami a ekvidistantní kruhové mřížky. Zonálních mřížek je několik druhů. V praxi se pro účely vytyčování používaly Soretovy mřížky, Woodovy mřížky a varifokální moiré zonální mřížky.

Zonální mřížky jsou tvořeny mezikružními, jejichž poloměry jsou v poměru odmocnin přirozených čísel, tj. $r_1 = r\sqrt{1}, r_2 = r\sqrt{2}, \dots$ atd. Pokud jsou sousední mezikruží propustná a mění fázi světla prošlého tímto mezikružím o π , potom hovoříme o Woodově mřížce. Pokud jsou ovšem nepropustná, tj. světlo prochází jen sudými nebo jen lichými zónami a ke změně fáze tudíž nedochází, hovoříme o Soretových mřížkách negativních a pozitivních [17]. Varifokální moiré zonální mřížka je tvořena dvěma za sebou položenými skleněnými planparalelními destičkami se zvláštním typem mřížky (viz článek [28]), jejichž překrytím a lineárním posunutím v horizontální ose vznikne zonální mřížka. Vzdálenost hlavního ohniska je nepřímo úměrná velikosti lineárního posunutí destiček vůči sobě. Mřížka nemění svoji propustnost od zóny k zóně skokově, jak je tomu u Soretovy mřížky, ale pozvolna. Nevýhodou zonálních mřížek je malá intenzita v jejich ohnisku ve srovnání s ideální čočkou stejného průměru.

Ekvidistantní kruhová mřížka je tvořena soustřednými propustnými a nepropustnými mezikružními ohraničenými kružnicemi, jejichž poloměry jsou v poměru přirozených čísel.

V jakékoli vzdálenosti za mřížkami vznikají difrakční obrazce ve tvaru soustředných tmavých a světlých kroužků, jejichž středy leží na vytyčované přímce. Chyba vytyčení přímky je pro všechny kruhové mřížky podobná. Při použití ekvidistantní mřížky a vhodného odečítacího zařízení má střední chyba vytyčení přímky hodnotu 0,21 mm na vzdálenosti 100 m [9].

2.2.2 Pravoúhlá zonální lineární mřížka

Pravoúhlá zonální lineární mřížka je tvořena na sebe kolmými zónami tvaru proužků, jejichž šířky jsou v poměru odmocnin z přirozených čísel. Proužky jsou střídavě propustné a nepropustné. Mřížka je vlastně pravoúhlo obdobou kruhové Soretovy mřížky a má rovněž fokusační účinky. Difrakční obrazec v ohnisku mřížky tvoří dvě na sebe kolmé přímky maximální intenzity. Bod vytyčované přímky definuje průsečík přímek. Mřížka byla použita k ustavení 3 200 m dlouhého lineárního urychlovače částic. Střed difrakčního obrazce se vyhledával fotoelektrickým detektorem, který rozlišoval posunutí s chybou 0,0025 mm. Vliv prostředí na laserový svazek byl odstraněn vyčerpáním vzduchu z prostoru trubice urychlovače [10].

2.2.3 Fázové filtry

V předchozích metodách byl bod vytyčované přímky definován převážně s využitím maximální intenzity v ose svazku. Jde o základní princip většiny metod difrakčních i nedifrakčních. Proto se někteří autoři začali zabývat možnostmi využití nulové intenzity ke zpřesnění měřících metod [2, 6, 21]. Problém je však podstatně složitější. V případě Fresnelovy difrakce jsou místa nulové intenzity v difrakčních jevech vzácností [1].

Předmětem zájmu mnoha autorů byla přímka nulové intenzity, která vzniká při difrakci na propustné polorovině posouvající fázi prošlého světla o π [6, 21 až 25]. H. D. Betz poprvé použil dvě na sebe kolmé propustné poloroviny posouvající fázi světla o π . Vytvořil filtr, za nímž vznikají difrakční jevy typické svou nulovou intenzitou podél dvou na sebe kolmých přímek, které vytváří temný kříž (viz obr. 6 na str. 15). Difrakční obrazec je velmi kontrastní, v různých vzdálenostech od filtru se liší pouze měřítkem, rozložení intenzity má čtyřčetnou a zrcadlovou symetrii a přímky nulové intenzity jsou viditelné v jakékoli vzdálenosti od difrakčního filtru [1, 2, 26]. Bod vytyčované přímky je dán průsečíkem přímek nulové intenzity. Jde však o difrakci na neomezeném difrakčním filtru zaujímajícím celou rovinu.

H. D. Betz využíval filtru k centrování. Všiml si, že pokud vloží za systém zdroj – filtr třetí člen, zde konkrétně štyřbinu a obdélníkový otvor, lze určit ze změny intenzity v jednotlivých kvadrantech Fresnelova difrakčního obrazce odchylku osy symetrie otvoru od osy symetrie difrakčního obrazce. Na krátkých vzdálenostech a s využitím elektronické detekce byl schopen vycentrovat třetí člen s chybou menší než 0,01 mm. Pro vzdálenost 100 m odhaduje, že vizuální detekcí je možné vycentrovat třetí člen s chybou asi 2,5 mm [2].

2.3 OSTATNÍ METODY VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK

Následující metody nelze přísně rozdělit na interferenční nebo difrakční. Na úskalí spojená s vymezením pojmů difrakce, interference a rozptyl upozorňuje práce [19].

2.3.1 Využití otvorové vady k vytyčení přímky

Využitím optických vad k přesnému vytyčení přímky se zabýval zejména A. C. S. van Heel [4, 5]. Zabýval se otvorovou vadou, kterou získal použitím sférické optiky, zejména skleněné kuličky. Ve své práci uvádí řadu experimentálních uspořádání založených na průchodu i odrazu světla kulovou plochou kuličky. Princip metody spočívá v osvětlení skleněné kuličky kulovou vlnou tak, aby za ní vycházel kolimovaný svazek ovlivněný její otvorovou vadou. Za kuličkou vznikají kontrastní rotačně symetrické obrazce dobře patrné v rozsahu vzdáleností několika desítek metrů. Ve středu obrazce je vždy maximum intenzity. A. C. S. van Heel testoval chybu vytyčení přímky monochromatickým a bílým světlem v rozsahu vzdáleností 1 m až 80 m. Uvádí, že lze dosáhnout chyby vytyčení přímky pro obě světla v rozmezí 1'' až 2''.

2.3.2 Využití axikonu k vytyčení přímky

A. C. S. van Heel se axikonem krátce zabýval rovněž v práci [4, 5]. Jde o poměrně vzácný optický prvek ve tvaru rotačního kužele. Může být reflexní či refrakční, s různým vrcholovým úhlem a navíc v kombinaci s rovinnou, konvexní nebo konkávní plochou, která tvoří základnu kužele. Za axikonem vznikají kontrastní rotačně symetrické obrazce, které mají ve středu maximum intenzity

v určitém rozmezí vzdálenosti za axikonem. Maximální vzdálenost je dána průsečíkem mezních paprsků, které jsou lomeny axikonem v největší vzdálenosti od jeho středu. Za průsečíkem mezních paprsků vznikají rovněž obrazce typické svou rotačně symetricky rozloženou intenzitou. Intenzita na ose je však nulová.

Pokud je na ose maximální intenzita, je radiální rozložení intenzity ve svazku dáno Besselovou funkcí nultého řádu J_0 . Axikon tedy slouží k transformaci dopadající kulové nebo rovinné vlny s rovnoměrným rozložením intenzity na vlnu s besselovským rozložením intenzity. Besselovskými svazky se zabývají články [12, 13, 20, 27].

Další metodou je použití axikonu osvětleného laguerrovsko-gaussovským svazkem [30]. Stopa osvětlujícího svazku je v tomto případě rotačně symetrická a má tvar mezikruží. Za axikonem pozorujeme stopu besselovského svazku vyššího řádu, která má nulovou intenzitu v ose svazku. Chybu vytyčení přímky neuvedl žádný z autorů.

3 NOVÉ LASEROVÉ METODY VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK

Podstatou mé práce jsou metody vytyčování přímek, které využívají Fresnelových difrakčních jevů na filtru vymezeném kruhovým otvorem a tvořeném kvadranty s touž amplitudovou propustností, avšak posouvající fázi tak, že posuv fáze způsobený sousedními kvadranty se liší o π . Pro tento druh fázového difrakčního filtru budeme v dalším textu používat následujícího zkráceného označení:

- (i) K-filtr, kterým obecně nazýváme fázový kvadrantový difrakční filtr,
- (ii) NK-filtr, kterým nazýváme neomezený fázový kvadrantový difrakční filtr,
- (iii) OK-filtr, kterým nazýváme omezený fázový kvadrantový difrakční filtr.

Rozložení intenzity ve Fresnelově difrakci na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem má nulovou intenzitu podél dvou na sebe kolmých přímek a velmi jemnou strukturu v centrální části difrakčního obrazce. Jemná struktura umožňuje stanovit střed difrakčního obrazce s velmi malou chybou v širokém rozsahu vzdáleností. Jevy jsou však natolik jemné, že jejich výhodných vlastností lze využít spíše v prostorách se stabilní atmosférou, jakými jsou např. uzavřené haly, důlní šachty, tunely, podzemní střešnice apod.

Nejdříve se však budu krátce zabývat metodou používající besselovský svazek, kterou lze poměrně jednoduchým způsobem zpřesnit centrickým vložením NK-filtru do optické soustavy určené k vytvoření besselovského svazku.

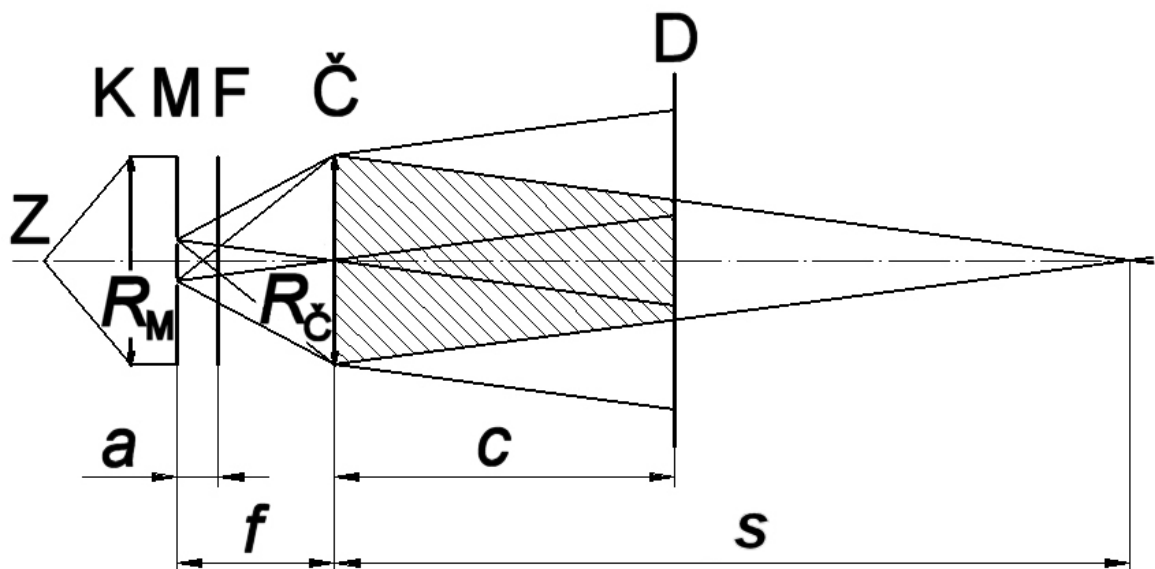
3.1 VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK BESSELOVSKÝM SVAZKEM OVLIVNĚNÝM DIFRAKČÍ NA NK-FILTRU

3.1.1 Rozložení intenzity v difrakčním obrazci

Schéma experimentálního uspořádání je na obr. 1. Úzké propustné mezikruží M o poloměru $R_M = 4$ mm a šířce 0,1 mm je osvětleno rovinnou vlnou o vlnové délce

$\lambda = 633 \text{ nm}$, která vychází z kolimátoru K. Mezikruží M je umístěno v ohnisku čočky Č o poloměru $R_{\check{C}} = 90 \text{ mm}$ a ohniskové vzdálenosti $f = 1600 \text{ mm}$. Každý bod úzkého propustného mezikruží M je vlastně bodovým zdrojem divergentní kulové vlny, která je čočkou Č transformována na vlnu rovinnou a za čočkou Č se šíří pod určitým úhlem. Úhel šíření rovinné vlny je dán poloměrem R_M úzkého mezikruží M a ohniskovou vzdáleností f čočky Č. Interferencí rovinných vln získáme besselovský svazek, který lze pozorovat do vzdálenosti s od čočky Č. Vzdálenost c roviny pozorování D od čočky Č je 2140 mm .

Mezi úzké propustné mezikruží M o poloměru $R_M = 4 \text{ mm}$ a čočku Č vložíme centricky NK-filtr F (obr. 1). NK-filtr F je ve vzdálenosti $a = 90 \text{ mm}$ od mezikruží M. Ideálním případem je vzdálenost $a = 0$. Na NK-filtru F dochází k difrakci osvětlující vlny a za čočkou Č pozorujeme velmi jemný kříž, tvořený dvěma na sebe kolmými přímkami nulové intenzity (obr. 2). Pokud NK-filtr



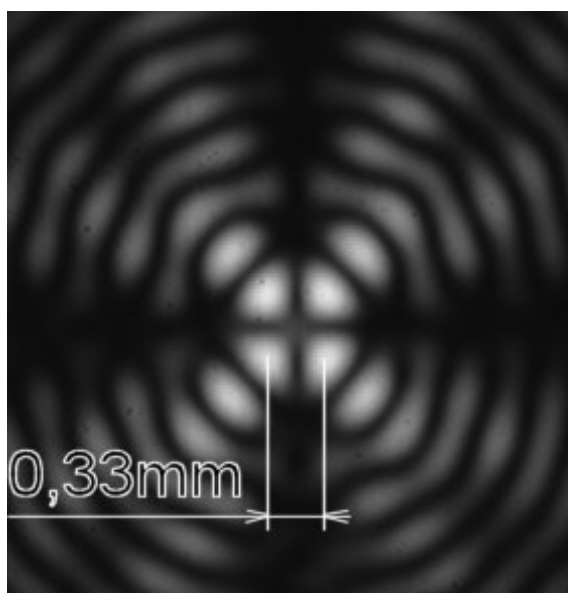
Obr. 1: Centrické vložení NK-filtru do optické soustavy určené k vytvoření besselovského svazku

F z optické soustavy odstraníme, budeme za čočkou Č pozorovat do vzdálenosti s besselovský svazek (obr. 3).

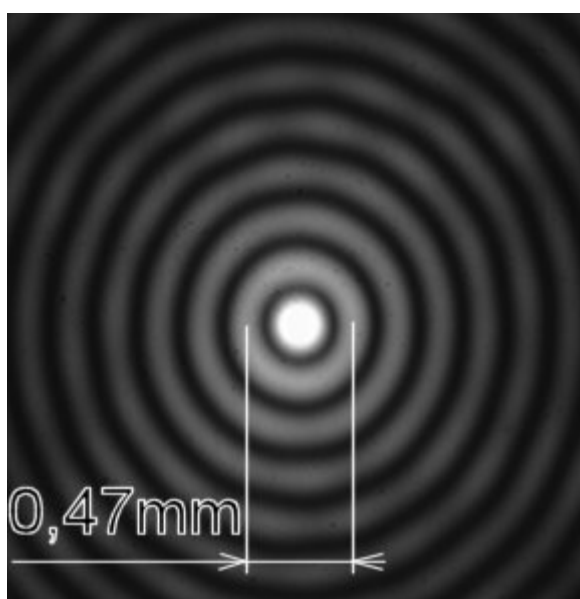
Vzdálenost, na které pozorujeme velmi jemný kříž nebo besselovský svazek, je dána vztahem

$$s = f \cdot \frac{R_{\check{C}}}{R_M}. \quad (1)$$

V našem případě se vzdálenost s rovná 36 m . Svazek je neomezený, neboť počet propuštěných Fresnelových zón je velký (zde přibližně 360) pro danou vzdálenost s a použitý průměr $R_{\check{C}}$ čočky Č [19].



Obr. 2: Fresnelova difrakce na NK-filtru vloženém do optické soustavy určené k vytvoření besselovského svazku. Snímek byl exponován ve vzdálenosti 2,14 m od čočky o poloměru $R_{\check{c}} = 90$ mm, ohniskové vzdálenosti $f = 1600$ mm. V ohnisku čočky je úzké propustné mezikruží o poloměru $R_M = 4$ mm a šířce 0,1 mm osvětlené rovinnou vlnou s vlnovou délkou 633 nm. NK-filtr je ve vzdálenosti $a = 90$ mm od mezikruží směrem k čočce



Obr. 3: Besselovský svazek s rozložením intenzity podle Besselovy funkce J_0 . Snímek byl exponován ve vzdálenosti 2,14 m od čočky o poloměru $R_{\check{c}} = 90$ mm, ohniskové vzdálenosti $f = 1600$ mm. V ohnisku čočky je úzké propustné mezikruží o poloměru $R_M = 4$ mm a šířce 0,1 mm osvětlené rovinnou vlnou s vlnovou délkou 633 nm

Na obr. 3 je fotografie bessellovského svazku s rozložením intenzity podle Besselovy funkce nultého řádu J_0 . Svazek vytváří na stínítku kruhově symetrický obrazec s ekvidistantními minimy intenzity. Pro představu měřítka uvádím průměr prvního kroužku maxima o velikosti 0,47 mm. Struktura obrazce je velmi jemná a zdá se mi, že zejména na kratších vzdálenostech ji lze vhodným experimentálním uspořádáním vytvořit podstatně jemnější ve srovnání se strukturou dosud zkoumaných Fresnelových difrakčních obrazců vhodných k vytyčování přímek. Navíc v širokém rozsahu vzdáleností od čočky až do limitní vzdálenosti s se průměr prvního kroužku maxima, a tedy i průměry ostatních kroužků maxim, téměř nemění [13].

Na obr. 2 je fotografie Fresnelovy difrakce na NK-filtru centricky vloženém do optické soustavy určené k vytvoření bessellovského svazku. Z obrázků 2 a 3 je patrné, že polohy maximální intenzity ve Fresnelově difrakci na NK-filtru vloženém do optické soustavy určené k vytvoření bessellovského svazku odpovídají polohám maxim intenzity bessellovského svazku až na jeho centrální maximum. „Zjemnění kříže“ je tedy dáno vhodným rotačně symetrickým rozložením intenzity ve svazku, který by vznikl v místě pozorování tehdy, pokud by NK-filtr nebyl v optickém systému přítomen.

3.1.2 Chyba vytyčení přímky

Chybu vytyčení přímky prostým bessellovským svazkem lze odhadnout na 5 % průměru prvního kroužku maxima (obr. 3), v tomto případě konkrétně na 0,024 mm na vzdálenosti 2 m, což je v úhlových jednotkách 2,5''. V případě použití bessellovského svazku v limitní vzdálenosti $s = 36$ m, je chyba vytyčení přímky velmi malá a dosahuje hodnoty 0,14''.

V případě centrického vložení NK-filtru do optické soustavy určené k vytvoření bessellovského svazku lze chybu vytyčení přímky odhadnout na 5 % rozteče centrálních maxim difrakčního obrazce (obr. 2), v tomto případě konkrétně na 0,017 mm na vzdálenosti 2 m, což je v úhlových jednotkách 1,8''. V případě použití bessellovského svazku ovlivněného difrakcí na NK-filtru v limitní vzdálenosti $s = 36$ m, je chyba vytyčení přímky extrémně nízká a dosahuje hodnoty 0,1''. Hodnota chyby je řádově menší než hodnoty dosahované jinými metodami.

Z výše uvedeného rovněž vyplývá, že bessellovské svazky jsou velmi výhodné, neboť paradoxně s rostoucí vzdáleností vytyčování klesá chyba vytyčení přímky. Chyba vytyčení přímky se použitím NK-filtru snížila o 30 % ve srovnání s prostým bessellovským svazkem.

3.2 VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK NA OK-FILTRU OMEZENÉM KRUHOVÝM OTVOREM OSVĚTLENÉM VLNOU S ROVNOMĚRNÝM ROZLOŽENÍM INTENZITY

3.2.1 Rozložení intenzity v difrakčním obrazci

Navrhujeme metodu vytyčování přímek na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem. Omezení K-filtru je podstatné tím, že Fresnelovy difrakční jevy získávají velmi jemnou strukturu rozložení intenzity světla v centrální části difrakčního obrazce. Ve větších vzdálenostech od OK-filtru odpovídá konečné velikosti OK-filtru jen malý počet propuštěných Fresnelových zón, a to zásadním způsobem ovlivňuje výsledný tvar Fresnelova difrakčního obrazce. Nulovou intenzitu podél dvou na sebe kolmých přímek lze ovšem i při tomto omezení OK-filtru pozorovat v jakékoli vzdálenosti od OK-filtru.

Matematický popis jevu je prací mého školitele Prof. RNDr. J. Komrsky, CSc., a je podrobně popsán v článku [31]. Na jeho základě jsou difrakční jevy analyzovány na počítači. Rozložení intenzity ve Fresnelově difrakci na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem je dáno vztahem

$$\left| \psi_2\left(r, \frac{\pi}{4}, n\right) \right|^2 = \left| i \frac{4n}{\pi} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(-1)^l}{2l+1} D_{2(2l+1),n}(r) \right|^2, \quad (1)$$

kde výraz $D_{2(2l+1),n}(r)$ je Hankelovou transformací funkce $\text{circ}(t) f(\rho_0 t) \exp(in\pi t^2)$, tj.

$$D_{2(2l+1),n}(r) = 2\pi \int_0^1 f(\rho_0 t) \exp(in\pi t^2) J_{2(2l+1)}(2\pi r t) t dt. \quad (2)$$

Vztah (1) popisuje rozložení intenzity ve směru $\varphi = \pi/4$ od středu difrakčního obrazce, přičemž směr φ měříme od přímky nulové intenzity v difrakčním obrazci. Ve vztahu (1) je r dáno výrazem

$$r = \frac{n}{\rho_0} \sqrt{x^2 + y^2},$$

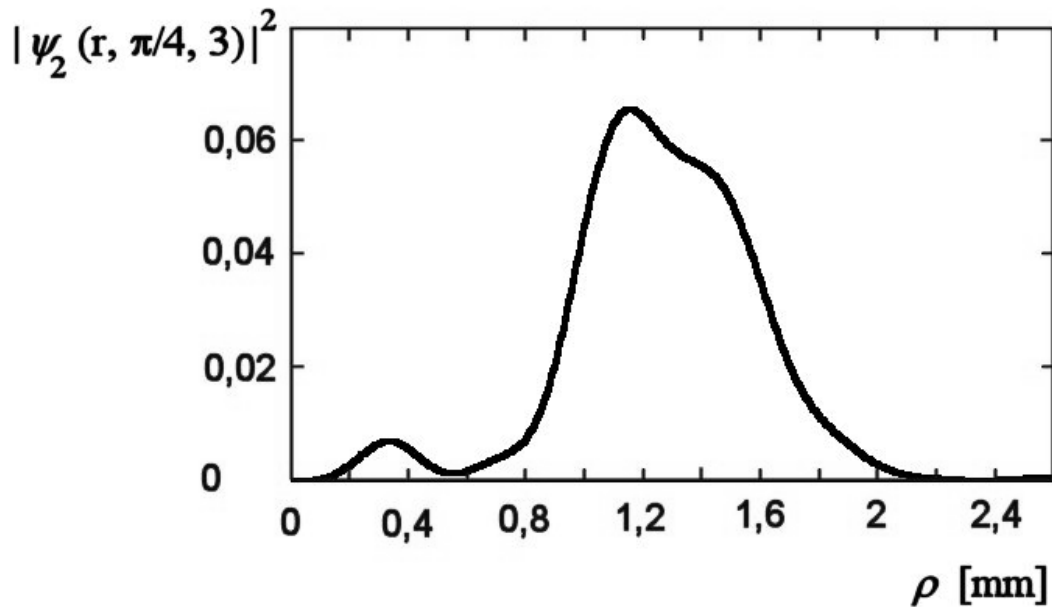
kde n je počet propuštěných Fresnelových zón, ρ_0 poloměr kruhového otvoru omezujícího OK-filtr a x, y souřadnice v místě pozorování difrakčního obrazce.

Ve vztahu (2) je t vyjádřeno výrazem

$$t = \frac{1}{\rho_0} \sqrt{x_M^2 + y_M^2},$$

kde x_M, y_M jsou souřadnice v rovině OK-filtru. Člen $\text{circ}(t)$ definuje omezení OK-filtru kruhovým otvorem a člen $f(\rho_0 t)$ vyjadřuje osvětlující vlnu OK-filtru. Zde $f(\rho_0 t) = 1$ při osvětlení OK-filtru rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity.

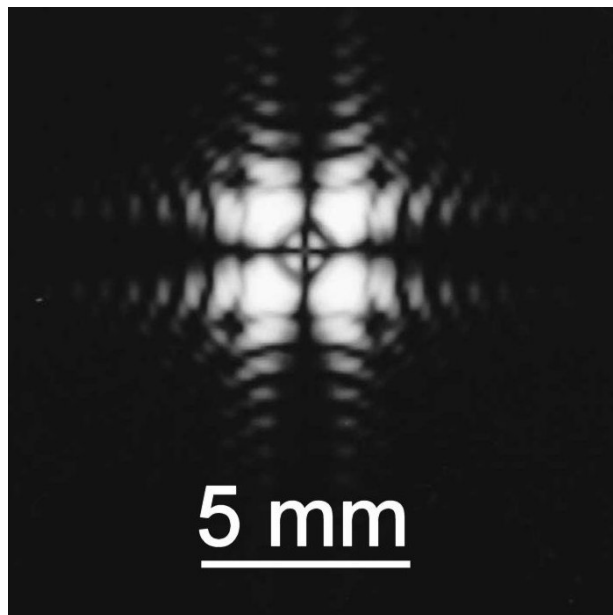
Na obr. 4 je vypočteno rozložení intenzity pro Fresnelovu difrakci na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem o poloměru $\rho_0 = 2$ mm osvětleném rovinnou vlnou



Obr. 4: Intenzita $|\psi_2(r, \pi/4, n)|^2$ vypočtená podle (1) pro $n = 3$, $\rho_0 = 2$ mm jako funkce vzdálenosti

$$\rho = \frac{\rho_0}{n} r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

od středu difrakčního obrazce v rovině $z = 2,1$ m



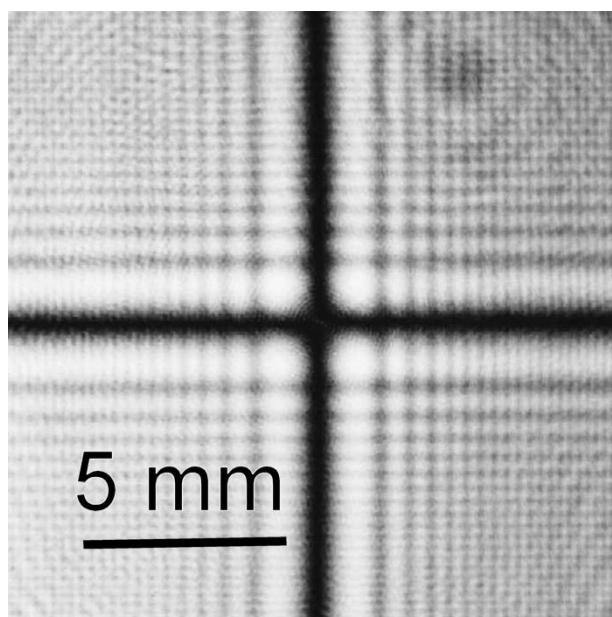
Obr 5: Fresnelova difrakce na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem o poloměru 2 mm. Osvětlující vlna je rovinná s rovnoměrným rozložením intenzity a vlnové délce 635 nm. Snímek byl exponován ve vzdálenosti $z = 2,1$ m a odpovídá třem propuštěným Fresnelovým zónám

s rovnoměrným rozložením intenzity s vlnovou délkou 635 nm. Snímek odpovídá třem propuštěným Fresnelovým zónám. Na svislé ose obr. 4 je intenzita $|\psi_2(r, \pi/4, 3)|^2$, na vodorovné ose vzdálenost v mm od středu difrakčního obrazce ve směru $\varphi = \pi/4$, přičemž směr φ měříme od přímky nulové intenzity v difrakčním obrazci.

Na obr. 5 je snímek Fresnelovy difrakce pořízený v laboratorních podmínkách. OK-filtr byl omezen kruhovým otvorem o poloměru 2 mm. Snímek byl exponován ve vzdálenosti 2,1 m od filtru, což odpovídá třem propuštěným Fresnelovým zónám. Při porovnání obr. 4 a obr. 5 se průběhy intenzity ve směru $\varphi = \pi/4$ dobře shodují.

Na obr. 6 je Fresnelova difrakce na NK-filtru. Experimentální uspořádání je stejné jako u obr. 5, pouze jsme odstranili omezení K-filtru. Jevem na obr. 6 se podrobně zabývá článek [1].

Srovnáme-li obr. 5 s obr. 6, vidíme, že oba difrakční obrazce mají nulovou intenzitu podél dvou na sebe kolmých přímek, jejichž průsečík určuje střed difrakčního obrazce. V obr. 5 došlo ke zjemnění centrální části difrakčního obrazce vlivem omezení kruhovým otvorem. Přímky nulové intenzity nejsou již reprezentovány širokými tmavými pásy (obr. 6), ale poměrně tenkými tmavými čarami (obr. 5), jejichž průsečík, tj. střed difrakčního obrazce, lze stanovit s menší chybou. Míru zjemnění lze nahlédnout z rozteče prvních hřebenů světlých proužků na obr. 6, které zůstaly zachovány na obr. 5 v okrajových částech zjemnělého Fresnelova difrakčního obrazce. Konkrétně je rozteč prvních hřebenů světlých proužků na obr. 6 přibližně 4x větší než rozteč prvních maxim intenzity zjemnělé centrální části difrakčního obrazce na obr. 5. Tím dochází i ke čtyřnásobnému zmenšení chyby ve stanovení polohy středu difrakčního obrazce.



Obr. 6: Fresnelova difrakce na NK-filtru. Osvětlující vlna je rovinná s rovnoměrným rozložením intenzity a vlnové délce 635 nm. Snímek byl exponován ve vzdálenosti $z = 2,1$ m

3.2.2 Chyba vytyčení přímky

Střed difrakčního obrazce lze stanovit s chybou, která je rovna 5 % rozteče prvních hřebenů světých proužků. V případě difrakce na NK-filtru na obr. 6 má hodnotu 0,09 mm. U OK-filtru vyjdeme z obr. 4. První maximum intenzity je ve vzdálenosti 0,34 mm, takže rozteč prvních maxim intenzity je 0,68 mm. Rozteč je však měřená pod úhlem 45°. Ve vodorovném nebo svislém směru je její hodnota 0,48 mm. Chyba je 5 % této rozteče, tj. 0,024 mm. Pro vzdálenost 2,1 m má chyba v úhlových jednotkách hodnotu 2,4'' pro OK-filtr a 9'' pro NK-filtr.

Tab. 1 na str. 16 uvádí teoretické hodnoty chyby ve stanovení polohy středu difrakčního obrazce použitím NK-filtru a OK-filtru. Osvětlující vlna je rovinná s rovnoměrným rozložením intenzity a vlnovou délkou 635 nm, poloměr omezujícího otvoru je 25 mm.

Tab. 1: Teoretické hodnoty chyby ve stanovení polohy středu difrakčního obrazce při použití NK-filtru a OK-filtru osvětleného touž vlnou

počet zón, n	vzdálenost z [m]	$\Delta x_I = \Delta y_I$ [mm]	$\Delta x_{II} = \Delta y_{II}$ [mm]
1	984	2,1	1,06
2	492	1,5	0,44
3	328	1,2	0,30
4	246	1,1	0,23
5	197	1	0,18
10	98	0,7	0,08

$\Delta x_I = \Delta y_I$: chyba pro Fresnelovu difrakci na NK-filtru osvětleném rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity, $\lambda = 635$ nm

$\Delta x_{II} = \Delta y_{II}$: chyba pro Fresnelovu difrakci na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem o poloměru 25 mm osvětleném rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity, $\lambda = 635$ nm

V případě Fresnelovy difrakce na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem jsou uvedené chyby výrazně menší než hodnoty dosahované jinými metodami. Hodnota úhlové chyby se pohybuje kolem 0,2'' v širokém rozsahu vzdáleností od 100 m do 1000 m.

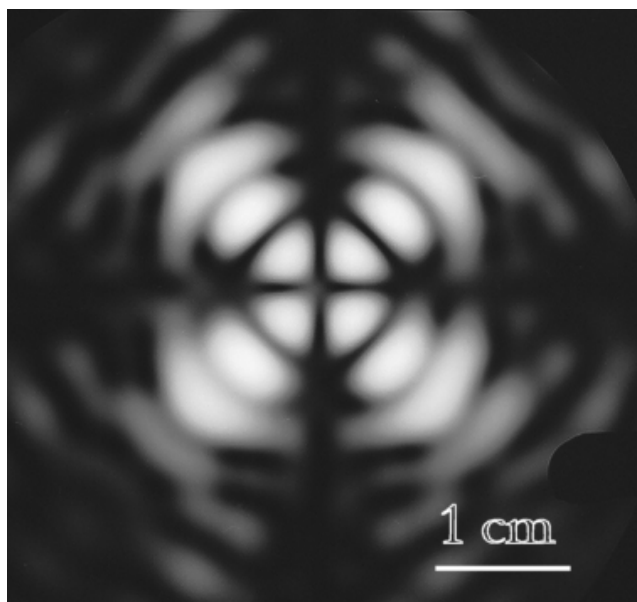
Zjemnění Fresnelovy difrakce omezením K-filtru se doposud nevyužívalo. Je to překvapující, neboť ve skutečnosti má K-filtr vždy konečnou velikost. Ve velkých vzdálenostech odpovídá této konečné velikosti OK-filtru jen malý počet propuštěných Fresnelových zón. Konkrétně kruh o poloměru 25 mm představuje ve vzdálenosti 1 km jednu Fresnelovu zónu. Počet propuštěných Fresnelových zón závisí na parametrech experimentálního uspořádání, tj. na typu osvětlující vlny, vlnové délce světla, vzdálenosti zdroje a roviny pozorování od OK-filtru a geometrii omezení OK-filtru. Vhodným omezením OK-filtru lze hodnotu chyby ve stanovení středu difrakčního obrazce výrazně ovlivnit [15]. K osvětlení OK-filtru lze využít

vlny s gaussovským, besselovským či jiným rotačně symetrickým rozložením intenzity světla.

3.3 VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK DIFRAKČÍ NA OK-FILTRU OMEZENÉM KRUHOVÝM OTVOREM A OSVĚTLENÉM VLNOU S GAUSSOVSKÝM ROZLOŽENÍM INTENZITY OVLIVNĚNOU OTVOROVOU VADOU ČOČKY

3.3.1 Rozložení intenzity v difrakčním obrazci

V konkrétní realizaci přístroje pro vytyčování přímek využíváme následující uspořádání. Ze zdroje, kterým je výstup jednomodového optického vlákna, vychází gaussovský svazek modu TEM_{00} o vlnové délce 660 nm. V místě výstupu z vlákna má gaussovský svazek waist $w(z=0) = 2,5 \mu\text{m}$. Rozměr waistu odpovídá poloměru jádra vlákna. Vláknko je umístěno v ohnisku plankonvexní transformační čočky s ohniskovou vzdáleností $f = 150 \text{ mm}$. Gaussovský svazek je transformován plankonvexní čočkou, v jejímž ohnisku má waist $w(z=300 \text{ mm}) = 12,5 \text{ mm}$. Za čočkou se šíří gaussovský svazek ovlivněný otvorovou vadou čočky a dopadá na OK-filtr, který je omezený kruhovým otvorem o poloměru $\rho_0 = 25 \text{ mm}$. Za OK-filtrem pozorujeme Fresnelovy difrakční jevy charakteristické nulovou intenzitou podél dvou na sebe kolmých přímek a zjemněním v centrální části difrakčního obrazce. Na obr. 7 je zachycen charakteristický tvar zjemnělého Fresnelova difrakčního obrazce ovlivněného kruhovým omezením filtru a otvorovou vadou čočky. Snímek byl exponován ve vzdálenosti 100 m od OK-filtru.



Obr. 7: Fresnelova difrakce na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem o poloměru 25 mm. Osvětlující vlna je rovinná s gaussovským rozložením intenzity ovlivněná otvorovou vadou čočky a vlnové délky 660 nm. Snímek byl exponován ve vzdálenosti 100 m a odpovídá 10 propuštěným Fresnelovým zónám

3.3.2 Chyba vytyčení přímky

Střed difrakčního obrazce na obr. 7 lze stanovit s chybou 5 % rozteče centrálních maxim intenzit zjemnění. Rozteč je 5 mm. V případě NK-filtru osvětleného rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity je tato rozteč 14 mm [1], takže došlo k přibližně trojnásobnému zmenšení rozteče. Střed difrakčního obrazce lze tedy stanovit s chybou 0,25 mm a 0,7 mm na vzdálenosti 100 m. V úhlových jednotkách jde o chybu 0,5'' a 1,4''.

Tab. 2 uvádí teoretické hodnoty chyby ve stanovení středu difrakčního obrazce při použití NK-filtru osvětleného rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity, OK-filtru omezeného kruhovým otvorem poloměru 25 mm osvětleného touž vlnou a OK-filtru omezeného kruhovým otvorem o poloměru 25 mm osvětleného rovinnou vlnou s gaussovským rozložením intenzity ovlivněnou otvorovou vadou čočky. Vlnová délka byla 660 nm. Rozteče prvních maxim u difrakce na OK-filtru osvětleném vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity byly odečteny z průběhu intenzity získané výpočtem vztahu (1), v případě gaussovského svazku byly odečteny z fotografií.

Tabulka 2: Porovnání teoretických hodnot chyb ve stanovení středu difrakčního obrazce při použití NK-filtru, OK-filtru a dvou typů osvětlovací vlny

vzdálenost z [m]	počet zón n	$\Delta x_I = \Delta y_I$ [mm]	$\Delta x_{II} = \Delta y_{II}$ [mm]	$\Delta x_{III} = \Delta y_{III}$ [mm]
20	48	0,31	0,018	0,025
40	24	0,44	0,035	0,1
60	16	0,53	0,053	0,15
80	12	0,62	0,064	0,19
100	10	0,69	0,083	0,25

$\Delta x_I = \Delta y_I$: chyba pro Fresnelovu difrakci na NK-filtru osvětleném rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity, $\lambda = 660$ nm

$\Delta x_{II} = \Delta y_{II}$: chyba pro Fresnelovu difrakci na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem o poloměru 25 mm osvětleném rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity, $\lambda = 660$ nm

$\Delta x_{III} = \Delta y_{III}$: chyba pro Fresnelovu difrakci na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem o poloměru 25 mm osvětleném rovinnou vlnou s gaussovským rozložením intenzity a ovlivněnou otvorovou vadou čočky, $\lambda = 660$ nm

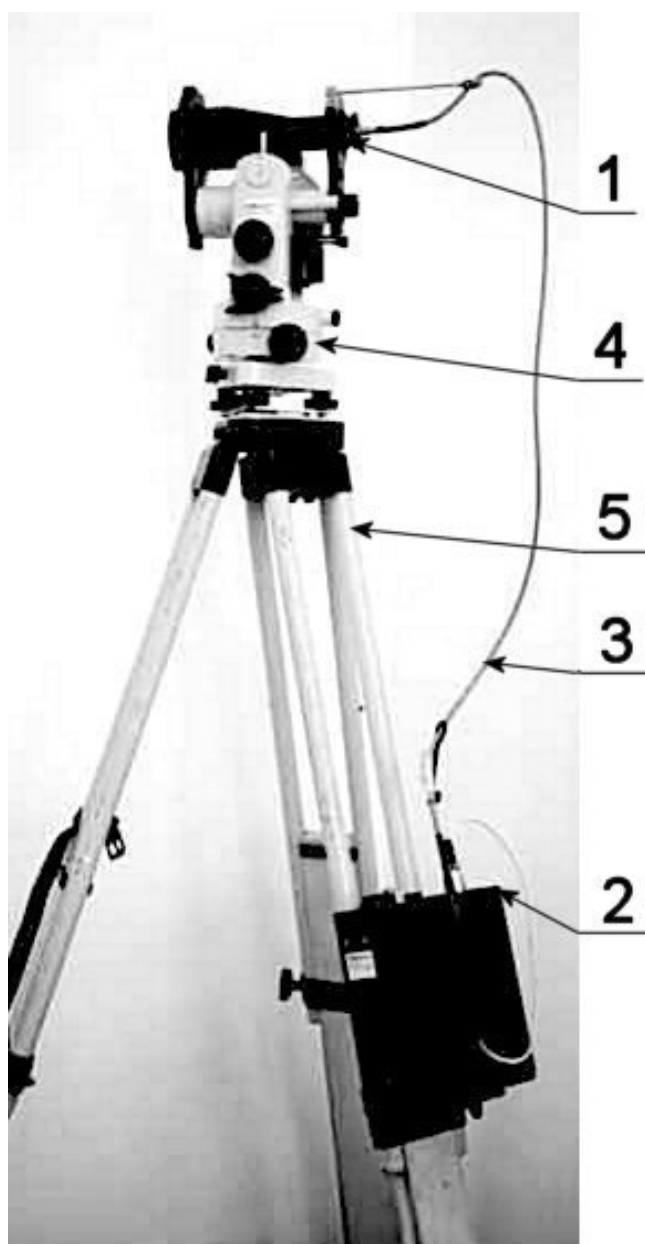
Hodnoty chyb $\Delta x_{II} = \Delta y_{II}$ jsou pro velký počet propuštěných Fresnelových zón řádově menší než chyby při použití NK-filtru. Jsou výrazně menší než hodnoty dosahované jinými metodami. V úhlových jednotkách má chyba pro NK-filtr hodnotu kolem 2'', pro OK-filtr 0,2''. Z tabulky je zřejmé, že otvorová vada čočky způsobila asi trojnásobné zvětšení hodnot chyb $\Delta x_{III} = \Delta y_{III}$ ve srovnání s chybami

$\Delta x_{II} = \Delta y_{II}$. Hodnoty chyb $\Delta x_{III} = \Delta y_{III}$ jsou však stále přibližně trojnásobně nižší v porovnání s NK-filtrem.

4 PŘÍSTROJ PRO VYTYČOVÁNÍ PŘÍMEK

4.1 POPIS PŘÍSTROJE

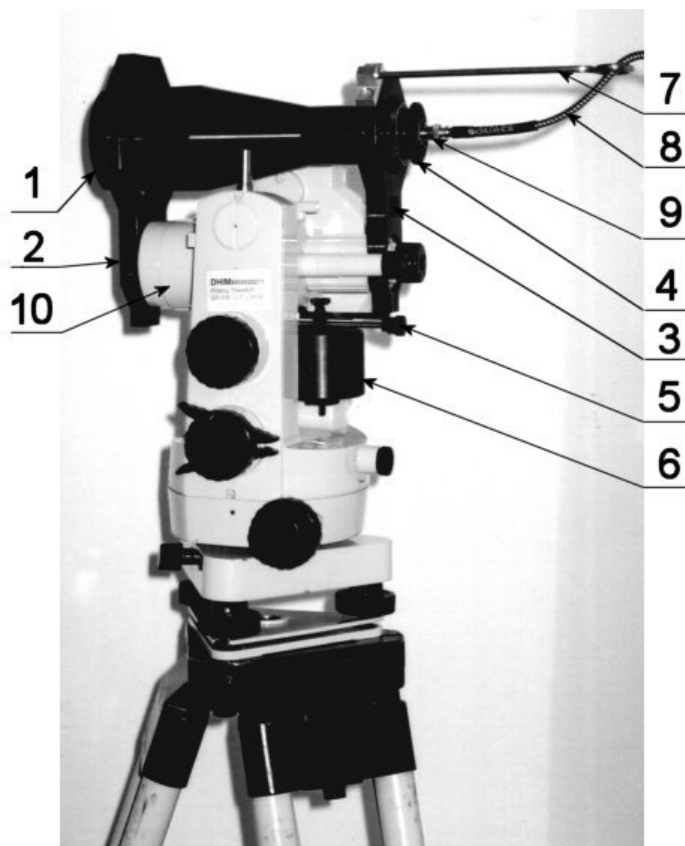
Přístroj se skládá z laserového nástavce (1 obr. 8), z něhož vystupuje svazek o poloměru 25 mm, vlnové délky 660 nm a výkonu $P = 10 \text{ mW}$. Laserový nástavec (1 obr. 8) je vhodně připevněný na dalekohled teodolitu ZEISS-010A (4 obr. 8). Zdrojem záření je laserový modul iFLEX 600 připevněný ke zdroji napájení (2 obr. 8). Jde o laserovou diodu vyvázanou do jednomodového optického vlákna



Obr. 8: Přístroj pro vytyčování přímek

(3 obr. 8) s průměrem jádra 5 μm a délky 1,5 m. Napájení laserové diody zajišťuje poměrně lehký zdroj (2 obr. 8) s hermeticky uzavřeným olověným akumulátorem o svorkovém napětí 6V, který je umístěn na noze stativu (5 obr. 8). Umožňuje nepřetržitý provoz laseru po dobu minimálně 12 hodin.

Na obr. 9 je detailní pohled na přístroj z boku. Tubus laserového nástavce (1 obr. 9) je staticky určitě uchycen v přední svěrné stojně (2 obr. 9) a zadní svěrné stojně (3 obr. 9) prostřednictvím justážního mechanismu tvořeného třemi proti sobě orientovanými stavěcími šrouby. Upevnění přední svěrné stojny (2 obr. 9) a zadní svěrné stojny (3 obr. 9) na upínacích plochách dalekohledu teodolitu je dosaženo prostřednictvím svěrného spojení. Stojiny současně slouží k zajištění správné polohy tubusu (1 obr. 9) vzhledem k dalekohledu teodolitu (10 obr. 9). Ve stojinách jsou vyfrézovány otvory umožňující průhled pro hrubé zacílování teodolitu. V tubusu (1 obr. 9) je optický systém laserového nástavce, který tvoří výstup jednomodového optického vlákna realizovaný FC konektorem (9 obr. 9), plankonvexní transformační čočka s ohniskovou vzdáleností 150 mm a OK-filtr o poloměru 25 mm. Výstup vlákna (9 obr. 9) je zdrojem laserového záření s gaussovským rozložením intenzity základního modu TEM_{00} . Výstup vlákna (9 obr. 9) je umístěn do ohniska plankonvexní transformační čočky pomocí pohybového šroubu (4 obr. 9) s protikusem pro FC konektor. Za čočkou se šíří gaussovský svazek ovlivněný otvorovou vadou čočky, který dopadá na OK-filtr omezený kruhovým otvorem



Obr. 9: Detailní pohled na přístroj pro vytyčování přímek

o poloměru 25 mm. Za ním pozorujeme velmi jemné Fresnelovy difrakční jevy s nulovou intenzitou podél dvou na sebe kolmých přímek (viz obr. 7).

Protizávaží (6 obr. 9) o hmotnosti 600 g zabraňuje samovolnému překlopení přístroje kolem osy dalekohledu teodolitu (10 obr. 9). Je zavěšeno na nosníku (5 obr. 9), který umožňuje nastavit správnou polohu závaží v horizontálním i vertikálním směru. Vlákno (8 obr. 9) je odkloněno od okuláru dalekohledu teodolitu (10 obr. 9) závitovou tyčkou s očkem (7 obr. 9).

Fresnelův difrakční obrazec je v místě dopadu, např. na záměrný bílý terč, dobře patrný dalekohledem teodolitu v širokém rozsahu vzdáleností. Ve dne ho lze při mírně zatažené obloze pozorovat dalekohledem až do vzdálenosti 500 m, v noci prakticky až na horizont. Ve dne je vzdálenost pozorování dána viditelností prvních maxim Fresnelova difrakčního obrazce. Z výše uvedeného důvodu není potřeba přesně seřizovat nástavec s dalekohledem teodolitu, neboť zaměřování lze provádět přes dobře viditelný tenký tmavý kříž ve Fresnelově difrakčním obrazci, který je jemnější než záměrná osnova dalekohledu teodolitu. Difrakční obrazec má ve všech vzdálenostech poměrně velkou plochu a při pohledu např. na záměrný terč nemůže difúzně odražené laserové záření poškodit zrak.

4.2 CHYBA VYTYČENÍ PŘÍMKY

Ve spolupráci s Ústavem geodézie FAST VUT v Brně proběhla řada testovacích měření přístroje. Měření probíhala ve spolupráci s Ing. Jiřím Vondrákem, Ph.D. Získaná data jsou statisticky zpracována v práci [16] a v článkách [18, 29].

Nejdůležitější měření se týkalo vytyčování přímek. Metodika je podrobně popsána v článku [18, 29]. Testování probíhalo ve dne až do vzdálenosti 500 m, v noci až do vzdálenosti 1000 m a v podzemní prostře do vzdálenosti 60 m.

Metodika spočívala v postavení záměrného terče ve vybraných vzdálenostech. Sledovali jsme chování difrakčního obrazce po dobu 20 minut a v intervalu jedné minuty se zaznamenávala poloha průsečíku přímek nulové intenzity vpichem do papíru terče. Po ukončení testu na konkrétní vzdálenosti byl papírový terč vyměněn za nový. Souřadnice vpichů se odměřily pomocí tzv. vynášecích trojúhelníků s přesností 0,1 mm. Výsledkem jsou střední chyby m_x , m_y ve stanovení polohy středu difrakčního obrazce pro různé vzdálenosti a podmínky uvedené v tab. 3.

Tab. 3 [18]: Střední chyby m_x , m_y ve stanovení polohy středu difrakčního obrazce pro různé vzdálenosti a podmínky

vzdálenost z [m]	Teoretický odhad z [1] $\Delta x^I = \Delta y^I$ [mm]	m_x [mm] volný terén	m_y [mm] volný terén	m_x [mm] podzemí	m_y [mm] podzemí	Pozn.
50	0,50	0,77	1,22	0,36*	0,46*	*60m
100	0,70	1,24	1,76	-	-	
500	1,50	1,77	12,48	-	-	
1000	2,20	2,30*	9,11*	-	-	* noc

Z tabulky je zřejmé, že v horizontálním směru roste chyba s délkou zvolna a je srovnatelná s teoretickými předpoklady pro NK-filtr. Ve směru vertikálním je převyšuje o jeden řád.

V porovnání s teoretickými chybami na OK-filtru (tab. 1 a 2) jsou naměřené chyby několikanásobně větší. Lze to vysvětlit vlivem atmosféry, kdy měření ve volném terénu probíhala v průběhu celého dne, tj. i v podmínkách krajně nepříznivých pro geodetická měření. Nestability v atmosféře způsobují chvění difrakčního obrazce, přičemž výchylky jsou podstatné vzhledem k rozměrům zjemnění v centrální části. V poměrně klidné atmosféře podzemní prostory je naměřená chyba asi dvojnásobná ve srovnání s teoretickou chybou (tab. 2). Pravděpodobně je to způsobeno nemožností uzavřít vchod do podzemní prostory a zamezit tak vlivu okolní atmosféry na měření s přístrojem, který jsme umístili asi 25 m od vchodu.

Další experimenty s přístrojem jsou popsány v práci [16]. Jde především o testování přístroje při proměřování přímosti kolejnice a při signalizaci nepřístupného bodu pro protínání vpřed. V obou úlohách je chyba metody s přístrojem srovnatelná s chybou současných metod. V úloze proměření přímosti kolejnice vyhovuje difrakční metoda mezinárodní normě ISO 8306 pro proměřování jeřábových drah [16].

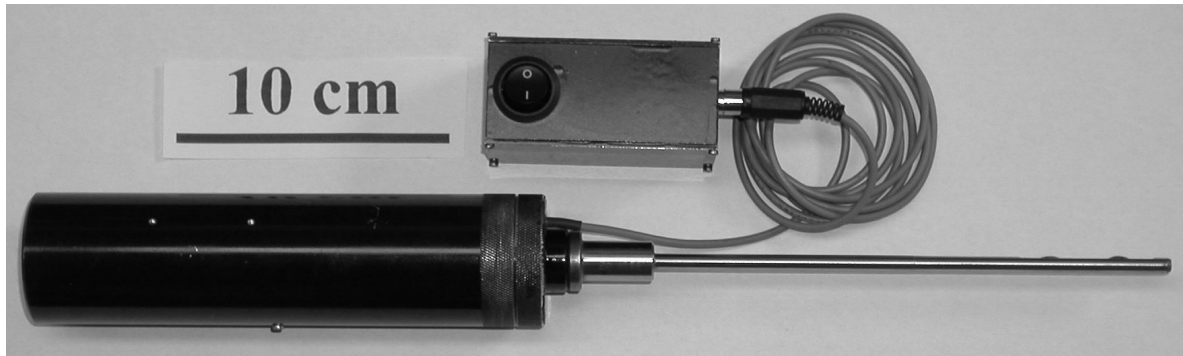
5 PŘÍSTROJ KE STANOVENÍ ZÁMĚRNÉHO BODU HLAVNĚ

5.1 POPIS PŘÍSTROJE

Ke stanovení záměrného bodu hlavně se doposud používá dalekohledová metoda. Dalekohled má malé zvětšení a je pevně připevněn k trnu, který se vsune do ústí hlavně. Pro každou ráži je nutné mít samostatný úst'ový dalekohled pevně připevněný k trnu. Měřič pozoruje přes poměrně hrubý záměrný kříž dalekohledu úst'ového zaměřovače, kam hlaveň pevně uchycené zbraně míří a navádí pomocníka, který v cíli (terči) tento bod označí např. fixem. Nesouhlas mechanické osy úst'ového zaměřovače s optickou osou je $\pm 3,6'$, což je přibližně ± 100 mm na vzdálenosti 100 m. Jde o chybu poměrně značnou a je v povolených mezích.

Difrakční metodou lze stanovit tento bod v laboratorních podmínkách s teoretickou chybou 0,25 mm na 100 m, v nepříznivém prostředí volné atmosféry s chybou do 2 mm na 100 m (viz tab. 2 a 3). Nejspornější na metodě je použití trnu, který vykazuje jisté vůle v hlavni, což se na vzdálenosti 100 m projevuje odchylkami v řádu centimetrů. Ústí hlavně je však pro měření důležité, neboť rozhoduje o směru letu střely. Přístroj lze také využít k ustavení zbraní, které jsou součástí letadel a bojových vozidel.

Přístroj je na obr. 10. Má tvar válce o průměru 46 mm, délku bez trnu 188 mm a hmotnost 370 g. Konstrukce umožňuje seřízení osy laserového svazku s geometrickou osou tubusu. Trny jsou vyměnitelné. Seřízení zaměřovače se provádí s příslušným trnem v přípravku. Spočívá v otáčení zaměřovačem o 360°



Obr. 10: Příklad přístroje ke stanovení záměrného bodu hlavně

a v seřizování osy svazku vzhledem k ose trnu tak dlouho, dokud střed Fresnelova difrakčního obrazce neopisuje ve vzdálenosti 100 m kroužek o dostatečně malém průměru.

Průměr optiky zaměřovače je 21 mm. Umožňuje jeho použití do vzdálenosti 200 m. Je externě napájen dvěma tužkovými bateriemi, které zajišťují kontinuální provoz laseru nejméně po dobu 20 h. Optický systém umístěný v tubusu zaměřovače je obdobný jako u přístroje pro vytyčování přímek. Zdrojem laserového záření je vláknový diodový laserový modul FMXL-112 00 s výstupním výkonem gaussovského svazku $P = 5 \text{ mW}$. Svazek má základní mod TEM_{00} a vlnovou délku 635 nm. Fresnelovy difrakční obrazce jsou v místě dopadu (např. na bílý záměrný terč) dobře viditelné za denního světla i ve vzdálenosti 100 m a tmavý jemný kříž lze dobře pozorovat dalekohledem s 20 násobným zvětšením.

5.2 CHYBA STANOVENÍ ZÁMĚRNÉHO BODU HLAVNĚ

Pozorované Fresnelovy difrakční jevy jsou podobné jako u přístroje pro vytyčování přímek. Fresnelův difrakční obrazec na obr. 7 lze pozorovat zhruba v poloviční vzdálenosti, tj. 50 m od zaměřovače. Ve vzdálenosti 100 m je jeho velikost přibližně dvojnásobná. Měřením z negativů Fresnelových difrakčních obrazců má teoretická chyba ve stanovení středu difrakčního obrazce hodnotu v úhlových jednotkách $0,8''$ a je řádově menší než povolená chyba, která má hodnotu $3,6'$.

6 ZÁVĚR

Laserové metody vytyčování přímek procházejí intenzivním rozvojem. V disertační práci podrobně seznamuji s jejich vývojem, principy a porovnávám chyby jednotlivých metod. Zvláštní pozornost věnuji difrakčním metodám, které vykazují nejmenší chybu měření.

Zaměřuji se na využití známé Fresnelovy difrakce na NK-filtru tvořeném kvadranty s touž amplitudovou propustností, avšak posouvající fázi tak, že posuv fáze způsobený sousedními kvadranty se liší o π . Fresnelův difrakční obrazec je

velmi kontrastní, v různých vzdálenostech od NK-filtru se liší pouze měřítkem, rozložení intenzity má čtyřčetnou a zrcadlovou symetrii a přímky nulové intenzity, které vytváří temný kříž, jsou viditelné v jakékoli vzdálenosti od NK-filtru.

Využil jsem toho, že omezení K-filtru zjemňuje strukturu centrální části Fresnelovy difrakce a střed difrakčního obrazce lze tudíž stanovit s menší chybou. Zkonstruoval jsem dva přístroje, které umožňují měřit zjemněnými difrakčními jevy v řadě dalších aplikací.

Jádrem práce jsou tři metody zjemnění struktury centrální části Fresnelova difrakčního obrazce, které jsou založeny na použití

- (i) OK-filtru omezeného úzkým propustným mezikružím umístěným do ohniska transformační čočky, na osvětlující vlně OK-filtru nezáleží,
- (ii) OK-filtru omezeného kruhovým otvorem osvětleném vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity,
- (iii) OK-filtru omezeném kruhovým otvorem osvětleném vlnou s gaussovským rozložením intenzity, která je ovlivněna otvorovou vadou čočky.

První metoda spočívá v centrickém vložení NK-filtru do optické soustavy určené k vytvoření besselovského svazku. Chyba metody je velmi malá a může dosahovat hodnoty $0,1''$, která je řádově menší než u současných metod.

Největší důraz však kladu na poslední dvě metody, kde vliv prostého omezení K-filtru kruhovým otvorem je tak podstatný, že chyba metody je řádově menší než při použití NK-filtru. Pro OK-filtr omezený kruhovým otvorem osvětlený rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity má chyba hodnotu $0,2''$, pro OK-filtr omezený kruhovým otvorem osvětlený rovinnou vlnou s gaussovským rozložením intenzity ovlivněnou otvorovou vadou čočky má chyba hodnotu $0,5''$.

Fresnelovy difrakční jevy jsem testoval ve volné atmosféře a v laboratorních podmínkách. Zjemnělé Fresnelovy difrakční jevy jsou využitelné zejména v prostorách se stabilní atmosférou jakými jsou např. výrobní haly, důlní šachty, tunely, podzemní stělnice apod. Výhodných vlastností zjemnělých Fresnelových difrakčních jevů nelze využít v podmínkách volné atmosféry, kdy výchylky Fresnelova difrakčního obrazce způsobené nehomogenitou atmosféry jsou podstatné vzhledem k rozměrům zjemnění v jeho centrální části. V tomto případě je chyba metody srovnatelná se současnými metodami a má hodnotu kolem $2''$.

V práci uvádím vztahy pro výpočet rozložení intenzity ve zjemnělé Fresnelově difrakci na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem osvětleném rovinnou vlnou s rovnoměrným rozložením intenzity [31]. Porovnávám vypočtené rozložení intenzity ve Fresnelových difrakčních jevech s rozložením intenzity těchto jevů zachycených na fotografii. Prokazují shodu výpočtu s experimentem.

Navrhl a sestavil jsem dva přístroje, jejichž konstrukci podrobně popisují. Využívají Fresnelovy difrakce na OK-filtru omezeném kruhovým otvorem osvětleném rovinnou vlnou s gaussovským rozložením intenzity ovlivněnou otvorovou vadou čočky. Jde o přístroj zejména k vytyčování přímek a o přístroj ke

stanovení záměrného bodu hlavně. Přístroj zejména k vytyčování přímek jsem navíc testoval ve spolupráci s Ing. Jiřím Vondrákem, Ph.D., z Ústavu geodézie fakulty stavební VUT v Brně v aplikaci signalizace nepřístupného bodu pro protínání vpřed a proměření přímosti kolejnice, kde vyhovuje mezinárodní normě ISO 8306 pro proměřování jeřábových drah [16].

Oba přístroje jsem ochránil užitným vzorem MPT: G 01 C 11/32 a přihláškou vynálezu 2002-2011.

LITERATURA

- [1] Komrska J., Kotačka L. Difrakce světla na filtru s propustností $t(x_0, y_0) = \text{sgn}(x_0)\text{sgn}(y_0)$. *Jemná mechanika a optika*, 1998, roč. 43, s. 107 – 110.
- [2] Betz H. D. An Asymmetry Method for High Precision Alignment with Laser Light. *Applied Optics*, 1969, vol. 8, p. 1007 – 1013.
- [3] Liška M., Boček V. Laserový difrakční zaměřovač. *Geodetický a kartografický obzor*, 1976, roč. 22, s. 343 – 349.
- [4] Van Heel A. C. S. Alignment. In *Advanced Optical Technics*. Amsterdam: North Holland Publ. Co., A. C. S. van Heel, ed. , 1967, p. 449 – 463.
- [5] Van Heel A. C. S. Modern Alignment Devices. In *Progress in Optics*. Amsterdam: North Holland Publ. Co., E. Wolf, ed., 1964, vol. I, p. 289 – 329.
- [6] Kastler A. Un système de franges de diffraction à grand contrast. *Revue d'optique*, 1950, t. 29, p. 307 – 314.
- [7] Čada V., Kašpar M., Pospíšil J. Difrakční mřížky pro transformaci laserového svazku. *Acta Polytechnica*, 1985, roč. 12, s. 69 – 85.
- [8] Kutík M. Přesná směrová měření s laserem. *Jemná mechanika a optika*, 1978, roč. 33, s. 275 – 279.
- [9] Kašpar M., Liška M., Boček V. Využití difrakce laserového svazku v metodě záměrné přímky. *Acta Polytechnica*, 1978, roč. 6, s. 5 – 24.
- [10] Herrmannsfeldt W. B. et al. Precision Alignment Using a System of Large Rectangular Fresnel Lenses. *Applied Optics*, 1968, vol. 7, p. 995 – 1006.
- [11] Ojeda-Castañeda J., Andrés P., Martínez – Corral M. Zero Axial Irradiance by Angular Screen with Angular Variation. *Applied Optics*, 1992, vol. 31, p. 4600 – 4602.
- [12] Durnin J., Miceli J. J., Eberly J. H. Diffraction-Free Beams. *Physical Review Letters*, 1987, vol. 58, p. 1499 – 1501.
- [13] Herman R. M., Wiggins T. A. Production and Uses of Diffractionless Beams. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, vol. 8, p. 932 – 942.
- [14] Liška M., Liška I. Využití laserové techniky v inženýrské geodézii. *Český výbor společnosti geodézie a kartografie*, Praha, 1985, s. 96 - 102.
- [15] Velechovský K. *Vytyčování přímek pomocí Fresnelovy difrakce. Část 1: Studium difrakčního jevu*. Brno, 1999. Diplomová práce na Fakultě strojního

- inženýrství na Ústavu fyzikálního inženýrství VUT. Vedoucí diplomové práce Prof. RNDr. Jiří Komrska, CSc.
- [16] Vondrák J. *Laserová měření využívající zrcadlově symetrie Fresnelovy difrakce*. Brno, 2001. Doktorská disertační práce na Ústavu geodézie na Fakultě Stavební VUT. Vedoucí disertační práce Doc. RNDr. Miloslav Švec, CSc.
- [17] Bouasse H., Carrière Z. *Diffraction*. Paris : Librairie Delagrave, 1923, p. 287–293.
- [18] Velechovský K., Vondrák J. Využití Fresnelovy difrakce pro vytyčování přímek. In *3. odborný seminář doktorského studia, 4. geodézie a kartografie, Brno 21. února 2001*. Ed. Moudrý I. et al. Brno : Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství, 2001, s. 71 – 74. ISSN 1212 – 9275.
- [19] Komrska J. *Difrakce světla*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2001. ISBN 80-214-1976-8.
- [20] Wagner J., Bouchal Z. Experimental realization of self-reconstruction of the 2D aperiodic objects. *Optics communications*, 2000, vol. 176, p. 309 – 311.
- [21] Wolter H. Die Minimumstrahlkennzeichnung als Mittel zur Genauigkeitssteigerung optischer Messungen und als methodisches Hilfsmittel zum Ersatz des Strahlbegriffes. *Annalen der Physik*, 1950, bd. 7, s. 341-368.
- [22] Talbot H. F. An Experiment of the Interference of Light. *Philosophical Magazine*, 1837, vol. 10, p. 364.
- [23] Straubel R. Zwei allgemeine Sätze über Fraunhofer'sche Beugungserscheinungen. *Annalen der Physik*, 1895, Bd. 56, S. 746-761.
- [24] Zernike F. Degré de cohérence et méthode du fond cohérent. *Revue d'Optique*, 1948, t. 27, p. 713-719.
- [25] Komrska J. Intensity and phase in Fresnel diffraction by a plane screen consisting of parallel strips. *Optica Acta*, 1967, vol. 14, p. 127-146.
- [26] Hao Q., Li D., Wang Y. High-accuracy long distance alignment using single-mode optical fiber and phase plate. *Optics and Laser Technology*, 2002, vol. 34, p. 287-292.
- [27] Overfelt P. L., Kenney C. S. Comparison of the propagation characteristics of Bessel, Bessel-Gauss and Gaussian beams diffracted by a circular aperture. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1991, vol. 8, p. 732-744.
- [28] Burch J. M., Williams D. C. Varifocal moiré zone plates for straightness measurement. *Applied Optics*, 1977, vol. 16, p. 2445 – 2450.
- [29] Vondrák J.: Vytyčování přímek pomocí zrcadlově symetrické Fresnelovy difrakce. *Stavební obzor*, 2002, roč. 11, s. 212 – 214.
- [30] Arlt J., Dholakia K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon. *Optics Communications*, 2000, vol. 177, p. 297-301.

- [31] Velechovský K., Komrska J. Využití Fresnelovy difrakce s nulovou intenzitou ve dvou na sebe kolmých směrech k vytyčování přímek. *Jemná mechanika a optika*, 2003, roč. 48, s. 186-192.

SUMMARY

Laser methods used for straight-line alignment are undergoing an intensive development. The doctoral thesis describes in detail their development, principles and compares the measuring errors of individual methods. A special attention is paid to diffraction methods with the smallest measuring error.

I have concentrated on exploiting the known Fresnel diffraction by the NK-filter¹ made up of quadrants of identical amplitude transmissivity, however shifting the phase in such a way that the phase shift caused by adjacent quadrants differs by π . The Fresnel diffraction pattern has a very high contrast, differs at various distances from the NK-filter only by its scale, its intensity distribution has fourfold enantiomorphic symmetry and zero intensity lines forming a dark cross visible at any distance from the NK-filter.

I have exploited the fact that a limitation of the K-filter² refines the structure at the centre of the Fresnel diffraction pattern and thus the centre of the diffraction pattern can be determined with a smaller error. I have designed two devices that enable to carry out the measurement in a number of other applications by means of refined diffraction phenomena.

The thesis is focused on three methods of refining the structure at the center of Fresnel diffraction pattern, which are based on usage of

- (i) OK-filter³ limited by a narrow transmissive annulus located in the focus of a transformation lens, no matter what type of illuminating wave is applied,
- (ii) OK-filter limited by a circular aperture illuminated by a uniform intensity distribution wave,
- (iii) OK-filter limited by a circular aperture illuminated by a Gaussian intensity distribution wave, which is affected by the spherical aberration of the lens.

The first method consists in centric incorporation of the NK-filter into the optical system designed to produce the Bessel beam. The error of this method is very small and can reach the value of $0,1''$, which is less by an order than in the case of applying standard methods.

However, the greatest emphasis is laid on the last two methods, where the influence of a simple limitation of the K-filter by a circular aperture is so substantial that the error of the method is smaller nearly by an order as compared with the NK-filter. The OK-filter limited by a circular aperture illuminated by a plane wave

¹ NK-filter: unlimited phase quadrantal filter

² K-filter: phase quadrantal filter in general

³ OK-filter: phase quadrantal filter limited by an aperture

with uniform intensity distribution has an error of $0,2''$, while the OK-filter limited by a circular aperture illuminated by a plane wave with Gaussian intensity distribution influenced by spherical aberration of the lens yields an error of $0,5''$.

Fresnel diffraction phenomena have been tested both in free atmosphere and in laboratory conditions. Refined Fresnel diffraction phenomena can be exploited especially in spaces with a stable atmosphere, such as production shops, mines, tunnels, underground shooting ranges, etc. Advantageous properties of refined Fresnel diffraction phenomena cannot be implemented in the conditions of free atmosphere, as the aberrations of the Fresnel diffraction pattern caused by inhomogeneity of the atmosphere are substantial with regard to the dimensions of refinement in its central part. In this case, the error of the method is comparable with standard methods and has the value of approximately $2''$.

The thesis includes the expressions for calculating intensity distribution in the refined Fresnel diffraction by the OK-filter limited by a circular aperture illuminated by a plane wave with uniform intensity distribution [31]. I have compared the calculated intensity distribution in Fresnel diffraction phenomena with the intensity distribution of these phenomena shown in photographs. The agreement of calculations with experiments has been proved.

I have designed two devices, whose design is described in detail. They utilize Fresnel diffraction by the OK-filter limited by a circular aperture illuminated by a plane wave with Gaussian intensity distribution influenced by spherical aberration of the lens. The first is a device used particularly for straight-line alignment, the other is a device for determining the sighting point of a barrel. The device used particularly for straight-line alignment was tested in collaboration with Ing. Jiří Vondrák, Ph.D., from the Department of Geodesy at the Faculty of Civil Engineering, Brno Technical University in the application for signaling of an inaccessible point for forward intersection and for measuring rail straightness, which meet the International Standard ISO 8306 for measuring crane runways [16].

Both devices are protected by the utility model MPT: G 01 C 11/32.

ŽIVOTOPIS

Narodil jsem se 27. května 1976 v Mladé Boleslavi. V roce 1990 jsem zahájil studium na SPŠ Strojnické v Chrudimi. Studium jsem ukončil maturitou s vyznamenáním v roce 1994. Roku 1994 jsem zahájil inženýrské studium na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. V roce 1996 jsem začal studovat francouzštinu na škole francouzského jazyka a kultury Alliance Française v Brně. V roce 1997 jsem byl přijat na obor Přesná mechanika a optika na Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. V roce 1999 jsem byl pod vedením Prof. RNDr. Jiřího Komrsky, CSc., spoluřešitelem grantu FRVŠ 1111/1999, tematický okruh G1 „Vytyčování přímek pomocí Fresnelovy difrakce“, který jsem v závěru roku 1999 obhájil s hodnocením „splněno výborně“. Inženýrské studium jsem zakončil v roce 1999 obhajobou diplomové práce na téma „Vytyčování přímek

pomocí Fresnelovy difrakce. Část 1: Studium difrakčního jevu.“ s hodnocením „výborně“.

V roce 1999 jsem byl přijat do doktorského studia na obor „Fyzikální a materiálové inženýrství“ na Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty Strojního inženýrství VUT v Brně. Mým školitelem byl Prof. RNDr. Jiří Komrška, CSc. Zabýval jsem se tématem „Vytyčování přímek využitím Fresnelovy difrakce“. V roce 2001 jsem vykonal zkoušky z francouzštiny na Alliance Française v Brně a obdržel jsem diplom DELF 1 a DELF 2 (Diplôme d'Études en Langue Française).

V průběhu doktorského studia jsem se zabýval možnostmi využití Fresnelovy difrakce v geodézii a ve strojírenství. Spolupracoval jsem s Ústavem geodézie Fakulty stavební VUT v Brně, se společností Prototypa, a. s., v Brně zabývající se vývojem a zkoušením zbraní a střeliva a se společností Steinbauer, s. r. o., v Praze na testování odolného K-filtru. Zkonstruoval jsem a sestavil přístroj zejména pro vytyčování přímek a přístroj ke stanovení záměrného bodu hlavně. Oba přístroje jsem ochránil v roce 2002 užitným vzorem MPT: G 01 C 11/32 a rovněž jsem podal přihlášku vynálezu 2002-2011. Doktorské studium jsem ukončil dne 5. května 2004 obhájením disertace.

Od roku 2003 jsem zaměstnán jako technik na Ústavu fyzikálního inženýrství Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Jsem autorem, resp. spoluautorem prací [15], [18] a [31] seznamu na str. 25 - 26.

Lze mne kontaktovat na adrese ÚFI FSI VUT, Technická 2, 616 69 Brno, telefonem 5 4114 2782 a elektronickou poštou na adrese velechovsky@email.cz.

V Brně dne 3. června 2004

Karel Velechovský