

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební
Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

Ing. Jiří Novák, Ph.D.

Gradientní metody vyhodnocování fáze vlnového pole v optice

Gradient methods for evaluation of phase of wave field in optics

Praha 2007

Summary

The problem of research and development of methods for phase analysis of electromagnetic wave fields in optics is paid a big attention in the long term in research centres all around the world, because it has a fundamental importance to many areas of science and engineering, both in the theoretical and experimental field. Many results can be used in various applications, e.g. for different measuring and diagnostic noninvasive methods in optical industrial metrology, biomedical engineering, mechanical engineering, applied physics, adaptive optics, etc. It is possible to apply various principles of phase evaluation in practice. However, every technique has its advantages and disadvantages that affect its practical applications. At present several types of methods exist that enable to obtain quantitative phase information about the investigated electromagnetic wave field in optical spectra by measuring the intensity of the wave field. The phase evaluation methods are based on three main principles: two-beam or multiple-beam interference, phase retrieval using equations for propagation of the wave field, and phase evaluation from measured values of the phase gradient.

The presentation is focused on the problem of phase retrieval on the basis of experimental measurements of phase gradient. Possibilities of practical applications are described, especially in optical industrial metrology. The first part deals generally with problems of phase retrieval techniques and it is given an overview of present methods for solving the phase retrieval problem. The main part is then focused on possibilities of gradient techniques for phase retrieval, especially on a detailed analysis and practical application of the Shack-Hartmann method for determination of phase changes of investigated wave fields. The work describes a measuring system that uses a microlens array sensor that was proposed, designed and fabricated for the production quality control of optical systems in optical industry. The measuring device together with elaborated software was verified practically in Meopta Optika, s.r.o. Nowadays, the mentioned system is used for testing of optical systems in optical production in Meopta. The proposed measuring system can be also applied for other practical tasks in optical industrial metrology.

Souhrn

Výzkumu a vývoji metod analýzy fáze elektromagnetických vlnových polí v optice je ve světě dlouhodobě věnována značná pozornost, neboť se jedná o velmi důležitou problematiku, jež má zásadní význam v celé řadě oblastí vědy a techniky, a to jak v teoretické tak v experimentální oblasti. Mnohé výsledky a metody se dají využít pro praktické aplikace, např. pro zobrazovací a diagnostické neinvazivní metody v oblasti optické metrologie v průmyslu, biomedicínského inženýrství, strojírenství, aplikované fyziky, adaptivní optiky, apod. Pro vyhodnocování fáze lze využít mnoha odlišných přístupů, nicméně každý z těchto přístupů má vždy své výhody a nevýhody, jež ovlivňují možnost jeho praktické aplikace. V současnosti existuje několik skupin vyhodnocovacích metod, které umožňují získat kvantitativní informaci o fázi vyšetřovaného elektromagnetického vlnového pole v optické části spektra na základě měření intenzity vlnového pole. Jedná se o metody, které jsou založeny na principech dvousvazkové nebo vícesvazkové interference vlnového pole, numerické rekonstrukce fáze s využitím vztahů pro šíření elektromagnetického vlnového pole a určování gradientu fáze vlnového pole.

Prezentace se zaměřuje na problematiku metod vyhodnocování fáze vlnového pole na základě experimentálního měření složek gradientu fáze. Jsou popsány možnosti jejich praktické aplikace, zejména v oblasti optické průmyslové metrologie. V úvodní části je nejprve obecně nastíněna problematika analýzy fáze vlnového pole a je dán přehled současných metod pro řešení této problematiky. Hlavní část práce je poté zaměřena na možnosti skupiny tzv. gradientních metod pro vyhodnocování fáze, zejména na podrobnou analýzu a praktickou aplikaci Shack-Hartmannova principu pro detekci změn fáze vlnového pole. V práci je popsán měřicí systém, který využívá maticového senzoru pro vyhodnocování fáze. Tento systém byl navržen a zkonstruován pro kontrolu kvality optických soustav a prvků v optické výrobě. Měřicí zařízení spolu s vytvořeným softwarem bylo testováno ve spolupráci s firmou Meopta Optika, s.r.o. V současnosti je navržené zařízení používáno ke kontrole kvality zobrazení optických soustav v sériové výrobě v oblasti UV spektra. Navržený systém může být též využit i pro jiné úlohy v oblasti optické průmyslové metrologie.

Klíčová slova: optická metrologie, analýza fáze, fázová měření, gradientní metody, Shack-Hartmannova metoda, senzory vlnoplochy, metody fázové rekonstrukce, optická průmyslová kontrola, optické soustavy, optické povrchy, kvalita zobrazení

Keywords: optical metrology, phase analysis, phase measurement, gradient techniques, Shack-Hartmann method, wavefront sensors, phase retrieval techniques, optical testing, optical systems, optical surfaces, imaging quality

České vysoké učení technické v Praze

Název: Vybrané metody vyhodnocování fáze vlnového pole v optice

Autor: Ing. Jiří Novák, Ph.D.

Počet stran: 25

Náklad: 170 výtisků

© Jiří Novák, ISBN:

OBSAH

1. Úvod	6
2. Metody vyhodnocování fáze vlnového pole	6
2.1. Přehled metod vyhodnocování fáze	7
2.1.1. Interferometrické metody analýzy fáze vlnového pole	7
2.1.2. Analýza fáze s využitím vztahů pro šíření vlnového pole	7
2.1.3. Gradientní metody analýzy fáze vlnového pole	8
2.2. Možné aplikace vyhodnocovacích metod v praxi	8
3. Gradientní metody vyhodnocování fáze	9
3.1. Shack-Hartmannova metoda	10
3.2. Postup vyhodnocení fáze vlnového pole	12
3.3. Analýza měřicí a vyhodnocovací metody	14
3.4. Experimentální realizace metody	15
3.4.1. Maticový gradientní senzor pro vyhodnocování fáze	16
3.4.2. Senzor vlnoplochy a jeho použití v optickém průmyslu	18
4. Závěr	20
5. Literatura	21
6. Životopis	24

1. Úvod

Elektromagnetické vlnění je charakterizováno fyzikálními parametry (amplituda, fáze, frekvence a polarizační stav), které jsou při šíření vlnění prostředím ovlivňovány. Při interakci vlnového pole s prostředím a nejrůznějšími hmotnými objekty dochází obecně ke změně uvedených charakteristických parametrů, což přímo souvisí s fyzikálními a geometrickými vlastnostmi objektů a prostředí. Analýzou těchto změn lze poté kvantitativně určit fyzikální vlastnosti prostředí, kterým se vlnění šíří, resp. vlastnosti objektů, na něž vlnění dopadá nebo jimi prochází (např. tvar, deformace a strukturu povrchu resp. vnitřní strukturu měřených objektů). Nejdůležitější charakteristikou vlnového pole, která má velice široké uplatnění prakticky ve všech oblastech vědy a techniky, je *fáze vlnového pole*. Proto se problematice jejího vyhodnocování ve světě věnuje mimořádná pozornost [1-52].

Vyhodnocování fáze elektromagnetického vlnového pole je důležitým procesem, který nachází široké aplikační možnosti v nejrůznějších odvětvích vědy, techniky nebo lékařství, zejména pro měřicí a diagnostické účely. Metody analýzy fáze vlnového pole jsou založeny na různých fyzikálních jevech (např. interference, difrakce, apod.), které umožňují kvantitativně určit hodnoty tohoto parametru vlnového pole v závislosti na naměřených hodnotách intenzity. Pro optické záření je možno přímo měřit pouze intenzitu záření v určitém místě v prostoru, neboť detektory záření nejsou schopny určit fázi či frekvenci vlnového pole přímo. Vzhledem k tomu se používají nepřímé metody získání uvedených parametrů pomocí měření prostorového rozdělení intenzity. Jedná se o typ tzv. *inverzních problémů*, jejichž řešení může být z matematického hlediska dosti složité či nejednoznačné. Proto je snahou současného výzkumu v této oblasti vyvíjet nové teoretické i experimentální postupy, které by umožňovaly co nejspolehlivější a nejpraktičtější získání hledaných vlastností pole.

2. Metody vyhodnocování fáze vlnového pole

Výzkumu a vývoji metod analýzy fáze vlnového pole je ve světě dlouhodobě věnována značná pozornost, neboť se jedná o velmi důležitou problematiku, mající zásadní význam v celé řadě oblastí vědy, techniky a biomedicíny, a to jak v teoretické tak v experimentální oblasti. Mnohé výsledky, metody a postupy se dají využít pro praktické aplikace jak v oblasti technické tak i v oblasti medicínské [2,37,43,44,53-55], např. v nových koncepčních přístupech k řešení problematiky topografie a struktury ploch, analýzy energetického profilu a kvality optických svazků, analýzy nových prvků v oblasti mikro a nanotechnologií (např. při kontrole vlastností a funkčnosti MEMS, DMD), v nových diagnostických metodách analýzy optických soustav (kontrola kvality optických ploch, zobrazovacích vlastností optických soustav, tenkých vrstev a jejich systémů, vývoj nových senzorů v adaptivní optice a nových pozorovacích a zobrazovacích systémů), v oblasti optické mikroskopie (vývoj nových pozorovacích a vyhodnocovacích metod v mikroskopii, umožňující získat 3D informace o vlastnostech pozorovaného objektu, apod.) a v očním lékařství (neinvazní diagnostika očních vad a prvků oční protetiky, topografie oční rohovky, nové adaptivní optoelektronické systémy pro korekci vad zraku).

Jak již bylo řečeno, pro vyhodnocování fáze lze využít mnoha různých přístupů, nicméně je vždy nutno zvážit výhody a nevýhody, které ovlivňují možnost jejich aplikace při řešení praktických problémů. Řada metod je vhodná pouze pro určitá měření a v jiné oblasti aplikací by neposkytovala dostatečně kvalitní výsledky. Obecnou snahou výzkumu je vytvořit takové metody, které by splňovaly co nejlépe požadavky vysoké míry univerzálnosti, vysoké přesnosti a opakovatelnosti měření, velkého dynamického rozsahu, rychlosti vyhodnocení a dostatečné jednoduchosti a kompaktnosti měřicího zařízení.

2.1. Přehled metod vyhodnocování fáze

V současnosti existuje několik skupin vyhodnocovacích metod [1-53], které umožňují získat kvantitativní informaci o fázi vyšetřovaného elektromagnetického vlnového pole v optické části spektra. Jedná se o metody, které jsou založeny na principech:

- a) dvousvazkové resp. vícesvazkové interference vlnového pole,
- b) numerické rekonstrukce fáze s využitím vztahů pro šíření vlnového pole,
- c) určování složek gradientu fáze vlnového pole.

Zabývejme se nyní stručně jednotlivými skupinami metod pro vyhodnocování fáze vlnového pole. V další části se poté podrobněji zaměříme pouze na analýzu a aplikaci tzv. gradientních metod vyhodnocování fáze.

2.1.1. Interferometrické metody analýzy fáze vlnového pole

Tato široká skupina metod je založena na kvantitativním vyhodnocení fáze vlnového pole pomocí principu dvousvazkové nebo vícesvazkové interference částečně koherentních vlnových polí. Vyhodnocení probíhá analýzou zaznamenaného prostorového resp. časového rozdělení intenzity interferenčního pole, které vzniká interferencí vyšetřovaného vlnového pole a jednoho nebo více dalších (tzv. referenčních) vlnových polí. Nutnou a omezující podmínkou pro použití této metody je dostatečná koherence použitých vlnových polí. Interferometrické metody [1-4,6-28], jež jsou v současnosti nejrozšířenějším typem vyhodnocovacích metod, mohou být široce použitelné v mnoha vědeckých i průmyslových oblastech a lze s nimi za specifikovaných podmínek dosáhnout velmi vysoké přesnosti vyhodnocení fáze vlnového pole (až $\pi/500$ rad). Nevýhodou většiny interferometrických metod, která omezuje možnosti jejich použití, je vysoká citlivost na termomechanické vlastnosti měřicího prostředí (především mechanické vibrace a fluktuace indexu lomu měřicího prostředí, kterým je obvykle vzduch), zvýšené požadavky na experimentální realizaci a omezený rozsah měření. Jejich další rozvoj se proto zaměřuje především do oblasti vývoje robustních technik rekonstrukce fáze vlnového pole v reálném čase, které nejsou prakticky závislé na vlastnostech měřicího prostředí a jsou tudíž široce aplikovatelné v metodách průmyslové kontroly za běžných provozních podmínek [21-28].

2.1.2. Analýza fáze s využitím vztahů pro šíření vlnového pole

V současné době se začíná rozvíjet další směr metod pro analýzu vlnového pole a to na bázi řešení problematiky šíření vlnového pole pomocí rovnic pro transport energie v elektromagnetickém poli [29-32]. Tento typ vyhodnocovacích metod je založen na numerické rekonstrukci fáze vlnového pole z přímého měření prostorového rozdělení intenzity pomocí různých matematických metod a postupů pro řešení diferenciální rovnice transportu energie v elektromagnetickém poli. Důležitým aspektem této metody je správné určení prostorové změny intenzity šířícího se vlnového pole v různých místech prostoru. Velkou výhodou jsou relativně nízké experimentální nároky a požadavky na vlastnosti vlnového pole. Uvedené metody tohoto typu jsou sice relativně experimentálně nenáročné oproti jiným metodám, avšak metoda vyhodnocení je matematicky velmi komplikovaná a často značně náročná z hlediska výpočetního času (použití iterativních optimalizačních algoritmů). Snahou je proto v současné době navrhnout takové optimalizované vyhodnocovací algoritmy, které by zaručovaly numericky stabilní a přesnou rekonstrukci fáze a zároveň dostatečnou rychlost numerického výpočtu. V blízké budoucnosti lze očekávat, že tyto metody budou patřit k experimentálně nejsnadněji realizovatelným metodám analýzy fáze vlnového pole a budou dobře použitelné např. i v oblasti optické metrologie v průmyslové praxi.

2.1.3. Gradientní metody analýzy fáze vlnového pole

Tento typ vyhodnocovacích metod je založen na matematické rekonstrukci fáze vlnového pole z experimentálně získaných hodnot gradientu fáze na síti diskrétních bodů v prostoru [34-52]. Hodnoty derivací ve dvou různých směrech jsou určovány nepřímo měřením prostorového rozdělení intenzity vlnového pole pomocí vhodných algoritmů. V této skupině se nacházejí některé klasické metody, používané pro hodnocení tvaru optických ploch v optickém průmyslu, např. Ronchi test resp. klasická Hartmannova metoda [2,36,37]. V současné době jsou tyto metody používány v modernizovaných a modifikovaných verzích, které se jeví jako velmi perspektivní pro praktické využití v řadě oblastí vědy a techniky (adaptivní optika, oftalmologie, optická metrologie v průmyslu), zejména pak v oblasti optického průmyslu, kde svými vlastnostmi mohou konkurovat dosud dominantně používaným interferometrickým metodám kontroly optické výroby. Jedná se především o Hartmannovu resp. Shack-Hartmannovu metodu [36,37,43-52], pyramidální senzor vlnoplochy [33] a laserové paprskové skenovací metody [15,34-35]. Hartmannova resp. Shack-Hartmannova metoda využívá k určení gradientu fáze dopadajícího vlnového pole prostorového vzorkování pomocí matrice s dírkami resp. pole mikročoček a detekce polohy stop paprskových svazků, příslušných jednotlivým dírkám resp. mikročočkám. V případě tzv. pyramidálního senzoru fokusuje vhodná optická soustava dopadající vlnové pole na vrchol čtyřbokého pyramidálního hranolu, který rozdělí dopadající svazek a pomocí detektoru záření je zaznamenáváno rozdělení intenzity. Užitím vhodných vyhodnocovacích metod je poté možné z hodnot rozdělení detekované intenzity určit gradient dopadající vlnoplochy a následně vyhodnotit její tvar resp. fázi vlnového pole. U laserových paprskových metod je na rozdíl od Hartmannovy metody objekt (např. vyšetřovaný povrch nebo optická soustava) skenován úzkým laserovým svazkem a tento svazek je poté vhodnou optickou soustavou zobrazen na plošný detektor optického záření. Výsledky jsou poté zpracovávány obdobným způsobem jako u Hartmannovy metody. Jistou nevýhodou je nutnost skenování vyšetřovaného objektu.

Výhodou uvedených gradientních metod je jejich relativně jednoduchá experimentální realizace, malá citlivost na změny fyzikálních vlastností okolního prostředí, vysoká přesnost a relativně široký rozsah měření. Svou přesností vyhodnocení fáze (až $\pi/100$ rad) a velkým dynamickým rozsahem měření (až 1000π rad) v mnoha ohledech předčí dosud používané běžné interferometrické metody (vysoká přesnost a relativně malý měřicí rozsah). V současné době jsou též vyvíjeny nové vyhodnocovací algoritmy a netradiční metody, umožňující podstatným způsobem zlepšit vlastnosti měřicích zařízení, která využívají tyto metody (jedná se zejména o zvýšení přesnosti a měřicího rozsahu) [48-52].

2.2. Možné aplikace a trendy vývoje vyhodnocovacích metod

Vyhodnocování fáze je důležitým procesem, který může být aplikován v nejrůznějších odvětvích vědy, techniky nebo biomedicíny pro měřicí a diagnostické účely (např. měření tvaru a struktury různých typů povrchů, měření statických a dynamických deformací povrchů vyšetřovaných objektů v makroskopických i mikroskopických oblastech, měření vzdálenosti, určování vnitřní struktury různých materiálů, bezkontaktní analýza napětí, analýza defektů materiálů a výrobků, měření tvaru vlnoplochy v adaptivních zobrazovacích systémech, určování optických vad lidského oka, analýza zobrazovací kvality optických soustav, apod.).

Jednotlivé kroky vyhodnocovacího procesu musí proto být navrženy tak, aby bylo možné dosáhnout co nejpřesnějších výsledků měření při zachování co nejvyšší stability a robustnosti jednotlivých vyhodnocovacích procedur. Výsledná data poté musí zajišťovat porovnatelnost a možnost provádění dalších analýz a výpočtů. Obecným problémem procesu vyhodnocování fáze je vliv některých faktorů, jejichž působení může vést ke snižování přesnosti a

opakovatelnosti měření (např. vliv jednotlivých prvků měřicího zařízení nebo vlivy okolního prostředí). Častou nevýhodou většiny stávajících metod vyhodnocování fáze, které jsou využívány např. pro bezkontaktní měření a kontrolu, je jejich poměrně složitá mechanická a optoelektronická konstrukce, vysoké pořizovací náklady, požadavky na vlastnosti vyšetřovaného vlnového pole a značná citlivost vyhodnocení na faktory, které nepříznivě limitují přesnost, opakovatelnost a dynamický rozsah měření (např. mechanické vibrace). Jinou nevýhodou některých metod může být též dlouhý čas zpracování měřených dat, což znemožňuje prakticky zkoumání rychle probíhajících dynamických dějů a vyhodnocování měření v reálném čase.

Trendy ve vývoji vyhodnocovacích metod se proto snaží uvedené nepříznivé vlivy nějakým vhodným způsobem eliminovat, aby bylo možno získat hledané fázové hodnoty co nej přesněji. Některé z popsaných nevýhod lze redukovat návrhem vhodně optimalizovaných vyhodnocovacích algoritmů. Jiné mohou být v zásadě odstraněny návrhem zcela nových nebo modifikací stávajících měřicích a vyhodnocovacích metod. V současnosti dochází obecně v mnoha odvětvích průmyslu k zavádění procesu automatizace a digitalizace stávajících a vývoji nových měřicích a kontrolních metod, které by odstraňovaly nedostatky a nevýhody metod současných. Metody a postupy diskutované v této prezentaci byly proto navrženy s cílem jejich aplikace v procesu průmyslové kontroly.

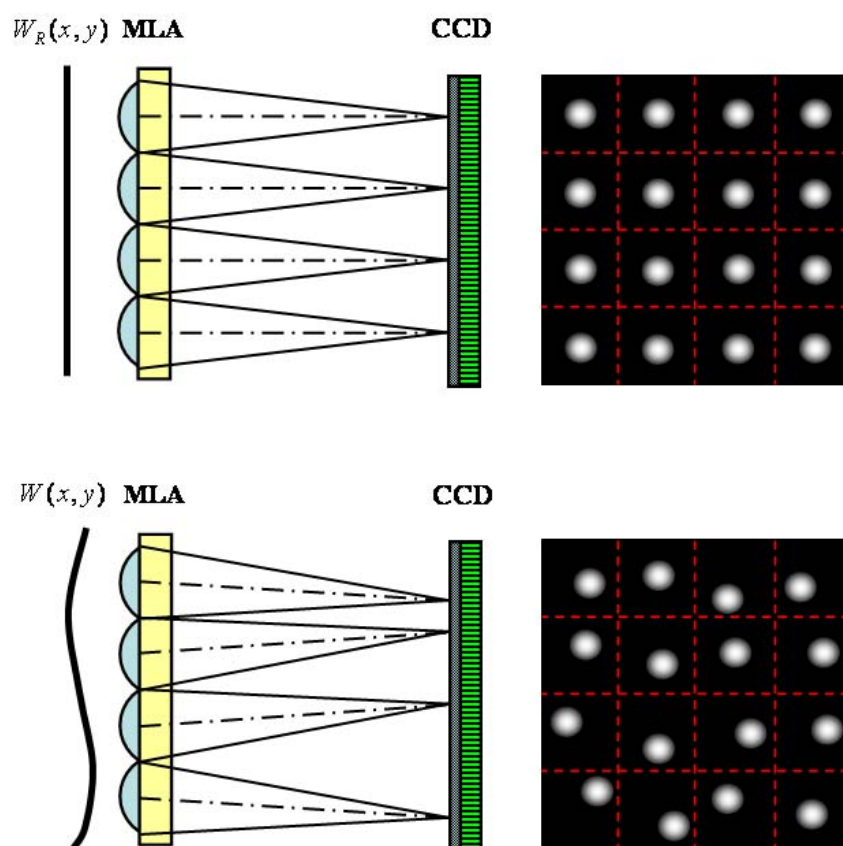
3. Gradientní metody vyhodnocování fáze

Jak již bylo poznamenáno tento typ metod, které lze využít pro vyhodnocování fáze vlnového pole, je založen na experimentálním určování gradientu fázových hodnot (resp. gradientu tvaru vlnoplochy) na síti bodů v prostoru. Složky gradientu (tj. hodnoty derivací ve dvou různých směrech) jsou určovány nepřímo měřením prostorového rozdělení intenzity vlnového pole, dopadajícího na detektor záření. Ze získaných hodnot gradientu vlnoplochy lze poté pomocí vhodných numerických algoritmů rekonstruovat hodnoty fáze vlnového pole. Tyto metody se v poslední době začínají velmi zdokonalovat a rozšiřovat a jeví se jako velmi perspektivní pro praktické využití v řadě oblastí vědy a techniky, zejména pak v oblasti optické metrologie v průmyslu, adaptivní optiky a očního lékařství [2,43-47,53,54]. V oblasti optického průmyslu mohou svými vlastnostmi konkurovat běžně používaným interferometrickým metodám kontroly optické výroby. Ve srovnání s interferometrickými metodami mají gradientní metody vyhodnocování fáze, při téměř srovnatelné přesnosti, velkou výhodu ve své relativně jednoduché experimentální realizaci, malé citlivosti na změny fyzikálních vlastností okolního prostředí (např. vibrace) a možnosti získání většího měřicího rozsahu. Svou přesností vyhodnocení tvaru vlnoplochy (až $\lambda/200$), širokým rozsahem měření, jednoduchostí konstrukce a nižšími finančními nároky předčí v některých aplikacích dosud používané interferometrické metody. Detekce rozdělení intenzity vlnového pole v gradientních maticových senzorech se provádí pomocí plošné detektory optického záření, které registrují časovou střední hodnotu energie dopadajícího záření. Pro praktické aplikace v oblasti optické metrologie se využívají nejčastěji CCD senzory s vysokým rozlišením, jejichž výhodou je vysoká citlivost a poměrně nízký šum.

Asi nejrozšířenější a prakticky nejpoužívanější měřicí a vyhodnocovací metodou tohoto typu je v současnosti tzv. *Hartmannova metoda* (Hartmannův test) resp. modifikace této metody (tzv. *Shack-Hartmannova metoda*). V další části je stručně popsán proces analýzy a praktické aplikace Shack-Hartmannova principu pro detekci změn fáze vlnového pole, jež byl využit při návrhu a konstrukci měřicího systému pro kontrolu kvality optických soustav a prvků v optické výrobě [45-47].

3.1. Shack-Hartmannova metoda

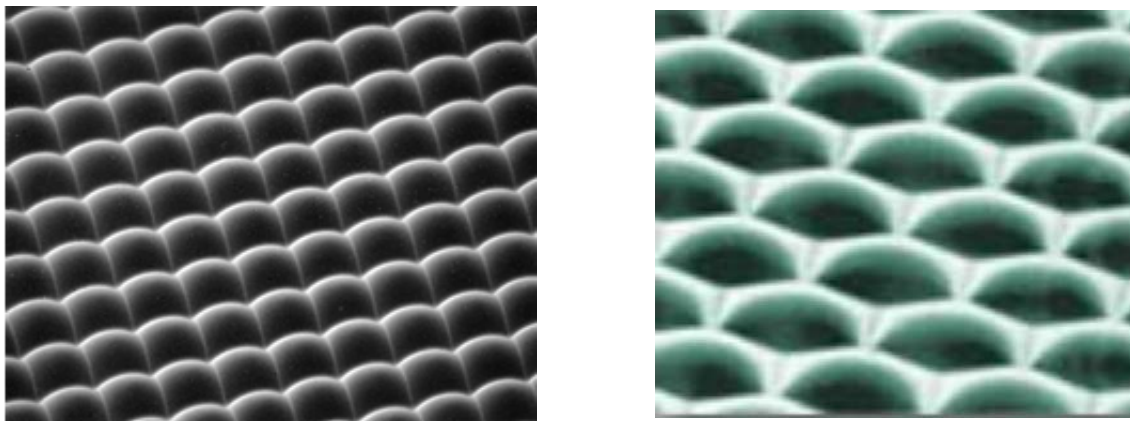
Shack-Hartmannova metoda je úspěšnou modifikací klasické Hartmannovy metody. V roce 1971 Roland Shack a Ben Platt upravili klasický Hartmannův test takovým způsobem, že nahradili Hartmannovu masku s otvory polem mikročoček [37], pro které si vytvořili svůj vlastní technologický postup výroby. Výhodou tohoto postupu je vyšší účinnost využití dopadajícího záření (mikročočky pokrývají celou vyšetřovanou oblast), což ocenili v první fázi vývoje zejména astronomové v systémech adaptivní optiky. Namísto neprůhledného stínítka s otvory tedy tato metoda využívá pro prostorové vzorkování dopadající vlnoplochy pole mikročoček s ohniskovou vzdáleností f . Detekce prostorového rozdělení intenzity se provádí nejčastěji v ohniskové rovině pole mikročoček. Na obr.1 je znázorněno principiální schéma Shack-Hartmannova senzoru, který se skládá z matice mikročoček MLA a CCD senzoru.



Obr.1: Schéma Shack-Hartmannova senzoru vlnoplochy

Mikročočky soustředí paprskové svazky do své ohniskové roviny, v níž se obvykle nachází plošný detektor záření (CCD). Pomocí detektoru registrujeme rozdělení intenzity dopadajícího vlnového pole, jež je vzorkované pomocí pole mikročoček. Zaznamenané rozdělení intenzity v rovině detektoru je složeno ze stop jednotlivých paprskových svazků, odpovídající jednotlivým subaperturám mikročoček (obr.1). Jak uvidíme dále, poloha stopy na detektoru je dána průměrnou hodnotou gradientu části vlnoplochy, dopadající na mikročočku a ohniskovou vzdáleností f této mikročočky. Shack-Hartmannův senzor umožňuje určit průměrný gradient vlnoplochy, příslušející subaperturám jednotlivých mikročoček na základě detekce polohy energetického středu detekovaných intenzitních stop. Detekce středů stop musí být jednoznačná, tj. je nutno přiřadit detekovanou stopu dopadajících paprskových svazků odpovídajícím subaperturám v poli mikročoček. Plochu detektoru je možno virtuálně rozdělit na dílčí senzory, jejichž velikost a počet odpovídá

rozmístění a počtu subapertur mikročoček v maticovém poli a na těchto dílčích oblastech lze poté sledovat polohu stopy paprskového svazku. Dopadá-li na senzor rovinná (referenční) vlna W_R , potom středy stop dílčích paprskových svazků, dopadajících na detektor, tvoří pravidelnou síť bodů (obr.1). V případě, že vlnoplocha W , dopadající na matici mikročoček MLA, má obecný tvar (obr.1), potom energetické středy stop paprskových svazků budou posunuty oproti předchozímu případu. Z odchylek středů jednotlivých stop lze poté určit hodnotu gradientu vlnoplochy a následně rekonstruovat její tvar.



Obr.2: Pole mikročoček v případě obdélníkového a šestiúhelníkového tvaru subapertur

Pro detekci intenzity v senzorech vlnoplochy se používají plošné detektory optického záření, nejčastěji CCD senzory s vysokým rozlišením a relativně malou velikostí pixelů. Na velikosti pixelů a rozlišení detektoru poté závisí citlivost a přesnost vyhodnocení měření. Pro konstrukci gradientního senzoru vlnoplochy se dá využít velké množství typů mikročoček, které se v současné době vyrábí pomocí různých technologií. Pole mikročoček se vyrábějí v mnoha podobách a rozměrech (obr.2). Jsou vyráběny obvykle z běžného optického nebo křemenného skla resp. z plastických hmot v ortogonální resp. hexagonální struktuře subapertur. Pro různé aplikace je též nanášena antireflexní vrstva. Z praktických důvodů se nejčastěji se vyrábějí mikročočky se čtvercovým, kruhovým nebo šestiúhelníkovým tvarem apertury. Velikost maticových polí závisí na konkrétní aplikaci a požadavcích (pro Shack-Hartmannův senzor se obvykle vyrábí pole 20×20 - 200×200 čoček). Procento pokrytí plochy mikročočkami se pohybuje od 78 % v případě kruhového tvaru subapertur až téměř po 100 % v případě čtvercových nebo šestiúhelníkových subapertur. Mimo těchto základních geometrických parametrů je při výrobě mikročoček velmi důležitá přesnost dodržení tvaru povrchu a ohniskové vzdálenosti. Pomocí současných technologií pro výrobu mikročoček je možno dosáhnout odchylek v hodnotě ohniskové vzdálenosti jednotlivých mikročoček do 1-3 %. Tabulka 1 shrnuje rozsah základních technických parametrů běžně vyráběných mikročoček.

Tabulka 1: Přehled základních parametrů maticových polí mikročoček

Parametr	Hodnota
Clonové číslo	0,5-100
Rozměr subapertur [μm]	10-1500
Ohnisková vzdálenost [mm]	1-200
Relativní chyba ohniskové vzdálenosti [%]	1-3
Velikost maticového pole [mm]	5-150

Volba konkrétního uspořádání Shack-Hartmannova senzoru (pole mikročoček+detektor) závisí vždy na požadovaných charakteristikách senzoru (citlivosti, přesnosti měření a dynamickém rozsahu měření). Tyto charakteristiky lze ovlivňovat vhodnou volbou základních geometrických a fyzikálních parametrů pole mikročoček a detektoru (velikost, tvar a počet subapertur mikročoček, ohnisková vzdálenost mikročoček, rozměry a celkový počet pixelů detektoru).

3.2. Postup vyhodnocení fáze vlnového pole

Proces vyhodnocování měření pomocí Shack-Hartmannovy metody lze v zásadě rozčlenit do tří částí: určení změny pozice energetického středu stop paprskových svazků v rovině detektoru vůči referenčnímu měření, určení gradientu dopadající vlnoplochy na síti bodů roviny (středech dílčích subapertur na detektoru) a provedení numerické rekonstrukce spojitého tvaru vlnoplochy (resp. fáze) na základě hodnot jejího gradientu.

Abychom mohli vypočítat průměrnou hodnotu gradientu dopadající vlnoplochy, je nutno velmi přesně určit změnu $\Delta \mathbf{r}_C = (\Delta x, \Delta y)$ pozice energetických středů stop, příslušejících jednotlivým mikročočkám. Jako referenční vlnoplocha se obvykle volí rovinná vlnoplocha, dopadající kolmo na rovinu pole mikročoček. Při měření lze využít různých matematických metod pro určování energetických středů stop paprskových svazků [42,43,45]. V praxi se provádí obvykle diskrétní výpočet těžiště profilu intenzity stopy. Souřadnice těžiště $\mathbf{r}_C = (x_C, y_C)$ jsou dány vztahy

$$x_C = \frac{\sum \sum x(i, j) I(i, j) T(i, j)}{\sum \sum I(i, j) T(i, j)}, \quad y_C = \frac{\sum \sum y(i, j) I(i, j) T(i, j)}{\sum \sum I(i, j) T(i, j)}, \quad (1)$$

kde $I(i, j)$ je hodnota intenzity v obrazovém bodě (i, j) se souřadnicemi $x(i, j), y(i, j)$ a $T(i, j)$ je funkce, popisující prahování detekovaného rozdělení intenzity. Práh pro detekci se nejčastěji stanovuje adaptivně. V průběhu měření se provádí vyhodnocování změny pozice energetických středů detekovaných stop vzhledem k dané referenční vlnoploše (obvykle rovinná vlnoplocha $\nabla_{\perp} W = 0$). Pokud budeme detekovat intenzitu vlnového pole v obrazové ohniskové rovině pole mikročoček, potom použitím skalárního popisu šíření vlnového pole obdržíme pro změnu polohy energetického středu oproti referenčnímu případu [43]

$$\Delta \mathbf{r}_C = f \frac{1}{I_0} \iint_{L_k} I(\mathbf{r}) \nabla_{\perp} W(\mathbf{r}) dx dy, \quad (2)$$

kde I_0 je celkový zářivý tok dopadající na k -tou mikročočku L_k , $\mathbf{r} = (x, y)$ je polohový vektor v rovině mikročočky a f je ohnisková vzdálenost mikročočky. V případě, že osvětlení subapertury dané mikročočky bude prakticky konstantní ($I(\mathbf{r}) = \text{konst.}$), potom se vztah zjednoduší na

$$\Delta \mathbf{r}_C = f \frac{1}{S} \iint \nabla_{\perp} W(\mathbf{r}) dx dy, \quad (3)$$

kde S je velikost plochy subapertury mikročočky. Uvedený zjednodušující předpoklad je ve většině praktických aplikací s dostatečnou přesností splněn. Poloha středu stopy leží na přímce, jejíž směrnice je dána průměrnou hodnotou gradientu dopadající vlnoplochy W v pupile mikročočky L_k . Za zjednodušujícího předpokladu, že část vlnoplochy dopadající na jednotlivé mikročočky je možno s dostatečnou přesností považovat za rovinnou vlnu s konstantním rozdělením intenzity, platí pro odchylky $(\Delta x_k, \Delta y_k)$ energetických středů stop paprskových svazků na detektoru (vzhledem k referenčnímu měření) přibližně [2,6,45]

$$\frac{\Delta x_k}{f} = \frac{\partial W(x_k, y_k)}{\partial x}, \quad \frac{\Delta y_k}{f} = \frac{\partial W(x_k, y_k)}{\partial y}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4)$$

kde $W(x, y)$ je funkce tvaru vlnoplochy. To jsou základní vztahy pro praktický numerický výpočet tvaru vlnoplochy pomocí gradientního senzoru vlnoplochy. Velikost chyb při vyhodnocení fáze vlnového pole, které vzniknou předchozími zjednodušujícími předpoklady, je závislá na parametrech maticového senzoru vlnoplochy. Pro dostatečně prostorově vzorkovanou vlnoplochu jsou tyto chyby prakticky zanedbatelné.

V některých případech může nastat situace, kdy nebudeme schopni jednoznačně přiřadit jednotlivé detekované stopy odpovídajícím mikročočkám, tj. dojde k vzájemnému překrývání stop. Tato situace vyvstane v tom případě, kdy gradient dopadající vlnoplochy překročí určitou mezní hodnotu (stopy zasahují do sousedních subapertur). Abychom se této situaci vyhnuli, musíme omezit měřicí rozsah senzoru. Je nutno též uvážit, že stopa paprskového svazku může pokrýt značnou část plochy dílčí subapertury na detektoru. V ideálním případě, za předpokladu, že mikročočka je fyzikálně dokonalá soustava, bude příčný rozměr centrální části stopy pro kruhový resp. čtvercový tvar apertury mikročočky o rozměru D dán vztahy

$$d_A = 2,44\lambda f / D, \quad \text{resp.} \quad d_A = 2\lambda f / D, \quad (5)$$

kde λ je vlnová délka záření a f je ohnisková vzdálenost mikročoček. Pokud je rozteč mikročoček $\delta_x = \delta_y = D$, potom pro maximální hodnotu gradientu vlnoplochy (tj. případ, kdy se centrální maximum stopy ještě nachází v odpovídající subapertuře) obdržíme následující vztah

$$\left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_{\max} = \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)_{\max} = \frac{D - d_A}{2f}. \quad (6)$$

V tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty maximálního gradientu vlnoplochy, vypočtené podle předchozího vztahu pro kruhový tvar mikročoček, v závislosti na vlnové délce λ použitého záření a ohniskové vzdálenosti mikročoček f .

Tabulka 2: Hodnoty maximálního gradientu vlnoplochy [mrad]

$D = 300 \mu\text{m}$	$\lambda = 633 \text{ nm}$	$\lambda = 550 \text{ nm}$	$\lambda = 500 \text{ nm}$	$\lambda = 450 \text{ nm}$	$\lambda = 360 \text{ nm}$
$f = 10 \text{ mm}$	12,426	12,763	12,967	13,17	13,536
$f = 20 \text{ mm}$	4,9258	5,2633	5,4667	5,67	6,036
$f = 30 \text{ mm}$	2,4258	2,7633	2,9667	3,17	3,536
$f = 40 \text{ mm}$	1,1758	1,5133	1,7167	1,92	2,286
$f = 50 \text{ mm}$	0,4258	0,76333	0,96667	1,17	1,536

Z předchozí tabulky lze pozorovat, že s rostoucí ohniskovou vzdáleností výrazně klesá měřicí rozsah a naopak roste citlivost senzoru. S klesající vlnovou délkou se též mírně zvětšuje rozsah měřených hodnot. Jak je z předchozí analýzy vidět, měřicí rozsah klasického Shack-Hartmannova senzoru je výrazně omezen. Proto se v současnosti vývoj a výzkum v této oblasti zaměřuje též na metody, které umožňují zvýšit dynamický rozsah měření [48-52]. Jednou z možností je použití prostorového modulátoru světla, umístěného před nebo za maticí mikročoček. Prostorový modulátor světla umožní průchod vlnového pole v daném časovém okamžiku pouze určitými subaperturami pole mikročoček. Dopadající vlnoplocha je tak vlastně prostorově skenována pomocí přepínatelných kombinací dílčích subapertur. Počítačem se postupně generují otvory o velikosti stejné jako mají subapertury mikročoček, přičemž propustná je vždy jen jedna subapertura nebo speciální kombinace několika vhodně zvolených subapertur [50]. Obdobnou

možností je využití transmisního displeje z tekutých krystalů, pomocí kterého je počítačem generováno pole Fresnelových mikročoček [49]. Tím odpadá nutnost použití pole mikročoček a tedy dochází k úspoře nákladů.

Poslední fází vyhodnocovacího procesu je numerická rekonstrukce tvaru vlnoplochy z hodnot jejího gradientu, jež jsou známy ve středech jednotlivých subapertur. Z matematického hlediska se jedná o rekonstrukci funkce dvou proměnných na dvojrozměrné vyšetřované oblasti, známe-li v řadě bodů této oblasti hodnoty jejího gradientu. Předpokládejme, že měřené hodnoty $g(x, y)$ gradientu vlnoplochy jsou určeny s určitými chybami $n(x, y)$, tj. můžeme psát pro skutečnou hodnotu gradientu vlnoplochy

$$\nabla_{\perp} W(x, y) + n(x, y) = g(x, y). \quad (7)$$

Při vyhodnocení požadujeme, aby odchylky měřených a skutečných hodnot gradientu byly minimální, tj. snažíme se minimalizovat následující funkcionál

$$F = \iint [\nabla_{\perp} W(x, y) - g(x, y)] dx dy. \quad (8)$$

Tato problematika může být v zásadě řešena několika různými způsoby. Pro praktické vyhodnocování se používají dvě odlišné skupiny metod, a to: metody globální aproximace vlnoplochy na celé vyšetřované oblasti pomocí polynomů a metody lokální aproximace na dílčích podoblastech [38-41,45].

3.3. Analýza měřicí a vyhodnocovací metody

Měřicí a vyhodnocovací proces při analýze fáze vlnového pole pomocí senzoru vlnoplochy, jenž je založen na Shack-Hartmannově metodě, je ovlivňován mnoha zdroji chyb. Tyto chyby mají za důsledek sníženou výslednou přesnost a opakovatelnost měření fáze resp. vlnoplochy. Zdroje chyb vyhodnocování měření uvedenou metodou jsou různého typu. Některé z nich jsou systematické povahy a mohou být odstraněny správnou kalibrací senzoru vlnoplochy, jiné lze redukovat vhodnou volbou parametrů měřicího senzoru. Chyby lze rozčlenit přibližně do následujících kategorií:

- a) chyby z nejistot geometrických parametrů senzoru,
- b) chyby při referenčním měření,
- c) chyby vznikající vzájemným pootočením pole mikročoček a detektoru,
- d) chyby z nedostatečného prostorového vzorkování dopadající vlnoplochy,
- e) chyby numerické metody pro rekonstrukci vlnoplochy,
- f) chyby v určení správné pozice středů intenzity paprskových svazků na detektoru.

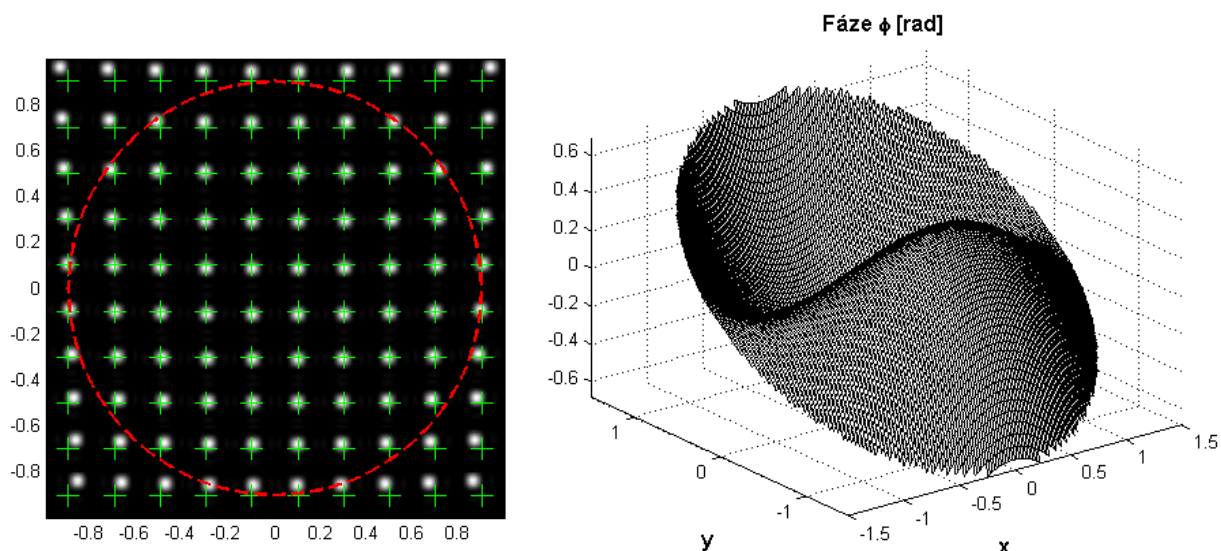
V rámci práce byla provedena podrobná teoretická analýza uvedených typů chyb měřicí a vyhodnocovací metody. Pro kalibraci a testování senzoru vlnoplochy bylo sestrojeno experimentální zařízení, kterým lze nastavovat velikost defokusace dopadající vlnoplochy. Pomocí tohoto zařízení je poté možné jednoduchým způsobem testovat vlastnosti reálného Shack-Hartmannova senzoru vlnoplochy, který byl navržen a zkonstruován.

V rámci práce byl dále vytvořen model pro počítačovou simulaci a analýzu Shack-Hartmannova resp. Hartmannova senzoru vlnoplochy, založený na skalární teorii šíření vlnového pole. Na základě tohoto modelu byl vytvořen software, který umožňuje provádět simulaci a analýzu procesu vyhodnocování vlnoplochy v závislosti na geometrických a fyzikálních parametrech senzoru (ohnisková vzdálenost, rozteč a průměr mikročoček, rozlišení pole mikročoček, rozlišení a velikost pixelů detektoru, šum, atd.). Z modelovaného rozdělení intenzity v rovině detektoru lze zpětně vyhodnotit polohu stop paprskových svazků, vypočítat hodnoty gradientu

vlnoplochy a následně rekonstruovat i tvar vlnoplochy pomocí různých vyhodnocovacích metod. Uvedeným způsobem je tedy možno provést počítačovou simulaci rozdělení intenzity světla v rovině detekce. Obdobným způsobem lze modelovat i případ klasické Hartmannovy metody, kdy místo mikročoček máme pouze otvory ve stínítku.

Pomocí vytvořeného simulačního softwaru byla poté prováděna komplexní analýza vyhodnocovacího procesu, kde byl vyšetřován vliv jednotlivých parametrů senzoru na proces vyhodnocení tvaru vlnoplochy. Různé vyhodnocovací algoritmy byly testovány a optimalizovány pomocí uvedeného software na skutečných i počítačově modelovaných vlnoplochách s různým tvarem. Tvar vlnoplochy dopadajícího vlnového pole byl počítačově modelován pomocí polynomů (Zernikeových, Seidlových, Legendrových). Algoritmy byly porovnávány vzhledem k jejich přesnosti, numerické robustnosti a geometrickému uspořádání senzoru. Na základě analýzy vyhodnocovacích algoritmů byly poté navrženy optimalizované postupy, které byly použity ve vyhodnocovacím software pro laboratorní měření vlnoplochy v oblasti optické metrologie.

Jako příklad použití je na obr.3 vlevo zobrazeno počítačově modelované prostorové rozdělení intenzity stop paprskových svazků v rovině detekce pro modelovanou vlnoplochu a dané parametry měřicího senzoru (ohnisková vzdálenost $f = 40$ mm, čtvercový tvar subapertur o rozměru $D = 0,3$ mm, detektor záření s rozlišením 1600×1200 o rozměrech pixelu $\delta = 4,4$ μm , vlnová délka záření $\lambda = 652$ nm). Křížky označují středy jednotlivých subapertur. Na obr.3 vpravo jsou poté znázorněny odpovídající hodnoty fáze.



Obr.3: Počítačově modelovaný obraz stop na detektoru a odpovídající fáze

3.4. Experimentální realizace metody

Gradientní senzory vlnoplochy, založené na Shack-Hartmannově principu, mají široké praktické využití v řadě oblastí vědy a techniky, zejména v adaptivní optice, oftalmologii, optické metrologii v průmyslu, diagnostice laserových svazků, apod. [43,44,46,47,53,54]. V optické průmyslové metrologii se dá využít těchto metod pro měření tvaru povrchů, testování kvality zobrazení optických soustav, kontrolu centricity optických soustav, aj. Pro testování kvality optických ploch a optických soustav jsou v současné době nejčastěji používány měřicí systémy, založené na interferometrických metodách. V poslední době se Shack-Hartmannova metoda též začíná prosazovat i do této oblasti a lze očekávat větší využití této metody v mnoha dalších aplikacích průmyslové kontroly optických soustav a prvků.

V současnosti lze na základě geometrických a fyzikálních parametrů jednotlivých prvků senzoru (maticové pole mikročoček a detektor záření) konstruovat měřicí zařízení s různými technickými parametry (citlivost měření, přesnost vyhodnocení, dynamický rozsah, použitý rozsah vlnových délek). Přibližné rozsahy jednotlivých důležitých parametrů jsou uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Běžné parametry maticových gradientních senzorů vlnoplochy

Průměr mikročoček	0,1 - 1 mm
Počet mikročoček	20×20 - 150×150
Ohnisková vzdálenost mikročoček	4 - 150 mm
Max.přesnost měření (rms)	$\lambda/100 - \lambda/150$
Max.přesnost měření (PV)	$\lambda/10 - \lambda/50$
Maximální frekvence měření	5 – 100 Hz
Vlnová délka záření	0,375 μm – 1,1 μm
Dynamický rozsah měření	až 500 λ

Z předchozí tabulky je vidět, že je možné získat velké množství různých variant gradientních senzorů. Je nutné poznamenat, že s rostoucí ohniskovou vzdáleností mikročoček vzrůstá citlivost prováděného měření, ale naopak se snižuje rozsah měření. Pro různé aplikace je tedy vždy vhodné navrhnout a zkonstruovat odlišné typy senzorů vlnoplochy takovým způsobem, aby jejich technické parametry odpovídaly požadavkům, které klade daná praktická aplikace.

3.4.1. Maticový gradientní senzor pro vyhodnocování fáze

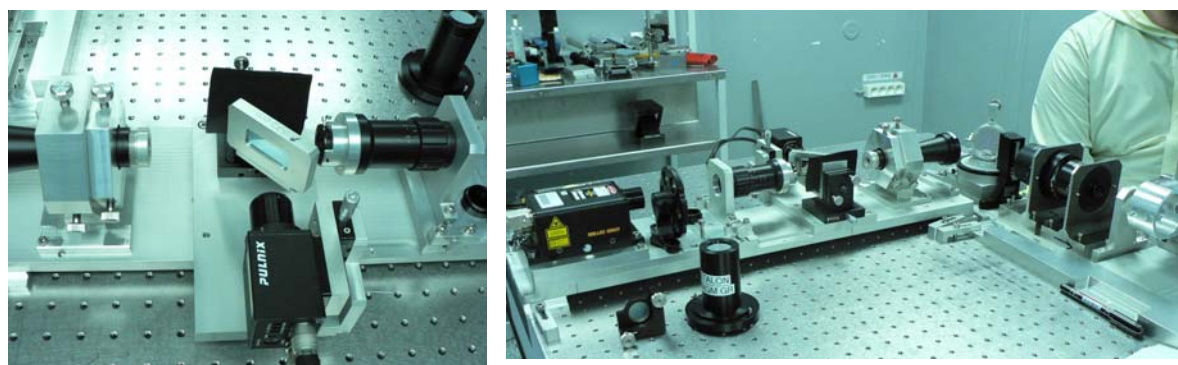
V rámci práce byl navržen, zkonstruován a otestován gradientní senzor vlnoplochy, založený na principu Shack-Hartmannovy metody, jenž měl být aplikován do procesu průmyslové kontroly optické výroby. Gradientní senzor se skládá z maticového objektivu, který je možno pomocí závitu spojit s kamerou, jež slouží pro detekci rozdělení intenzity stop paprskových svazků (obr.4).



Obr.4: Maticový objektiv pro detekci tvaru vlnoplochy

Maticový objektiv se skládá z pole 20×20 mikročoček se čtvercovým tvarem ortogonálně uspořádaných subapertur, vyrobených z křemenného skla. Ohnisková vzdálenost mikročoček je $f = 40$ mm a vzdálenost středů sousedních subapertur pole mikročoček je 300 μm . Jako detektor byly používány CCD kamery (standardní analogová kamera o rozlišení 768×576 obrazových bodů resp. digitální kamera o rozlišení 1600×1200 obrazových bodů).

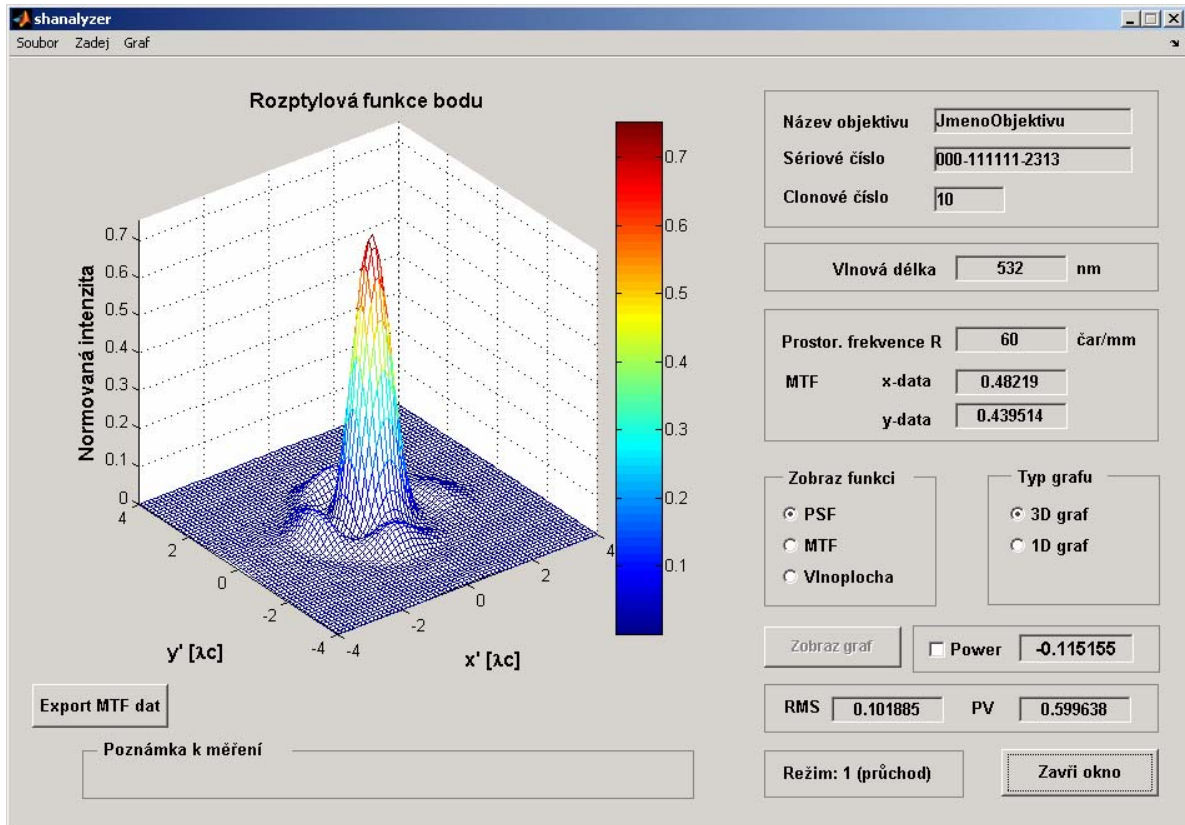
Pro senzor byly zvoleny uvedené parametry z hlediska dosažení relativně vysoké citlivosti senzoru a použitelnosti při měření v UV oblasti. Pomocí navrženého senzoru bylo provedeno několik experimentů na ověření funkčnosti měřicího zařízení a vhodnosti zvolených vyhodnocovacích metod. Měřicí rozsah senzoru je dán rozměry pole mikročoček a jejich tvarem, ohniskovou vzdáleností a vlnovou délkou záření. Dosažitelná přesnost vyhodnocení je vyšší nežli $\lambda/15$ (P-V), kde λ je vlnová délka. Tato přesnost je porovnatelná s přesností běžných interferometrických metod a je zcela dostačující pro testování optických prvků a soustav v optickém průmyslu. Ve spolupráci s Meopta Optika, s.r.o. byly provedeny experimenty při testování kvality optických soustav v ultrafialové a viditelné části spektra, které prokázaly velmi dobrou aplikovatelnost navrženého měřicího zařízení v průmyslové praxi. Senzor může být použit v mnoha experimentálních konfiguracích pro měření tvaru různých optických ploch (rovinných, sférických, asférických), hodnocení kvality zobrazení optických soustav, kontrolu centricity optických soustav, apod. Jeden měřicí systém je v současné době využíván v optických laboratořích Meopta Optika, s.r.o. pro sériovou kontrolu kvality vyráběných optických soustav. Na obr.5 je zobrazen uvedený měřicí systém v čistých laboratořích Meopta Optika, s.r.o. při měření přenosové funkce laserových anamorfotických objektivů v UV oblasti spektra.



Obr.5: Systém pro měření tvaru vlnoplochy pomocí Shack-Hartmannova senzoru

Pro analýzu a vyhodnocení měření s využitím gradientního senzoru vlnoplochy byly navrženy efektivní výpočetní algoritmy pro automatickou počítačovou analýzu tvaru vlnoplochy při kontrole kvality zobrazení vyšetřovaných optických soustav a prvků [46,47]. Vyhodnocovací algoritmy byly testovány na experimentálních i počítačově modelovaných datech a poté implementovány do vytvořeného počítačového programu pro laboratorní vyhodnocování tvaru měřené vlnoplochy (obr.6). Pomocí uvedeného software je možné nejen vyhodnotit deformaci vlnoplochy u měřených optických soustav a prvků, ale dále vypočtenou vlnoplochu analyzovat pomocí různých funkcí a kritérií, použitelných pro hodnocení kvality zobrazení optických soustav (např. rozptylová funkce bodu, funkce přenosu kontrastu, apod.).

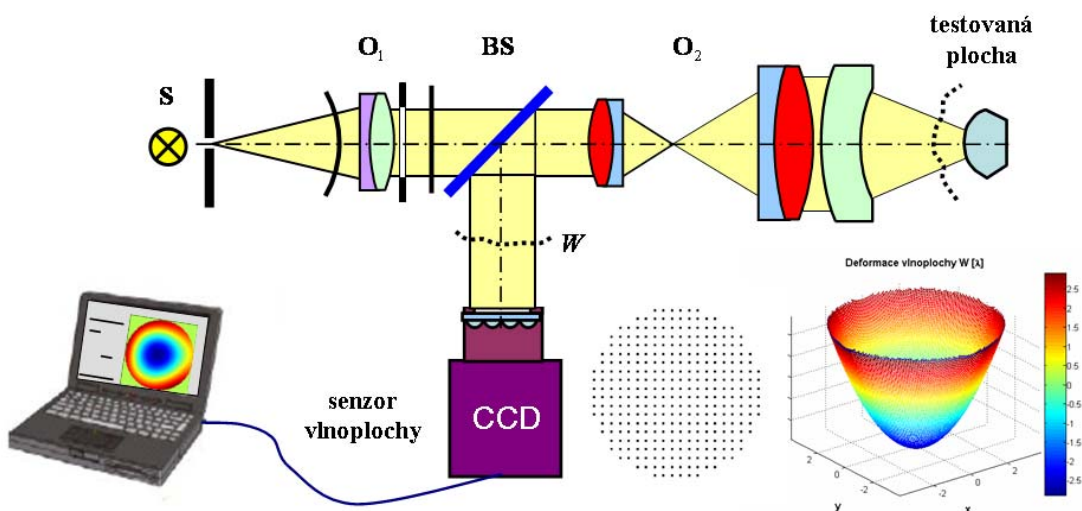
Počítačové algoritmy byly optimalizovány vzhledem k daným parametrům navrženého měřicího systému. Funkčnost měřicího systému byl ověřována v úzké spolupráci s Meopta Optika, s.r.o., na případech testování kvality zobrazení reálných optických soustav. Uvedený senzor a vyhodnocovací software umožňuje hodnotit kvalitu různých optických prvků a soustav (např. fotografických objektivů, dalekohledů, ...). Jak je z uvedeného patrné, metoda může být použita pro průmyslovou kontrolu v optickém průmyslu. Její výhodou oproti běžně používaným interferometrickým metodám je jednodušší konstrukce a nižší náklady na pořízení měřicího zařízení při téměř srovnatelné přesnosti měření s běžnými interferometrickými metodami.



Obr.6: Software pro analýzu měření

3.4.2. Senzor vlnoplochy a jeho použití v optickém průmyslu

Jak již bylo řečeno, senzor vlnoplochy lze v procesu kontroly optické výroby využít např. pro analýzu kvality zobrazení vyráběných optických soustav, měření odchylek tvaru vyráběných ploch optických prvků od nominálního tvaru, apod. Nyní si stručně popíšeme některé možné konfigurace experimentálního zařízení pro průmyslovou kontrolu optických prvků a soustav. Na obr.7 je schématicky znázorněn princip měření tvaru ploch optických prvků.

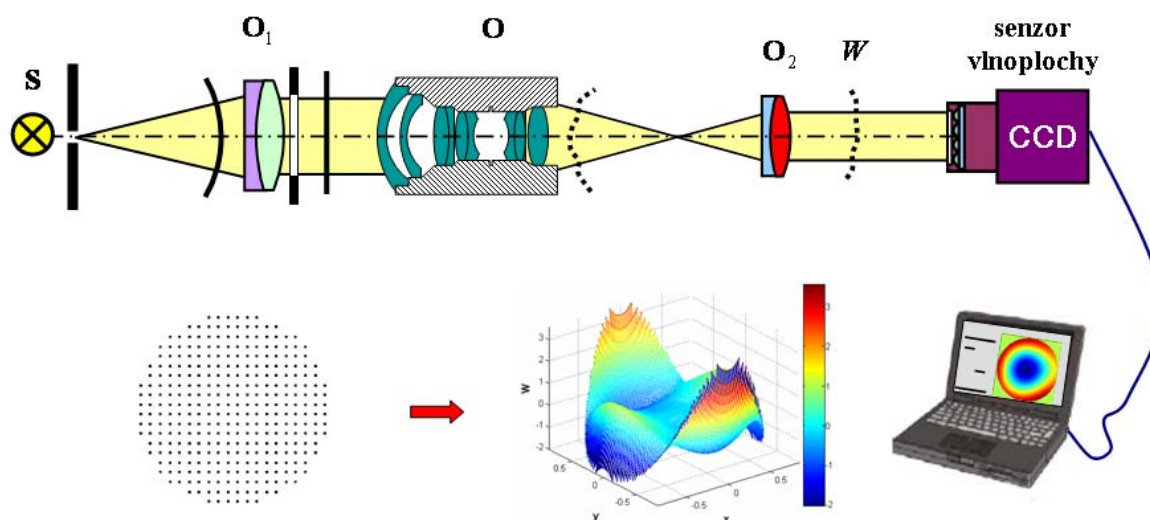


Obr.7: Schéma kontroly odchylek tvaru optických ploch gradientním senzorem vlnoplochy

Bodovým světelným zdrojem (realizovaným např. osvětlením clonky s malým kruhovým otvorem) vytvořená sférická vlna je kolimována optickou soustavou O_1 na rovinnou vlnu. Po

průchodu děličem svazku BS a vhodnou optickou soustavou O_2 , která formuje tvar vlnoplochy (např. na sférickou plochu), dopadá vlnové pole na testovanou optickou plochu. Vlna se odráží na povrchu vyšetřované plochy a prochází zpět. Při zpětném průchodu dopadá na gradientní senzor vlnoplochy (Shack-Hartmannův senzor). V důsledku odchylky povrchu měřené plochy od požadovaného tvaru (např. sférické plochy) dojde k deformaci odražené vlnoplochy. Na základě vyhodnocení této vlnoplochy můžeme zpětně získat odchylky tvaru plochy vzhledem k referenční ploše. Jako referenční stav lze např. použít referenční plochy, která je umístěna místo testované plochy.

Další oblastí využití gradientního senzoru vlnoplochy je měření kvality zobrazení optických soustav a výpočet zobrazovacích charakteristik (rozptylová funkce bodu - PSF, optická funkce přenosu - OTF, funkce přenosu kontrastu – MTF, Strehlova definice). Lze tak kontrolovat optické soustavy jako jsou např. dalekohledy, teleobjektivy, fotografické objektivy, jednoduché optické prvky, apod. V důsledku aberací testované soustavy dojde při průchodu testovanou optickou soustavou k deformaci vstupní vlnoplochy, která je vyhodnocována pomocí senzoru vlnoplochy.



Obr.8: Schéma kontroly zobrazovací kvality optických soustav Shack-Hartmannovým senzorem

Obr.8 znázorňuje schématicky princip měření kvality zobrazení optických soustav pro jednoduchý průchod. Bodovým světelným zdrojem vytvořená sférická vlna je kolimována optickou soustavou O_1 . Po průchodu testovanou optickou soustavou O a soustavou O_2 dopadá vlnové pole na Shack-Hartmannův senzor. V důsledku aberací testované soustavy dojde k deformaci procházející vlnoplochy. Na základě vyhodnocení měření můžeme určit vlnovou aberaci testované optické soustavy a vypočítat základní charakteristiky vyšetřovaných optických soustav (PSF, MTF). Navržený měřicí senzor je též v principu možno použít na měření decentricity a justáž optických soustav.

4. Závěr

Vyhodnocování fáze je důležitým procesem, který se dá široce využít v nejrůznějších odvětvích vědy, techniky nebo lékařství, zejména pro měřicí a diagnostické účely (např. v oblasti optické metrologie v průmyslu, adaptivní optiky, očního lékařství, mikroskopie, diagnostiky laserových svazků, měření deformací a vibrací, analýzy tvaru a struktur povrchů, atd). Proces vyhodnocování fáze vlnového pole, jenž je součástí mnohých moderních měřicích metod, vyžaduje velkou pozornost, neboť zásadně ovlivňuje výslednou přesnost a spolehlivost měření.

Předložená práce stručně prezentuje princip a aplikace tzv. gradientních metod pro vyhodnocování fáze vlnového pole v optice, které byly autorem podrobně zkoumány. Je zaměřena zejména na *komplexní popis, teoretickou analýzu, počítačovou simulaci a průmyslovou aplikaci Shack-Hartmannovy metody pro vyhodnocování fáze* [45-47]. Byly navrženy optimalizované vyhodnocovací algoritmy a pomocí počítačových simulací a vytvořeného softwaru byla provedena analýza různých vyhodnocovacích postupů pro získání fázových hodnot na různých typech vyšetřované oblasti. Zároveň byl navržen a zkonstruován měřicí systém [46,47], který využívá speciálního maticového objektivu pro získání fázové informace. Přesnost vyhodnocení fázových hodnot je u uvedeného systému je porovnatelná s přesností běžných interferometrických metod, nicméně měřicí rozsah je vyšší a mechanická konstrukce měřicího senzoru je jednodušší. Ve spolupráci s firmou Meopta Optika, s.r.o. byly provedeny experimenty při testování kvality optických soustav v ultrafialové a viditelné části spektra, které prokázaly velmi dobrou aplikovatelnost navrženého měřicího zařízení v průmyslové praxi a toto zařízení je v současnosti používáno Meoptou Optika s.r.o. pro sériovou kontrolu vyráběných optických soustav. Navržený systém může být použit pro měření tvaru optických ploch, hodnocení kvality zobrazení optických soustav, měření decentricity, apod. Prezentované výsledky vznikaly v průběhu řešení několika vědeckovýzkumných projektů během posledních let a byly průběžně publikovány v mezinárodních časopisech a na mezinárodních konferencích. Za hlavní dosažené vědecké přínosy autora v této oblasti lze považovat:

- významné rozpracování současných poznatků v oblasti komplexního popisu, teoretické analýzy a numerického modelování procesu vyhodnocování fáze u metod, založených na měření gradientu fáze, zejména pak u Shack-Hartmannovy metody [45,46],
- návrh, konstrukce a experimentální ověření moderního maticového gradientního senzoru vlnoplochy pro vyhodnocování fáze vlnového pole [46,47], využívajícího Shack-Hartmannovy metody, vytvoření vyhodnocovacího software a zavedení měřicího systému v Meoptě Optika s.r.o. do sériové kontroly vyráběných optických soustav v UV oblasti.

Trendy budoucího výzkumu v oblasti gradientních senzorů lze spatřovat především ve vývoji nových aktivních mikrooptických prvků jako jsou např. přepínatelné optické prvky, mikročočky s elektronicky proměnnou ohniskovou vzdáleností nebo difrakční optické prvky s řízenou změnou fáze dopadajícího vlnového pole. Některé z těchto prvků již byly vyvinuty, nicméně z hlediska praktických aplikací (např. v optické metrologii) je ještě stále nutno podstatně zlepšit jejich technické parametry. Tyto prvky umožní v blízké budoucnosti výrobu miniaturizovaných měřicích systémů, které budou zajišťovat vysokou přesnost vyhodnocování fáze vlnového pole. Problematika, řešená v této práci, přispívá jak teoreticky tak experimentálně k dalšímu rozvoji metod analýzy fáze vlnových polí a jejich aplikace v oblasti optické metrologie. Výsledky práce jsou pak přímo aplikovatelné při praktické kontrole kvality optické výroby v optickém průmyslu.

5. Literatura

- [1] Novák J.: Metody vyhodnocování interferenčních polí pro měření tvaru a deformací ploch. [Doktorská práce (Ph.D.)]. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2002.
- [2] Malacara D., Servin M., Malacara Z.: Interferogram analysis for optical testing. Marcel Dekker Inc., New York 1998.
- [3] Creath K.: Phase - measurement interferometry techniques, Progress in Optics Vol.XXVI, E.Wolf, ed., Elsevier Science, Amsterdam 1988.
- [4] Robinson D.W., Reid G.T.: Interferogram analysis: Digital fringe pattern measurement techniques, Institute of Physics Publishing, Bristol, 1993.
- [5] Ghiglia D.C., Pritt M.D.: Two-dimensional phase unwrapping: Theory, algorithms and software, John Wiley & Sons, Inc., New York 1998.
- [6] Novák J., Mikš A.: Modern techniques for evaluation of phase of wave field. Proceedings of the Conference New Trends in Physics. Brno 2004, s. 250-253.
- [7] Mikš A., Novák J.: Fringe tracing technique in the process of optical testing. Proceedings of International Workshop: Physical and Material Engineering 2002. Prague: CTU, 2002, 73-76.
- [8] Novák J., Mikš A.: Least-squares fitting of wavefront using rational function. Optics and Lasers in Engineering. 2005, vol. 43, no. 7, p. 776-787.
- [9] Mikš A., Novák J.: Methods for wavefront approximation. Proceedings of the International Conference Mathematical and Computer Modelling in Science and Engineering. Prague: CTU, 2003, s. 250-254.
- [10] Takeda M., Ina H., Kobayashi S.: Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry. J. Opt. Soc. Am. Vol.72, No.1, 1982, pp.156.
- [11] Kreis T. M., Jueptner W. P.: Fourier transform evaluation of interference patterns: demodulation and sign ambiguity. SPIE Proceedings. Vol.1553, 1992, pp.263-273.
- [12] Surrel Y.: Design of algorithms for phase measurements by the use of phase stepping. Appl. Opt. Vol.35, No.1, 1996, pp.51-60.
- [13] Robinson D. W., Williams D. C.: Digital phase stepping speckle interferometry. Opt. Comm. Vol.57, No.2, 1986, pp.26-30.
- [14] Novák J.: Five-step phase-shifting algorithms with unknown values of phase shift. Optik: International Journal for Light and Electron Optics. 2003, vol. 114, no. 2, s. 63-68.
- [15] Novák J., Mikš A.: Modern optoelectronic methods for non-contact deformation measurement in industry. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. 2002, vol. 4, no. 6, s. 413-420.
- [16] Novák J.: Analysis of phase evaluation algorithms in an interferometric method for static deformation measurement. Acta Polytechnica. 2002, vol. 42, no. 4, s. 35-41.
- [17] Novák J.: New phase shifting algorithms insensitive to linear phase shift errors. Acta Polytechnica. 2002, vol. 42, no. 4, s. 51-56.
- [18] Mikš A., Novák J.: Interferometric method for deformation measurement of structures in industry. SPIE Proceedings, Vol. 5036. Washington: SPIE, 2002, s. 20-24.

- [19] Novák J., Mikš A.: Comparison of multiframe phase-shifting algorithms with unknown value of phase shift. SPIE Proceedings, Vol. 5144. Washington: SPIE, 2003, s. 86-95.
- [20] Mikš A., Novák J.: Phase-shifting microwave interferometry for nondestructive testing. Proceedings of SPIE Vol. 6158, Washington: SPIE, 2006, p. 154-158.
- [21] Wyant J. C.: Advances in interferometric surface measurement. SPIE Proceedings. Vol.6024, 2005, pp.1-11.
- [22] Brock N., Hayes J., Kimbrough B., Millerd J., North-Morris M., Novak M., Wyant J. C.: Modern approaches in phase measuring metrology. SPIE Proceedings. Vol.5856, 2005, pp.14-22.
- [23] Primot J.: Three-wave lateral shearing interferometer. Appl. Opt. Vol.32, No.31, 1993, pp.6242-6249.
- [24] Velghe S., Primot J., Guérineau N., Cohen M., Wattellier B.: Wave-front reconstruction from multidirectional phase derivatives generated by multilateral shearing interferometers. Optics Letters. Vol.30, No.3, 2005, pp.245-247.
- [25] Chanteloup J.-C.: Multiple-wave lateral shearing interferometry for wave-front sensing. Appl. Opt. Vol.44, No.9, 2005, pp.1559-1571.
- [26] Mikš A., Novák J., Novák P.: Colorimetric method for phase evaluation. J. Opt. Soc. Am. A. 2006, vol. 23, no. 4 ,p. 894-901.
- [27] Mikš A., Novák J.: Kolorimetrické vyhodnocování malých fázových změn vlnového pole. Jemná mechanika a optika, 2006, roč.51, č.7-8, s.203-208.
- [28] Novák J., Novák P., Mikš A.: A compact shearing interferometer for testing optical systems. Proceedings of SPIE Vol. 5856 . Washington: SPIE, 2005, s. 581-588.
- [29] Ichikawa K., Lohmann A. W., Takeda M.: Phase retrieval based on the irradiance transport equation and the Fourier transform method: experiments. Appl. Opt. Vol.27, No.16, 1988, pp.3433-3436.
- [30] Gureyev T. E., Roberts A., Nugent K. A.: Phase retrieval with the transport-of-intensity equation: matrix solution with use of Zernike polynomials. J. Opt. Soc. Am. Vol.12, No.9, 1995, pp.1932-1941.
- [31] Gureyev T. E., Nugent K. A.: Phase retrieval with the transport-of-intensity equation. II. Orthogonal series solution for nonuniform illumination. J. Opt. Soc. Am. Vol.13, No.8, 1996, pp.1670-1682.
- [32] Brady G.R., Fienup J.R.: Nonlinear optimization algorithm for retrieving the full complex pupil function. Optics Express Vol.14, No.2, 2006, pp.474-485.
- [33] Ragazzoni, R.: Pupil plane wavefront sensing with an oscillating prism. J. Modern Opt., 43, 1996, pp.289–293.
- [34] Mikš A., Novák J.: Non-contact measurement of static deformations in civil engineering. Proceedings of ODIMAP III. Pavia: University of Pavia, 2001, s. 57-62.
- [35] Mikš A., Novák J.: Ray methods for measurement of static deformation of optically rough surfaces. SPIE Proceedings, Vol. 5036. Washington: SPIE, 2002, s. 107-112.
- [36] Hartmann, J.: Bemerkungen über den Bau und die Justierung von Spektrographen. Z.Instrumentenk., 20,1900, pp.47.
- [37] Platt B.C., Shack R.: History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing. Journal of Refractive Surgery, Vol.17, 2001, pp.573-577.

- [38] Zou W., Zhang Z.: Generalized wave-front reconstruction algorithm applied in a Shack Hartmann test. *Appl. Opt.* Vol.39, No.2, 2000, pp.250-268.
- [39] Southwell W. H.: Wave-front estimation from wave-front slope measurements. *J. Opt. Soc. Am.* Vol.7, No.8, 1980, pp.998.
- [40] Cubalchini R.: Modal wave-front estimation from phase derivative measurements. *J. Opt. Soc. Am.* Vol.69, No.7, 1979, pp.972.
- [41] Talmi A., Ribak E.: Wavefront reconstruction from its gradients. *J. Opt. Soc. Am.* Vol.23, No.2, 2006, pp.288-297.
- [42] Topa D. M.: Optimized methods for focal spot location using center-of-mass algorithms. *SPIE Proceedings.* Vol.4769, 2002, pp.116-129.
- [43] Bará S.: Measuring eye aberrations with Hartmann-Shack wave-front sensors: Should the irradiance distribution across the eye pupil be taken into account?. *J. Opt. Soc. Am.* Vol.20, No.12, 2003, pp.2237-2245.
- [44] Forest C. R., Canizares C. R., Neal D. R., McGuirk M., Schattenburg M. L.: Metrology of thin transparent optics using Shack-Hartmann wavefront sensing. *Opt. Engineering.* Vol.43, No.3, 2004, pp.742-753.
- [45] Novák J., Novák, P.: Analysis of algorithms for wave-front reconstruction from its gradient. *Proceedings of International Workshop: Physical and Material Engineering 2005.* Prague: Czech Technical University in Prague, 2005, s. 147-150.
- [46] Novák J., Novák, P., Mikš A.: Wave-front sensor for testing imaging quality of optical systems. *Proceedings of International Workshop: Physical and Material Engineering 2005.* Prague: Czech Technical University in Prague, 2005, s. 130-135.
- [47] Novák J., Mikš A., Novák P.: Application of Shack-Hartmann wave-front sensor for testing optical systems. *XV Czech-Polish-Slovak Optical Conference, Liberec 2006.* (bude publikováno ve SPIE Proceedings)
- [48] Pfund J., Lindlein N., Schwider J.: Misalignment effects of the Shack -Hartmann sensor. *Appl. Opt.* Vol.37, No.1, 1998, pp.22-27.
- [49] Seifert L., Tiziani H. J., Osten W.: Wavefront reconstruction with the adaptive Shack Hartmann sensor. *Opt. Comm.* Vol.245, No.1-6, 2005, pp.255-269.
- [50] Lindlein N., Pfund J., Schwider J.: Algorithm for expanding the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using a spatial light modulator. *Opt. Eng.* Vol.40, No.5, 2001, pp.837-840.
- [51] Junwon L., Shack R.V., Descour M.R.: Sorting method to extend the dynamic range of the Shack-Hartmann wave-front sensor. *Appl. Opt.* Vol.44, No.23, 2005, pp.4838-4845.
- [52] Pfund J., Lindlein N., Schwider J.: Dynamic range expansion of a Shack-Hartmann sensor by use of a modified unwrapping algorithm. *Optics Letters.* Vol.23, No.13, 1998, pp.995-997.
- [53] Porter J., Queener H., Lin J., Thorn K., Awwal A.A.S.: *Adaptive optics for vision science: Principles, practices, design and applications.* Wiley-Interscience, New York 2006.
- [54] Dickey F.M., Holswade S.C.: *Laser beam shaping: Theory and techniques.* CRC Press 2000.

6. Životopis

Jméno: Ing. Jiří Novák, Ph.D.

Narozen: 1.8.1975, Slaný

Vzdělání:

- 1989-1993 gymnázium v Libni, obor: matematika a fyzika
- 1993-1999 inženýrské studium Fakulta stavební ČVUT v Praze,
promoval s vyznamenáním
- 1999-2002 postgraduální studium Fakulta stavební ČVUT v Praze,
absolvoval s vyznamenáním
- Název disertační práce „Metody vyhodnocování interferenčních polí pro měření tvaru a deformací ploch“

Zaměstnání:

- od r.2001 odborný asistent na katedře fyziky
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Thákurova 7
166 29 Praha
tel: +420-224354435
fax:+420-233333226
e-mail: novakji@fsv.cvut.cz

Výuka:

- přednášení v základních kurzech fyziky Fyzika (2004-2007) a Fyzika 2 (2005-2007),
- přednášení v kurzu Aplikovaná Optika (2005-2007)
- přednášení v kurzech Počítačové modelování v Matlabu I, II (2006-2007)
- výuka laboratorních cvičení a seminářů z předmětů Fyzika, Fyzikální praktikum, Fyzikální seminář 1-3, Počítačové modelování v Matlabu,...
- autor multimediálního informačního zdroje pro výuku fyziky webFyzika (webFyzika.fsv.cvut.cz)
- působí jako školitel-specialista 2 doktorandů

Oblasti výzkumu:

- aplikovaná optika
- měřicí a diagnostické metody v průmyslové metrologii
- metody analýzy elektromagnetických polí v oblasti optiky
- metody vyhodnocování fáze vlnových polí
- počítačové modelování ve fyzice

Grantové projekty, spolupráce na výzkumu, ocenění:

2003-2005	GA ČR 103/03/P001 - Novák, J. (odpovědný řešitel)
2005	FRV 545/F1d - Novák, J. (odpovědný řešitel)
2002	CTU CTU0200311 - Novák, J. (odpovědný řešitel)
2001	CTU 300100111 - Novák, J. (odpovědný řešitel)
2004	CTU CTU0412411 - Novák, J. (odpovědný řešitel)
2004	FRV 1909/A – (spoluřešitel)
2005-dosud	výzkumný záměr MSM6840770022 - (jmenov.spolupracovník)
2002-2004	GA ČR 202/02/0314 - (jmenov.spolupracovník)
2004-2006	GA ČR 102/04/0898 - (jmenov.spolupracovník)
2004-2007	Spolupráce na výzkumu s Meopta Optika, a.s. jako vedoucí 2 vědeckovýzkumných týmů na aplikaci moderních optických měřicích a vyhodnocovacích metod pro průmyslovou kontrolu výroby
2001	Cena Josefa Hlávky

Odborné publikace

- publikoval více než 150 odborných prací v časopisech a sbornících z mezinárodních a tuzemských konferencí (15 článků v recenzovaných mezinárodních časopisech, 11 článků v tuzemských odborných časopisech, 32 příspěvků v recenzovaných sbornících SPIE Proceedings), je autorem 3 vysokoškolských skript
- více než 30 citací na své práce
- editor sborníků z pravidelně pořádaných konferencí *Physical and Material Engineering* a *Mikroskopie*

Členství ve vědeckých a odborných organizacích, pořádání konferencí:

- Člen několika tuzemských i mezinárodních odborných organizací: SPIE – the International Society for Optical Engineering, Czech Society for Photonics, Jednota českých matematiků a fyziků, Česká společnost pro vědeckou kinematografii.
- Organizátor a spoluorganizátor několika mezinárodních a tuzemských konferencí (Physical and Material Engineering 2002,2005, Mikroskopie 2002,2004, Aplikovaná optika a mikroskopie 2007). Člen programových výborů mezinárodních konferencí (Optics and Photonics 2006 - Orlando, Optics and Optoelectronics 2007 - Prague).