

UNIVERZITA PALACKÉHO
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA OPTIKY



Experimentální realizace adaptivního systému

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Bohumil Stoklasa

2009

UNIVERZITA PALACKÉHO
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA OPTIKY



Experimentální realizace adaptivního systému

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor:	Bc. Bohumil Stoklasa
Studijní program:	M1701 Fyzika
Studijní obor:	Optika a optoelektronika
Forma studia:	prezenční
Vedoucí práce:	Mgr. Radek Čelechovský Ph.D.
Práce odevzdána dne:

Bibliografická identifikace

Autor: Bohumil Stoklasa

Název práce: Experimentální realizace adaptivního systému

Typ práce: Magisterská

Pracoviště: Katedra optiky

Vedoucí práce: Mgr. Radek Čelechovský Ph.D.

Rok obhajoby práce: 2009

Abstrakt:

Práce popisuje sestavu adaptivní optiky, jež vznikla na Katedře optiky Univerzity Palackého v Olomouci, jejímž jádrem je systém nizozemské firmy OKO Technologies. Ten se skládá z deformovatelného zrcadla, elektroniky pro zrcadlo, Shack-Hartmanova detektoru a řídicího softwaru. Systém byl oživen a doplněn o další optické komponenty. Poté bylo provedeno několik typů experimentů pro zjištění jeho možností. Tyto experimenty ukázaly, že je možno systém použít jako generátor fázových rozložení, pro korekci statických a pomalu měnících se aberací optických zobrazovacích systémů, popřípadě k umělému zavádění aberací a pozorování jejich vlivu na zobrazování. Jako funkční sestava je tedy připraven pro využití ve výukových programech univerzity se zaměřením na optiku.

Klíčová slova: adaptivní optika, deformovatelné zrcadlo, Shack-Hartmanův detektor

Počet stran: 36

Jazyk: Český

Bibliographical identification

Author: Bohumil Stoklasa

Title: Experimental realization of adaptive system

Type thesis: Diploma thesis

Department: Department of Optics

Supervisor: Mgr. Radek Čelechovský Ph.D.

The year of presentation: 2009

Abstract:

Thesis describes adaptive optics setup, which has been created in Palacký University wave optics laboratory. The base of setup is system of OKO technologies company. It consists of deformable mirror, electronics, Shack-Hartman detector and special software. We added another optics components and sources to complete the setup. Then we did several experiments to test functionality of setup. They proved that system is able to work as a phase generator, as a corrector of static and slow changing phase errors and we could use it to demonstrate influences of phase errors to intensity detection. System is ready for use in optics lectures in Palacký University.

Keywords: adaptive optics, deformable mirror, Shack-Hartman detector

Number of pages: 36

Language: Czech

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Mgr. Radku Čelechovskému Ph.D., za seznámení s prostředím laboratoře a pomoci při sestavování experimentální sestavy. Dále bych chtěl poděkovat Ing.RNDr. Janu Podlouckému za cenné rady při experimentální práci.

Prohlášení

Prohlašuji, že práci jsem sepsal bez cizí pomoci, pod vedením Mgr. Radka Čelechovského Ph.D., z využitím literatury uvedené v seznamu na konci práce.
V Olomouci, srpen 2009,

Bohumil Stoklasa

Obsah

1	Úvod	3
2	Principy adaptivní optiky	5
2.1	Fázové rozložení optického svazku	5
2.1.1	Základní definice	5
2.1.2	Rozklad do Zernikeových polynomů	6
2.1.3	Fázové rozložení a vlnové vady	7
2.1.4	Dynamické vlnové vady	8
2.1.5	Princip fázové konjugace	8
2.2	Regulační schéma adaptivního optického systému	9
2.2.1	Regulační okruh	9
2.2.2	Chování regulačního okruhu	10
2.2.3	Základní prvky regulačního okruhu u adaptivní optiky	12
2.3	Shack-Hartmanův detektor	12
2.3.1	Fyzikální aspekty detekce	12
2.3.2	Matematické aspekty detekce	13
2.4	Deformovatelné zrcadlo	14
2.4.1	Fyzikální aspekty regulace	14
2.4.2	Matematické aspekty regulace	15
2.5	Zpracování dat v regulační smyčce	16

3	Adaptivní systém na katedře optiky	18
3.1	Základní technické schéma adaptivní optiky	19
3.2	Deformovatelné zrcadlo	20
3.3	Elektronika pro deformovatelné zrcadlo	20
3.4	Shack-Hartmanův detektor	21
3.5	Software FrontSurfer	22
3.6	Experimentální sestava	22
3.7	Dynamické parametry	25
4	Experimentální výsledky	26
4.1	Korekce zobrazení	26
4.2	Generace obecných fázových rozložení	27
4.3	Dynamický rozsah kompenzace a generace základních vlnových aberací	28
4.4	Vliv vlnových aberací na zobrazení	28
4.5	Kompenzace dynamických fázových změn	29
5	Závěr	34

Kapitola 1

Úvod

Adaptivní optika je dnes již známým pojmem moderní optoelektroniky. Slovem adaptivní se rozumí, že optický systém obsahuje optický prvek s říditelnými parametry, které nastavujeme tak, abychom optimalizovali výstup celého systému. Je tedy jasné, že dále musí být přítomen detektor sledující hodnoty výstupu a řídicí mechanismus, jenž dokáže vygenerovat takové parametry pro proměnný prvek, které vedou k optimalizaci. Takovéto problémy spadají do oboru řízení a regulace a adaptivní optický systém lze popisovat za pomoci názvosloví těchto oborů.

Adaptivní optika využívá faktu, že fázové poruchy v optických systémech výrazně ovlivňují intenzitní detekci, o kterou nám obvykle jde. Například u zobrazovacích systémů dostáváme neostrý obraz, u výkonových laserových systémů klesá maximální intenzita ve fokální rovině apod. Proto se adaptivní optika zaměřuje na odstranění fázových poruch a dosažení ideálního rozložení fáze zpracovávaného optického záření na svém výstupu. Sledovanou veličinou je tedy rozložení fáze v určité výstupní rovině, říditelným prvkem v adaptivní optice je fázový modulátor a detektorem detektor fáze. Nejčastější realizací těchto prvků v dnešních adaptivních systémech jsou deformovatelná zrcadla

a fázové modulátory s kapalnými krystaly, jako detektory se využívají Shack-Hartmanovy senzory a střihové interferometry.

Na takovéto bázi existují dnes již dobře ověřené, i komerčně vyráběné systémy. Využití nalézají v astronomii [1], v oftalmologii [2] či ve vysokovýkonových laserových pulzních systémech [3]. Z tohoto důvodu katedra optiky přistoupila k zakoupení adaptivního systému od firmy OKO Technologies, za primárním účelem začlenit do výuky v laboratoři princip adaptivních systémů a jejich možnosti. Zmíněný systém sestává z deformovatelného zrcadla, elektroniky, Shack-Hartmanova detektoru a řídicího softwaru.

Úkolem této práce bylo systém doplnit o další komponenty a vytvořit typickou laboratorní sestavu adaptivní optiky, jakou můžeme nalézt například v [4]. Poté na základních experimentech prověřit její funkčnost, a tím nastínit možnosti využití pro potřeby katedry optiky.

V další kapitole budou zmíněny základní teoretické aspekty adaptivních systémů, poté následuje kapitola věnující se parametrům realizované sestavy a konečně v poslední kapitole jsou prezentovány výsledky měření a pokusů. V závěru jsou diskutovány možnosti využití na základě experimentálních zkušeností.

Kapitola 2

Principy adaptivní optiky

Za pomoci teorie řízení můžeme adaptivní optický systém definovat jako regulátor fázového rozložení optického svazku. V následující kapitole se budeme snažit podat teoretické zdůvodnění tohoto tvrzení a osvětlit význam parametrů, které z toho plynou pro realizaci reálné sestavy adaptivní optiky v laboratoři.

2.1 Fázové rozložení optického svazku

2.1.1 Základní definice

Řekli jsme, že adaptivní optika se chová jako regulátor fázového rozložení optického svazku. Vymezíme si tedy nejprve pojem fázového rozložení svazku z pohledu vlnové optiky [6].

Budeme uvažovat monochromatickou vlnu, která se šíří optickým systémem centrovaným kolem osy z . Její časově nezávislou část můžeme popsat pomocí komplexní amplitudy ve tvaru

$$U(x, y, z) = A(x, y, z) \exp[-ik_0(z + S(x, y))], \quad (2.1)$$

kde $A(x, y, z)$ je amplituda vlny, k_0 vlnový vektor vlny ve vakuu a

$$k_0 z + k_0 S(x, y) \quad (2.2)$$

je fáze vlny. Pokud zafixujeme souřadnici z_0 a budeme tak vyšetřovat fázy v rovině kolmé na osu z , pak člen $k_0 z_0$ popisuje konstantní složku fáze odpovídající rovinné vlně postupující podél osy z v místě o souřadnici z_0 , a člen $k_0 S(x, y)$ vyjadřuje odchylku od tohoto rovnoměrného rozložení. Konstantní složka není pro nás zajímavá, zajímavou informaci nese funkce $S(x, y)$. Proto nás bude v dalším textu zajímat právě ona. Veličinu $S(x, y)$ lze ztotožnit s eikonálovou funkcí paprskové optiky [6], a vyjadřuje tak optickou vzdálenost od zdroje záření podél určitého paprsku [10].

2.1.2 Rozklad do Zernikeových polynomů

Funkci $S(x, y)$ můžeme kromě kartézské souřadné soustavy reprezentovat v jiné bázi. Ukazuje se, že pro potřeby optických systémů může být výhodné ji reprezentovat v bázi Zernikeových polynomů. Ty jsou definovány za pomoci polárních souřadnic (ρ, θ) a přirozených čísel (n, m) , kde $n \geq m \geq 0$. A to jako v [8]:

$$\begin{aligned} Z(n, -m) &= R_n^m(\rho) \cos(m\theta) \\ Z(n, m) &= R_n^m(\rho) \sin(m\theta), \end{aligned} \quad (2.3)$$

kde radiální část R_n^m je

$$R_n^{\pm m}(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} (-1)^s \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s}. \quad (2.4)$$

Pokud zavedeme souhrnný index k pro každou přípustnou dvojici indexů (n, m) , pak funkci $S(x, y)$ rozložíme jako

$$S(x, y) = \sum_{k=0}^K a_k Z_k(\rho, \theta) + \delta\phi(\rho, \theta), \quad (2.5)$$

kde K je počet polynomů, které jsme pro rozklad použili a $\delta\phi(\rho, \theta)$ je chyba, které se dopouštíme uvažováním pouze konečného počtu polynomů [5].

Reprezentace v této bázi má výhodu v propojení s teorií vlnových aberací. Nejnižší polynomy lze totiž ztotožnit se známými aberacemi. V tabulce 2.1 jsou uvedeny známé vlnové aberace třetího řádu a jejich ekvivalenty mezi Zernikeovými polynomy.

$Z(1, \pm 1)$	náklon
$Z(2, 0)$	rozostření
$Z(2, \pm 2)$	astigmatismus
$Z(3, \pm 1)$	koma
$Z(4, 0)$	sférická vada

Tabulka 2.1: Význam některých Zernikeových polynomů jako vlnových vad

Právě tato vlastnost činí Zernikeovy polynomy názorné pro adaptivní optiku, protože jejím úkolem je většinou právě tyto základní vlnové aberace odstraňovat. Parametrem, jenž se v této souvislosti objevuje při nastavování reálné sestavy, je počet polynomů, které jsou využity pro vyjádření $S(x, y)$.

2.1.3 Fázové rozložení a vlnové vady

Již v předchozím odstavci jsme zmínili propojení funkce $S(x, y)$ a vlnových vad pomocí Zernikeových polynomů. Uvažovali jsme, že funkce $S(x, y)$ představuje odchylku od konstantní složky, tj. rovinné vlny. Vlnové aberace se však zavádí většinou při optickém zobrazení. Potom $S(x, y)$ představuje od-

chylku od ideální konvergentní sférické vlny, která má střed v ideálním obrazovém bodě a prochází středem výstupní pupily zobrazovacího systému.

V obou dvou případech má ale funkce $S(x, y)$, a její rozklad do Zernikeových polynomů, stejný význam. Vyjadřuje nechtěné fázové poruchy od ideálního rozložení fáze, tedy vlnové vady.

Podle vlnové teorie zobrazení zhoršují výrazně tyto poruchy intenzitní detekci [10][11]. Pokud budeme kvalitu zobrazení hodnotit například podle rozptylové funkce bodu, budou nám vlnové vady měnit tvar a velikost této funkce, což vede k horší detekci signálu. Při nulové funkci $S(x, y)$ v dané výstupní rovině budeme již při detekci omezeni jen difrakcí na konečných rozměrech daného systému, a dosáhneme ideálního stavu.

2.1.4 Dynamické vlnové vady

Tyto fázové poruchy mohou být statické, tedy způsobeny již neměnnými prvky a prostředími, kterými optické záření prochází. Pokud ale dochází například k dynamické změně optických parametrů prostředí, budou v čase proměnné i fázové poruchy, a musíme psát $S(x, y, t)$, kde t značí čas. Pro dosažení ideální, pouze difrakcí omezené detekce, musíme tedy být schopni v reálném čase tyto poruchy eliminovat, a tedy $S(x, y, t) = 0$.

2.1.5 Princip fázové konjugace

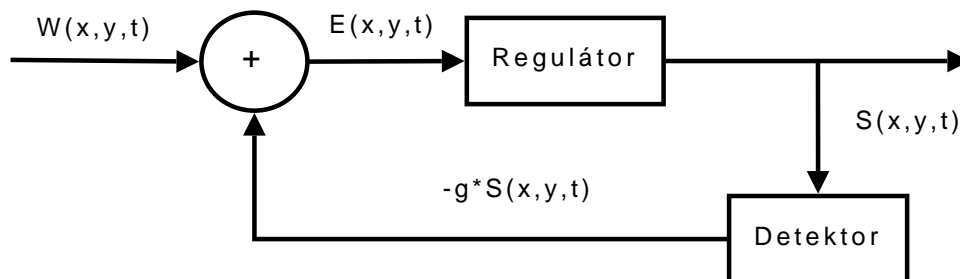
Rozložení $S(x, y, t) = 0$ dosáhneme principem fázové konjugace. Pro fázově konjugovaný signál bude totiž platit, že jeho $S(x, y, t) = -S(x, y, t)$ [6]. Sloučením původního svazku s jeho fázově konjugovanou formou pak dosáhneme uniformního rozdělení fáze výsledného svazku, což značí potlačení vlnových abearcí.

2.2 Regulační schéma adaptivního optického systému

V minulé sekci bylo rozebráno, že pro kvalitní intenzitní detekci je potřeba dosáhnout nulového rozdělení $S(x, y, t) = 0$ pro všechny časy t . To je typický problém regulačních obvodů [12], kde se pod pojmem regulace rozumí proces udržující určitou veličinu v blízkosti požadované hodnoty. V našem případě se jedná o $S(x, y) = 0$. Rozdíl od této hodnoty se nazývá regulační diference, a ta by měla být nulová.

2.2.1 Regulační okruh

Pro zajištění regulace musí být realizován regulační okruh, který obsahuje nastavovací část s regulátorem a zpětnou vazbu s detektorem: regulátor danou veličinu mění, detektor tyto změny zaznamenává. Schéma takového obvodu je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Schéma regulačního obvodu u adaptivního systému: $W(x, y, t)$ je fázové rozdělení vstupního svazku, $E(x, y, t)$ je regulační diference, $S(x, y, t)$ je fázové rozdělení výstupního svazku a g je parametr zpětné vazby

Vidíme, že do smyčky vstupuje optický svazek, u kterého funkci $S(x, y, t)$ značíme $W(x, y, t)$. Ten je smíchán se signálem ze zpětnovazební smyčky a

vzniká tak regulační diference $E(x, y, t)$. Tato diference je postoupena regulátoru, který se změnou svých parametrů snaží udržet ji na minimální hodnotě. Výsledný svazek za regulátorem s funkcí $S(x, y, t)$ je rozdělen do výstupu obvodu a na detektor. Za detektorem pak pokračuje signál $S(x, y, t)$ do vstupního směšovače, ale násobený konstantou zpětné vazby g . Je to jeden ze dvou základních parametrů regulačního okruhu.

Tím druhým je pak časové zpoždění mezi detekcí výstupního signálu a změnou parametrů na regulátoru. Je způsobeno integrační povahou detekce, výpočetním časem potřebným pro nalezení nových parametrů regulátoru a časem potřebným pro fyzické nastavení těchto parametrů. Toto časové zpoždění budeme značit τ . V dalším bude rozebráno chování okruhu a vliv parametrů g a τ .

2.2.2 Chování regulačního okruhu

Chování regulačního obvodu vyšetříme jako v [13]. Podrobněji je problematika rozebrána v [1]. Pro jednoduchost budeme uvažovat jednodimenzionální problém.

U časově neproměnné vstupní funkce $W(x, y)$ se po sepnutí smyčky dosáhne po několika iteracích regulačního obvodu $S(x, y) = 0$. Rychlost tohoto jevu závisí na konstantách g a τ . U časově proměnné funkce $W(x, y, t)$ je problém složitější.

Zafixujme prostorové souřadnice (x, y) a sledujme funkce $W(t)$, $E(t)$, $S(t)$, které jsou nyní pouze funkcemi času a vyjadřují fázovou chybu v daném místě prostoru. Je výhodné převést tyto funkce i do frekvenčního prostoru pomocí Fourierovy transformace a obdržíme $\overline{W}(\omega)$, $\overline{E}(\omega)$, $\overline{S}(\omega)$. Pak $\overline{E}(\omega_0) = \overline{W}(\omega_0) - \overline{S}(\omega_0)$ značí schopnost okruhu korigovat sinusovou fázovou změnu o frekvenci ω_0 .

Pokud vezmeme, že časové zpoždění mezi detekcí a regulací τ způsobí při dané frekvenci ω_0 fázový posuv $\theta = \omega_0\tau$, můžeme psát

$$E(t) = W(t) - S(t) = \sin(\omega_0 t) - g \sin(\omega_0 t + \theta), \quad (2.6)$$

který může být přepsán jako

$$E(t) = G \sin(\omega_0 t - \xi) \quad (2.7)$$

kde

$$G^2 = 1 + g^2 - 2g \cos(\theta) \quad (2.8)$$

a

$$\tan(\xi) = \frac{g \sin(\theta)}{1 - g \cos(\theta)}. \quad (2.9)$$

Aby regulace dané fázové chyby $E(t)$ byla úspěšná, musí platit, že $G < 1$. V opačném případě by totiž regulační diference převýšila regulovaný signál a obvod by začal divergovat. Z toho plyne podmínka pro stabilitu celého obvodu, a to

$$g(\omega) < 2 \cos(\theta). \quad (2.10)$$

Z (2.10) je vidět, že existuje určitá mezní frekvence ω_{mez} korekce fázových změn, která závisí na časovém zpoždění v okruhu. Pokud totiž $\cos(\theta) = 0$, musí být též $g(\omega_{mez}) = 0$, a to znamená, že neexistuje zpětná vazba a okruh není uzavřen. Z podmínky (2.10) též plyne, že zvolením hodnoty $g \in (0, 2)$ vybíráme frekvenční pásmo korekce regulačního okruhu. Při pevném g totiž existuje mezní frekvence, za níž již podmínka (2.10) neplatí a regulační okruh tak diverguje.

2.2.3 Základní prvky regulačního okruhu u adaptivní optiky

Základní schéma obecného charakteru, jenž je rozebráno výše, má v konkrétních aplikacích adaptivní optiky tyto realizace.

Jako detektor se nejčastěji využívá Shack-Hartmanův detektor, díky své rychlosti a snadné interpretovatelnosti výsledků. Pojednává o něm sekce 2.3. Jako regulátor se využívá deformovatelné zrcadlo, které je schopno lokálně měnit profil svého povrchu. Slouží zároveň jako směšovač, protože svým tvarem aplikuje signál ze zpětné vazby do přicházejícího svazku ze vstupu, který se na něm odráží. Podrobně o deformovatelných zrcadlech a jejich principech hovoří sekce 2.4. Důležitým pojítkem zajišťujícím zpětnou vazbu je výpočetní program na PC. Má na starosti rekonstrukci $S(x, y, t)$ z dat detektoru a vypočítává novou sadu řídicích signálů pro regulátor. O základním programovém schématu zpětné vazby pojednává sekce 2.5.

2.3 Shack-Hartmanův detektor

Základem upravování $S(x, y)$ na výstupu je možnost detekce tohoto rozložení. Nejčastěji se u adaptivní optiky, a je to i případ našeho systému, využívá Shack-Hartmanova detektoru, který pracuje na principu měření gradientu $\nabla S(x, y)$ [1].

2.3.1 Fyzikální aspekty detekce

Detektor sestává z matice N mikročoček, které slouží k prostorovému skenování přicházejícího svazku. V jejich ohnisku se nalézají CCD kamera, která zaznamenává vzniklý obraz. Každá mikročočka vytváří na kameře difrakční

obrazec, u něhož identifikujeme jeho těžiště $m_n[x, y]$.

Pokud na vstupu detektoru bude jako reference rovinná vlna, pro níž platí $S(x, y) = 0$, budou težiště obrazů jednotlivých mikročoček ležet na jejich osách $o_n[x, y]$. U obecné vlny se vlivem lokálního gradientu $\nabla S(x, y)$ na každé mikročočce posune $m_n[x, y]$ mimo tuto osu a měření gradientu je převedeno na měření $m_n[x, y] - o_n[x, y]$. Každá mikročočka tak realizuje měření lokálního gradientu $\nabla S(x, y)$, zprůměrovaného přes aperturu mikročočky, a pro získání $S(x, y)$ se využijí numerické postupy. Můžeme tedy rozložení $S(x, y)$ z fyzikálního hlediska reprezentovat vektorem \mathbf{s} o N -členech, vyjadřujících hodnoty $m_n[x, y] - o_n[x, y]$.

Podrobný rozbor dynamiky detektoru a zkreslení, které zavádí do rekonstrukce, lze nalézt v [1][8].

2.3.2 Matematické aspekty detekce

Numerické postupy pro získání $S(x, y)$ lze nalézt například v [4] [8]. Tyto metody jsou založeny na módovém přístupu, kde základní bází je báze Zernikeových polynomů. Funkci $S(x, y)$ hledáme tedy ve tvaru 2.5.

Vstupem rekonstrukčního algoritmu je vektor \mathbf{s} s rozměrem N , který se získá ze snímku CCD kamery. Dalším vstupem, který se určuje výpočtem je odezva detektoru na jednotlivé Zernikeovy polynomy. Tyto odezvy se počítají ze znalosti geometrie detektoru, tj. z prostorového rozložení mikročoček a jejich ohniskové vzdálenosti, a ze znalosti jednotlivých polynomů a jejich parciálních derivací. Pokud pro rozklad použijeme K polynomů, obdržíme tímto postupem matici \mathbf{A} s $K \times N$ členy.

Výstupem algoritmu jsou pak koeficienty rozvoje 2.5 a_k uspořádané do

vektoru \mathbf{a} . Získáme je minimalizací vzdálenosti

$$\sum_{n=1}^N |s_n - \sum_{k=1}^K A_k^n a_k|. \quad (2.11)$$

Tato minimalizace vede k řešení

$$\mathbf{a} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{s}. \quad (2.12)$$

2.4 Deformovatelné zrcadlo

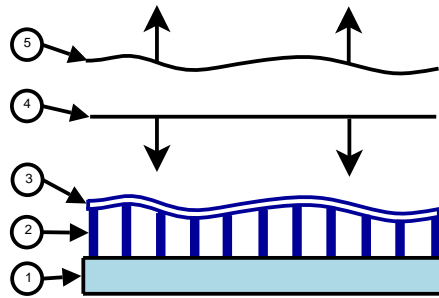
V této sekci bude rozebrána realizace regulátoru fázového rozložení z uvedeného schématu regulačního okruhu. U adaptivní optiky tímto regulátorem často bývá deformovatelné zrcadlo, které zároveň plní úlohu směšovače signálu se zpětné vazby se vstupním signálem.

2.4.1 Fyzikální aspekty regulace

Deformovatelné zrcadlo, jakožto regulátor fázového rozložení, má tu vlastnost, že dokáže měnit profil svého povrchu, jenž můžeme popsat funkcí $P(x, y)$. Technická realizace takového deformovatelného zrcadla může spočívat v tenké pokovené destičce, která je prohýbána m piezo posuvy, přičemž každý posuv způsobí deformaci celého povrchu zrcadla $P(x, y)$ [7]. Tvar povrchu zrcadla určujeme tedy m amplitudami na jednotlivých piezo posuvech (aktuátorech). Jak dokazuje [7], musí vždy určitý počet aktuátorů ležet mimo aktivní oblast, a proto nelze využít celou aperturu zrcadla.

Modulace dopadající vlny se pak děje lokální změnou optické dráhy, kterou musí vlna urazit při dopadu na zrcadlo. Uvažujme, že je zrcadlo umístěno ve vzduchu s indexem lomu $n = 1$. Nechť na takovéto zrcadlo dopadá rovinná vlna s funkcí $S(x, y) = 0$, mající tedy jen fázový člen $k_0 z$. Při odrazu od deformovatelného zrcadla se ovšem tento člen mění pro každou dvojici

(x, y) díky profilu zrcadla $P(x, y)$, a tím různé uražené vzdálenosti z . Vlna nemá tedy ve fázi po odrazu jen konstantní člen k_0z , ale obsahuje též člen $k_0S(x, y) = k_02P(x, y)$. V obecném případě má dopadající vlna fázový profil $k_0(z + S(x, y))$ a po odrazu od zrcadla $k_0(z + S(x, y) + 2P(x, y))$. Výše uvedené znázorňuje řez na obrázku 2.2. Vidíme tedy, že deformovatelné zrcadlo



Obrázek 2.2: *Princip deformovatelného zrcadla, řez: 1-základna zrcadla, 2-piezo aktuátory, 3-tenká odrazná destička, 4-přicházející fázový profil rovinné vlny 5-fázový profil odražené vlny, promodulovaný tvarem odrazné destičky*

dokáže změnou svých parametrů měnit fázový profil dopadajícího optického svazku a můžeme ho tedy využít jako fázový modulátor-regulátor.

2.4.2 Matematické aspekty regulace

Jak jsme již zmínili, tvar povrchu zrcadla určujeme M amplitudami na jednotlivých piezo posuvech (aktuátorech). Abychom mohli programově ovládat chování zrcadla, musíme vědět, jak každý řídicí kanál působí na detektor, tedy jakou má odezvu funkci. Budeme předpokládat, že celkovou změnu na výstupu obdržíme jako lineární kombinaci dílčích odezvových funkcí jednotlivých kanálů.

Označme si \mathbf{a}_p odezvu na detektoru při nulovém vektoru \mathbf{c} . Změnu $\Delta \mathbf{a}$ od počátečního rozložení \mathbf{a}_p při přivedení určitého napětí na jeden aktuátor

označme jako naši odezovou funkci. Po provedení tohoto postupu u všech M aktuátorů obdržíme odezovou matici zrcadla \mathbf{B} o dimenzi $M \times K$.

Pak aktuální měření detektoru můžeme zapsat za pomoci aktuální sady řídicích parametrů \mathbf{c} jako [4]

$$\mathbf{a} = \mathbf{B}\mathbf{c} + \mathbf{a}_p. \quad (2.13)$$

2.5 Zpracování dat v regulační smyčce

V této sekci bude rozebráno, které algoritmické kroky musí provést numerický software, aby celý regulační okruh fungoval. Vycházet budeme přitom z [4][8].

Z výpočetního hlediska je nejprve nutné provést rekonstrukci $S(x, y)$ v bázi Zernikeových polynomů, z dat poskytovaných Shack-Hartmanovým detektorem. Tato problematika byla rozberána v sekci 2.3.2. Víme, že jejím výstupem je vektor koeficientů příslušných polynomů \mathbf{a} , a z 2.4.2 víme, že ho můžeme rozložit jako v (2.13).

Jako druhý krok je potřeba provést výpočet řídicích signálů pro regulátor \mathbf{c} , a to vždy pro nový cyklus regulačního okruhu. Můžeme tedy psát \mathbf{c}_i pro i -tý cyklus.

Víme, že požadované výstupní rozložení $S(x, y)$ má být nulové, tedy $\mathbf{a} = 0$. Abychom stanovili kritérium vzdálenosti od tohoto rozložení v určitém cyklu, zavádíme veličinu

$$RMS = \sum_{k=1}^K a_k^2 w_k^2, \quad (2.14)$$

kde k probíhá všechny Zernikeovy polynomy a

$$w_k^2 = \frac{1}{\pi} \iint Z_k(\rho, \theta) d\rho d\theta. \quad (2.15)$$

Integrace se provádí přes jednotkový kruh. Veličiny w_k představují koeficienty podílu jednotlivých Zernikeových polynomů na celkové odchylce od nulového

rozdělení $S(x, y) = 0$. Pokud bude hodnota RMS dostatečně malá, znamená to, že regulační smyčka je blízko svého cílového rozdělení.

Posledním krokem je využití algoritmu pro směřování k minimu funkce (2.14). Principem je určit takovou sadu řídicích parametrů \mathbf{c} , která povede ke zmenšení hodnoty RMS . Matematicky obdržíme, že novou sadu řídicích parametrů \mathbf{c}_i v cyklu i získáme z předchozího cyklu \mathbf{c}_{i-1} jako [4][8]

$$\mathbf{c}_i = \mathbf{c}_{i-1} - g\mathbf{B}^T(\mathbf{a}\mathbf{w}^2), \quad (2.16)$$

kde g zpětné vazby (viz 2.2).

Tento postup se opakuje tolik kroků, kolik je potřeba k dosažení uspokojivě malé hodnoty (2.14). Pokud je \mathbf{a}_p stacionární, dojde k tomu po několika málo krocích. V případě, že \mathbf{a}_p je časově proměnné, záleží na nastavení parametrů regulačního okruhu vzhledem k dynamice změn \mathbf{a}_p .

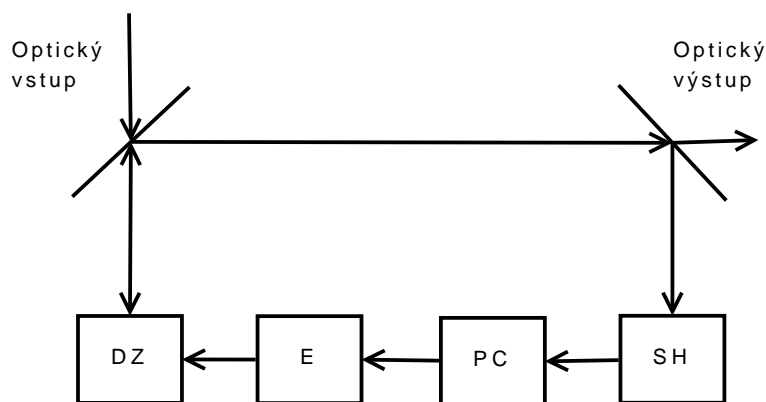
Kapitola 3

Adaptivní systém na katedře optiky

Pro demonstrační účely principů adaptivní optiky, i případné využití ve vědeckých experimentech, byl pro laboratoř vlnové optiky zakoupen adaptivní systém nizozemské firmy OKO Technologies. Ten sestává z deformovatelného zrcadla, jeho ovládací elektroniky, Shack-Hartmanova detektoru a řídicího softwaru FrontSurfer. Tyto základní komponenty tvořící principiální kostru adaptivní optiky byly doplněny o další prvky, aby vzniklá sestava umožňovala provést demonstrační experimenty, které by ukázaly její možnosti. V této sekci je proveden technický popis realizované sestavy i jednotlivých prvků, a tím vlastně zhodnocena první část vlastní práce, spočívající v oživení a sestavení adaptivního systému.

3.1 Základní technické schéma adaptivní optiky

Základní technické schéma adaptivní optiky si popíšeme na obrázku 3.1. Optická vlna na vstupu dopadá na deformovatelné zrcadlo DZ, je tak modulován její fázový profil $S(x, y)$, a po odrazu pokračuje na výstup ze systému a na Shack-Hartmanův detektor, jenž rekonstruuje promodulovaný profil $S(x, y)$. Rekonstrukci provádí software na PC, ten i určuje podle žádáné cílové funkce fázového rozdělení a podle rovnice (2.16) aktualizaci amplitud jednotlivých piezo aktuátorů v relativních hodnotách. Na skutečné hodnoty napětí je převádí elektronika E a aplikuje je na zrcadlo. Korekční smyčka je tak uzavřena a je tvořena z části optickou a z části elektronickou cestou. V dalším budou probrány jednotlivé součásti konkrétní sestavy firmy OKO Technologies.



Obrázek 3.1: *Obecné schéma adaptivní optiky. DZ-deformovatelné zrcadlo, E-elektronika pro řízení zrcadla, PC-osobní počítač, SH-Shack-Hartman*

3.2 Deformovatelné zrcadlo

Dodané zrcadlo je tvořeno základní deskou, na níž je umístěno 37-piezo aktuátorů, které mají vzájemný rozstup 4,3mm, a které nesou tenkou destičku s odrazným povrchem. Tato destička má kruhový tvar o průměru 30mm. Destička může být deformována prodlužováním a zkracováním aktuátorů, což se děje změnou přivedeného napětí na jednotlivé aktuátory. Maximální použitelné napětí V_{max} může měnit uživatel na předřazeném koncovém zesilovači v hodnotách 100-400V. Nejvyšší napětí odpovídá maximálnímu zdvihu aktuátorů, a ten je $8\mu m$. Při provedených experimentech se tato hodnota neměnila a byla nastavena na 150V. Kvůli hysterezi piezo materiálu má zrcadlo i bez přivedených napětí pokaždé jiný výchozí tvar, proto je potřeba před každým použitím provést kalibraci, při které se vytváří odezvovala matice zrcadla **B**. Počáteční výchozí tvar udává výrobce jako převážně sférický, což měření potvrdila. Aperturu zrcadla nelze využít pro modulaci celou, jak bylo uvedeno v 2.4. Aktuální aktivní modulační oblast je určena zobrazením rekonstrukční oblasti detektoru na zrcadlo. Podrobnější informace o tomto typu zrcadla lze získat například v [7].

3.3 Elektronika pro deformovatelné zrcadlo

Deformovatelné zrcadlo se ovládá 37 hodnotami napětí na jednotlivých piezech. Numerický software vyhodnotí tyto napětí v relativních hodnotách $V_n \in (-1, 1)$. Úkolem dvoustupňového elektronického systému je pak převést tyto hodnoty na napěťové signály v rozmezí $V \in (0, V_{max})$. Nejdříve digitálně-analogový 40-kanálový USB převodník zpracuje data z PC na nízkonapěťové signály, a ty jsou pak zesilovačem převedeny na skutečné hodnoty aplikovatelné na piezo posuvy. Obě dvě elektronické komponenty byly do-

dány spolu se zrcadlem. Uživatel má možnost měnit na zesilovači maximální hodnotu napětí V_{max} .

3.4 Shack-Hartmanův detektor

Detektor je v našem případě tvořen hexagonální maskou o 127 mikročočkách a CCD kamerou U-Eye 640×480 pixelů. Frekvence snímání a zpracování snímků kamerou je $66Hz$. Parametry detektoru, jako ohnisková vzdálenost mikročoček, nebo velikost pixelu detektoru se určují kalibrací. S detektorem byl dodán kalibrační soubor, který lze načíst a využít, nebo lze provést předepsanou kalibraci pomocí bodových zdrojů [8]. V našem případě jsme využili kalibrační soubor. Údaje z kalibrace pak slouží k výpočtu odezvy detektoru na ideální referenci v absolutním módu měření (viz. 3.5).

Čistá apertura hexagonální masky je $3,8mm$, pro vyhodnocování vlnoplochy se však nepoužívala celá, a to kvůli podmínce nevyužitelnosti celé apertury deformovatelného zrcadla. Pokud pro ovládání zrcadla nevyužíváme celou aperturu detektoru, znamená to, že nevyužíváme pro modulaci celou plochu zrcadla. Tento parametr nazveme relativní rekonstrukční rádius r a jeho hodnoty mohou být $r \in (0, 1)$.

Pro práci s celým adaptivním systémem se ukázal detektor jako nejvíce limitující součást. Rekonstrukční program rozložení fáze totiž hledá jen 127 jednotlivých intenzitních těžišť vytvářených mikročočkami. Jakákoli parazitní stopa na CCD má za následek určení falešných těžišť, a tím nesprávnou rekonstrukci. V důsledku toho potom nemůže dobře fungovat ani celý adaptivní algoritmus. Proto je třeba při špatné funkčnosti celku vždy nejprve prohlédnout kvalitu obrazu na CCD detektoru.

3.5 Software FrontSurfer

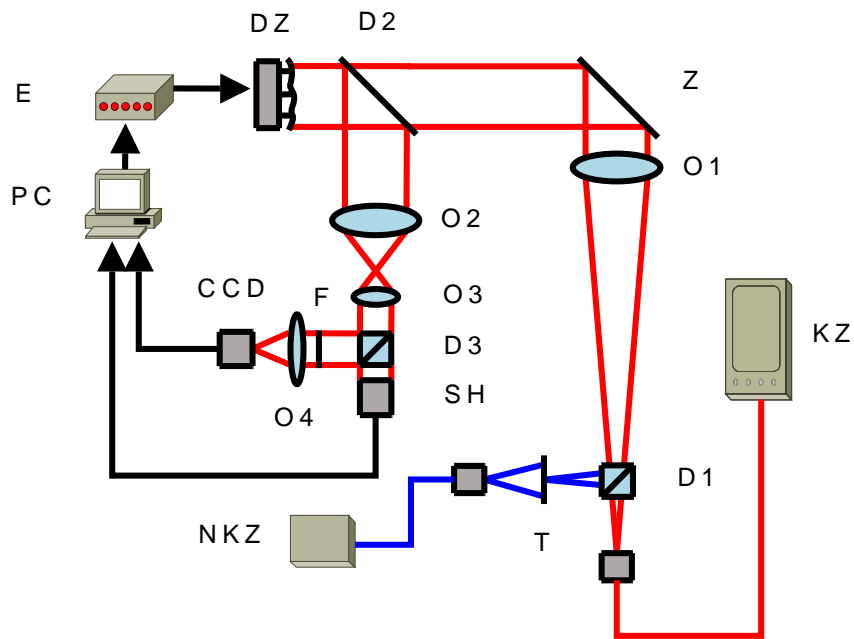
Nastavování parametrů pro rekonstrukci, modulaci a celou adaptivní smyčku se děje v přehledném softwaru FrontSurfer. Provádí veškeré numerické výpočty, propojuje tak detektor a modulátor. Zajišťuje tedy vyhodnocování fázového rozložení, měření odezvových funkcí zrcadla a sestavení odezvové matice \mathbf{B} , a následně také určení aktualizace řídicích signálů zrcadla pro každý cyklus adaptivní smyčky. Pracuje v modálním režimu Zernikeových polynomů. Veškerý popis tohoto programu lze najít v [8].

3.6 Experimentální sestava

Všechny tyto prvky byly doplněny o další komponenty, aby vznikla typická sestava adaptivní optiky. Optické schéma je na obrázku 3.2. V dalším textu bude popsáno, jakou funkci a jaké parametry mají jednotlivé prvky.

V sestavě jsou využity dva typy zdrojů. Prvním je koherentní osvětlení z He-Ne laseru o vlnové délce $633nm$, které je do sestavy přivedeno optickým vláknem. Jeho čelo je v ohniskové rovině objektivu O_1 ($f_1 = 557mm$), který tak funguje jako kolimátor. Jádru vlákna, ze kterého záření vychází, můžeme díky jeho velikosti považovat za bodový zdroj, a proto laserové záření můžeme brát jako dobře prostorově koherentní. Využíváme ho pro trasování fázových poruch sestavy a měření pomocí Shack-Hartmanova detektoru.

Druhým zdrojem je studený nekoherentní zdroj bílého světla s nastavitelnou teplotou chromatičnosti Zeiss KL1500. Jeho úkolem je prosvítit transparentní rozlišovací test T , který je umístěn v ohnisku objektivu O_1 a který se pak zobrazuje na konci sestavy pomocí objektivu O_4 ($f_4 = 80mm$). Jedná se tedy o zobrazení s příčným zvětšením $m = 0,145$. Protože však je v optické cestě ještě reducer svazku tvořený objektivy O_2 ($f_2 = 119mm$) a O_3



Obrázek 3.2: Schéma realizované sestavy: DZ-deformovatelné zrcadlo, SH-Shack-Hartman, PC-osobní počítač, E-elektronika deformovatelného zrcadla Z-normální zrcadlo, D1, D2, D3-děliče svazku, O1, O2, O3, O4- objektivy, F-šedý filtr, KZ-koherentní zdroj světla, NKZ-nekoherentní zdroj světla, T-transparentní test

($f_3 = 16,4\text{mm}$), je celkové příčné zvětšení soustavy $m = 1,05$. Účelem zařazení zobrazení testu je pozorovat změnu intenzitní detekce v důsledku aplikace adaptivní optiky.

Na zobrazovaný test můžeme pohlížet jako na plošný objekt sestavený z bodových zdrojů. Pokud vezmeme, že konec vlákna s laserovým zářením leží na ose celého systému, bude korekce fázových abearcí při zobrazení testu nejlepší pro bod na ose. Pro body mimo osu tato schopnost korekce klesá.

Dále budeme sledovat trasu laserového svazku, bílé světlo prochází stejnou optickou cestou. Za objektivem O_1 se zkolimovaný svazek přesměruje zrcadlem Z a pokračuje na deformovatelné zrcadlo. To změní fázový pro-

fil svazku podle tvaru svého povrchu a po odrazu a průchodu děličem D_2 směřuje do dvou detektorů: fázového Shack-Hartmanova S-H a intenzitního CCD. Rozdělení zajišťuje dělič D_3 . Šedý filtr před objektivem O_4 slouží k zeslabení laserového záření dopadajícího zároveň s bílým světlem na CCD kameru.

Mezi detektory a deformovatelné zrcadlo je vložen reducer svazku, který přizpůsobuje aperturu deformovatelného zrcadla a Shack-Hartmanova detektoru. Čistá apertura zrcadla je 30mm , detektoru jen $3,8\text{mm}$. S dostupných objektivů byl realizován reducer o zvětšení $0,14$, takže při apertuře zrcadla 30mm má svazek na detektoru šířku asi $4,1\text{mm}$. Pokud vezmeme typickou hodnotu relativního rekonstrukčního radiusu $r = 0,8$, dostáváme, že průměr zrcadla využitý pro modulaci je přibližně 22mm .

Informace z detektorů sbírá PC, a to potom z údajů o aktuálním fázovém rozložení sestavuje nové řídicí signály pro deformovatelné zrcadlo, které podstupuje řídicí elektronice E. Ta už potom komunikuje přímo se zrcadlem a formuje jeho povrch.

Celá sestava realizující zobrazení testu T a čela vlákna na CCD nebyla jako celek optimalizována, ale je tvořena prvky, které byly dostupné v laboratoři. Vykazuje tedy velké množství aberací a podává velmi nekvalitní obraz. K tomu deformovatelné zrcadlo ve své nulové poloze není přesně rovinné, a proto přispívá k nekvalitě obrazu. Pro demonstrační účely je ale toto velkou výhodou, protože účinky na zobrazení po aplikaci adaptivní smyčky jsou velmi dobře pozorovatelné a názorné.

Adaptivní optika kompenzuje fázové aberace až do místa zařazení fázového detektoru. V našem případě je to za děličem D_3 . V tomto místě by v ideálním případě měla být rovinná vlna. Proto cílovou funkcí, ke které se bude snažit systém přiblížit, je rovnoměrné rozložení fáze na fázovém detek-

toru. Z výše uvedeného také vyplývá, že objektiv O_4 , vytvářející obraz na CCD kameře, již není do korekční smyčky zahrnut. Dá se ovšem uvažovat, že svazek do něho přivedený je poměrně úzký (kolem 3mm), a proto vady jím do zobrazení zavedené nejsou nijak výrazné.

3.7 Dynamické parametry

Jak bylo zmíněno v teoretickém rozboru, pro dynamickou korekci je potřebný co nejkratší čas τ , který je zapotřebí pro vykonání jednoho cyklu, od změření fázového profilu, po aplikaci nových napětí na aktuátory deformovatelného zrcadla. Tento čas je technicky nejvíce určen rychlostí snímkování kamery detektoru a výpočetní silou PC, protože je potřeba provést poměrně velké množství časově náročných výpočetních operací. Frekvence snímkování použité CCD kamery U-Eye je 66Hz, což je horní mezí rychlosti cyklu. Při použití PC dostupného v laboratoři se pak rychlost cyklu pohybovala stabilně okolo 25Hz. Pokud byl využit výkonnější počítač, dosáhlo se rychlosti přes 30Hz. Stále to ještě ale nejsou postačující hodnoty pro korekci rychle se měnících prostředí, jak potvrdily i provedené experimenty.

Kapitola 4

Experimentální výsledky

V této sekci budou prezentovány výsledky experimentů získané s realizovanou sestavou. Jedná se o druhou část práce, která měla ukázat, jaké jsou možnosti a způsoby využití celého systému. U každého případu bude rozebráno, jaké parametry byly pro daný experiment nastaveny. Pro všechny však platí, že bylo využito měření fázových profilů v absolutním módu, tj., že reference pro detektor byla vypočítána z geometrických parametrů mikročoček a příslušné kamery. V tomto módu algoritmus již eliminuje polynomy $Z(1, 1)$ a $Z(1, -1)$ v příslušném Zernikeově rozvoji, které reprezentují posuv v osách x a y .

4.1 Korekce zobrazení

Základním experimentem, který je podrobně popsán v oddíle 3.6, je korekce zobrazovacího optického systému. Ten tvoří v podstatě celá realizovaná sestava, která zobrazuje test T na CCD kameru. Jak bylo rozebráno, po aplikaci adaptivní symčky by na Shack-Hartmanově detektoru mělo být detekováno rovnoměrné rozložení fáze a na CCD kameře by mělo dojít k podstatnému zlepšení rozlišení obrazu. Rovnoměrného rozložení fáze se dařilo dosáhnout

stabilně s RMS odpovídající $0,035\lambda$, $\lambda = 633nm$, a to na rekonstrukční oblasti odpovídající parametru $r=0,8$ při 35 aktivních Zernikeových polynomech. Na obrázcích 4.1 a 4.2 jsou prezentovány typické výsledky. Tyto obrázky o dasažených fázových rozloženích poskytuje software FrontSurfer ve formě 3-D grafu a interferenčního pole vzniklého interferencí $S(x, y)$ s rovinnou vlnou.

Jak se tyto výsledky projeví na zobrazení testovacího obrazce na CCD kameře prezentují obrázky 4.3 a 4.4. První je před aplikací adaptivní smyčky a druhý po aplikaci. Je zřetelně vidět velké rozostření obrazu neoptimalizovaného zobrazovacího systému a následné prudké zlepšení odstraněním podstatné části vlnových aberací.

4.2 Generace obecných fázových rozložení

Systém se dá z výhodou využít jako generátor žádaného fázového rozložení $S(x, y)$ na svém výstupu. To získáváme ve vlně za děličem D_3 . Pokud nechceme cílovou funkci jen jako rovnoměrné rozložení, jak by to odpovídalo kompenzaci vad zobrazovacího systému podle 3.6, nastavíme cílovou funkci $S(x, y)$ obecně jako kombinaci Zernikeových polynomů. Adaptivní systém po několika krocích cyklu dosáhne žádaného rozložení s určitou přesností vyjádřenou střední kvadratickou odchylkou RMS (2.5).

Jako příklad je uvedena generace Zernikeova polynomu $Z(2, 2)$ o amplitudě $3\mu m$ při $r=0,7$ a 35 aktivních polynomech. Dosáhlo se RMS $0,07\lambda$. Výsledky prezentují obrázky 4.5 a 4.6.

Při generaci fázových rozložení se dosáhlo přibližně stejných výsledků, jak je prezentuje katalog firmy OKO-Technologies [7], což lze považovat za dobrý výsledek a prokázání funkčnosti sestavy.

4.3 Dynamický rozsah kompenzace a generace základních vlnových aberací

Pro lepší přehled o dynamickém rozsahu systému byla proměřena generace základních vlnových aberací, vyjádřených Zernikeovými polynomy. Pro vybraný polynom byla provedena generace s různými amplitudami a sledovaným ukazatelem byla RMS. Parametry byly opět $r=0,7$ a 35 aktivních polynomů. Zvyšování amplitudy jsme zastavili, když RMS byla již příliš vysoká nebo pokud adaptivní algoritmus již nekonvergoval k řešení vinou neodpovídajícího obrazu na CCD Shack-Hartmanově detektoru. Schopnost generace úzce souvisí se schopností kompenzace aberací. Pokud je systém schopen vygenerovat určitou aberaci o dané amplitudě, je ji také schopen kompenzovat.

Dosažené výsledky shrnuje graf na obrázku 4.7. Je vidět, že pro polynomy druhého řádu jsou dynamické možnosti podstatně větší než pro polynomy vyšších řádů, a jsou omezeny jen vrůstající hodnotou RMS. Pro polynomy $Z(3, 1)$ a $Z(4, 0)$ při amplitudách přes 2λ již systém k řešení nekonvergoval z důvodu parazitních stop na CCD Shack-Hartmanově detektoru, které vznikly v důsledku příliš prudkých změn na povrchu deformovatelného zrcadla.

4.4 Vliv vlnových aberací na zobrazení

Z didaktického hlediska může být zajímavé pozorovat, jak se jednoduché vlnové aberace projevují v zobrazení. Je toho možné dosáhnout generací Zernikeova polynomu odpovídajícího určité vadě a následné detekci obrazu na CCD kameře. Jako příklad je uveden vliv komy na fokusaci laserového svazku. Polynom $Z(3, 1)$ byl generován s amplitudou $1\mu m$ na $r=0,8$. Na obrázku 4.8 ze CCD kamery je názorně vidět vliv komy na, za normálních okolností,

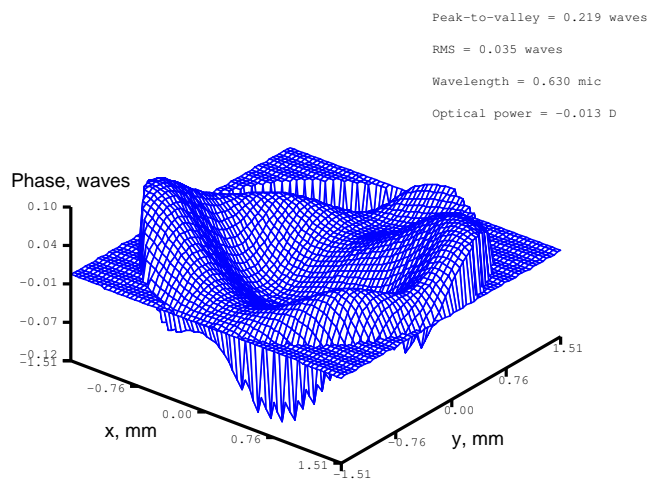
bodový obraz fokusovaného svazku.

4.5 Kompenzace dynamických fázových změn

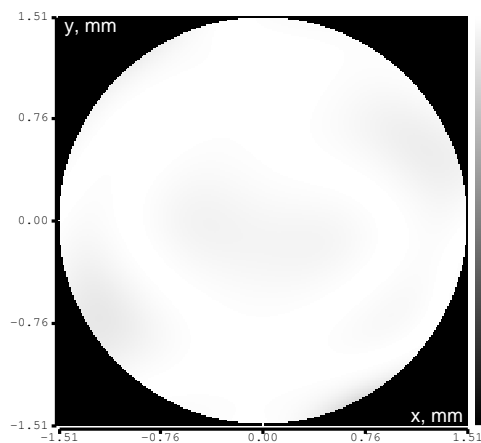
Pro ověření schopnosti kompenzovat časově proměnné fázové aberace bylo provedeno několik experimentů. Pro zavedení časově proměnných změn fázového profilu svazku, byl zkoušen plamen nebo horká pára. To by vedlo k proměnnému indexu lomu prostředí, který svazek prochází. Tyto změny se ovšem ukázaly jako příliš rychlé pro korekční rozsah adaptivní smyčky, jenž je 25Hz, a nebylo pozorováno větší zlepšení stálosti obrazu.

Ale při zavedení pomalého rozostřování pomocí lineárního posuvu objektivu 0_2 , které je reprezentováno polynomem $Z(2, 0)$, byla pozorována schopnost korekce ve velkém rozsahu. Vyplývá to i z grafu pro polynom $Z(2, 0)$ na obrázku 4.7. Prokázala se tedy schopnost systému kompenzovat pomalé změny fázového rozložení, jejichž rychlost je menší než 25Hz.

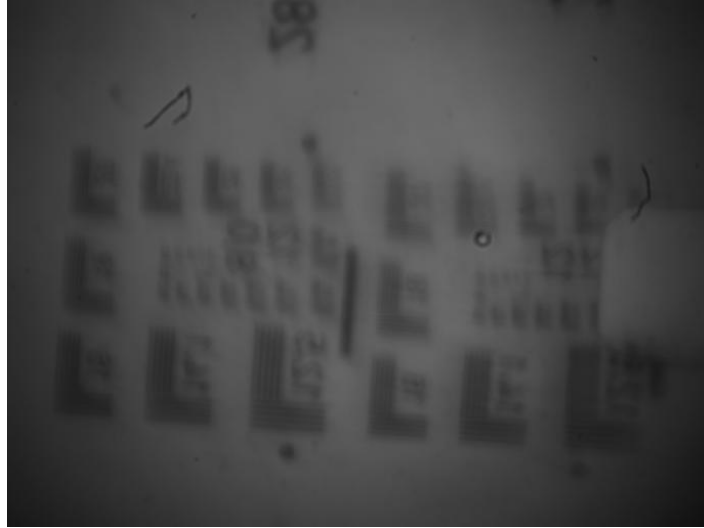
Při kompenzaci nebo generaci statických fázových rozložení se smyčka ukázala jako stabilní a po pár iteracích systém udržoval dosažený stav.



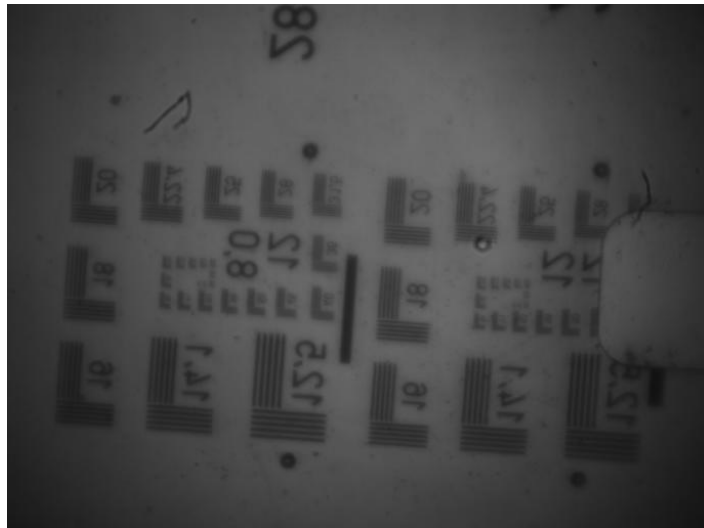
Obrázek 4.1: *Generace rovnoměrného rozložení-3D graf*



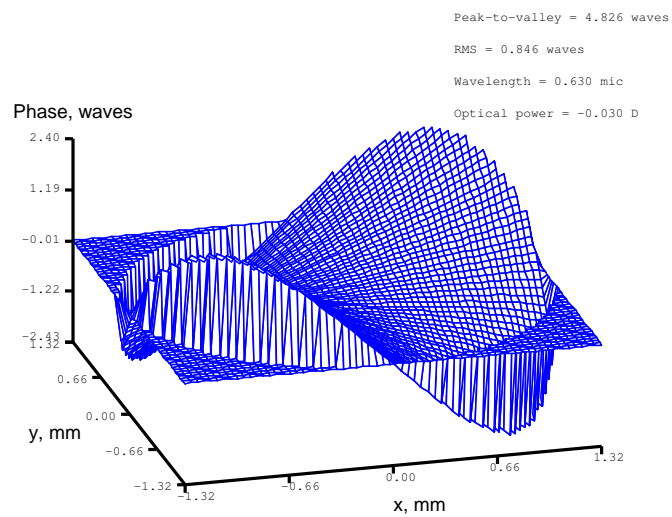
Obrázek 4.2: *Generace rovnoměrného rozložení-interferogram*



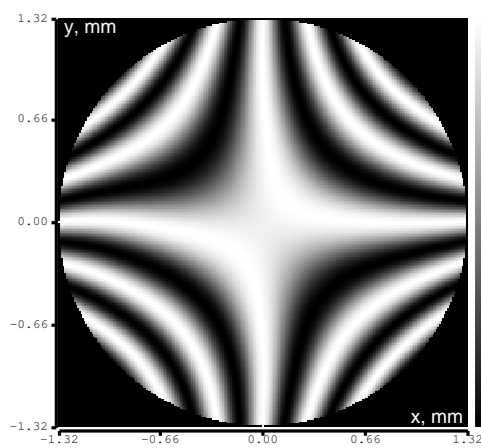
Obrázek 4.3: *Obraz testovacího obrazce před aplikací adaptivní smyčky*



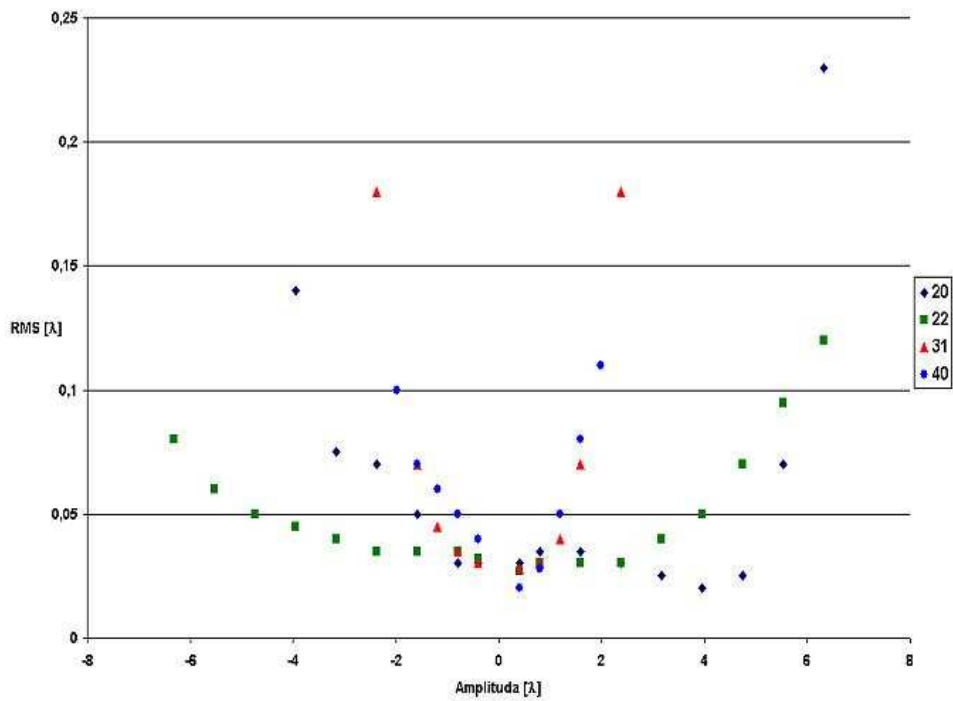
Obrázek 4.4: *Obraz testovacího obrazce po aplikaci adaptivní smyčky*



Obrázek 4.5: Generace Zernikeova polynomu $Z(2,2)$ - 3D graf



Obrázek 4.6: Generace Zernikeova polynomu $Z(2,2)$ - interferogram



Obrázek 4.7: *Schopnost generace jednotlivých Zernikeových polynomů*



Obrázek 4.8: *Vliv komy na fokusaci laserového svazku*

Kapitola 5

Závěr

Na závěr můžeme shrnout, že se podařilo v laboratoři vlnové optiky realizovat typický systém adaptivní optiky. Systém poskytuje dobrou korekci vlnových vad nízkého řádu ve výstupním svazku o průměru 2,6-3mm s opakovací frekvencí korekční smyčky 25Hz. Ze získaných výsledků experimentů a vlastní práce na sestavě lze udělat závěr, že systém je vhodný pro vylepšení kvality obrazu zobrazovacích sestav, dá se využít pro demonstrační účely vlivu aberací na zobrazení. Tyto aplikace najdou uplatnění především ve výuce oborů zaměřených na optiku. Zmíněné efekty jsou poměrně názorné a dobře pozorovatelné.

Pro vědecké účely by systém mohl najít využití jako generátor fázových rozložení nebo jako kompenzátor pomalu časově proměnných aberací speciálních zařízení.

Literatura

- [1] W. Hardy: *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes*, Oxford University Press, (1998)
- [2] E. Fernández,I. Iglesias,P. Artal: *Closed-loop adaptive optics in the human eye*, Optics Letters 26, 746 (2001)
- [3] F. Druon,G. Chériaux,J. Faure,J. Nees,M. Nantel,A. Maksimchuk,G. Mourou,J. Chanteloup,G. Vdovin: *Wave-front correction of femtosecond terawatt lasers by deformable mirrors*, Optics Letters 23, 1043 (1998)
- [4] L. Zhu,P. Sun,D. Bartsch,W. Freeman,Y. Fainman: *Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation*, Applied Optics 38, 168 (1999)
- [5] L. Zhu,P. Sun,D. Bartch,R. Freeman,Y. Fainman: *Wave-front generation of Zernike polynomial modes with a micromachined membrane deformable mirror*, Applied Optics 38, 6019 (1999)
- [6] B. Saleh,M. Teich: *Základy fotoniky*, Matfyzpress, 1994

- [7] M. Loktev, O. Soloviev, G. Vdovin: *Adaptive optics guide*, Flexible Optical BV, (2008)
- [8] M. Loktev, O. Soloviev, G. Vdovin: *FrontSurfer wavefront analysis and control system*, Flexible Optical BV, (2007)
- [9] G. Vdovin, O. Soloviev, A. Samokhin, M. Loktev: *Correction of low order aberrations using continuous deformable mirrors*, Optics Express 16, 2859 (2008)
- [10] M. Bass: *Handbook of optics*, Optical Society of America, (1995)
- [11] M. Born, E. Wolf: *Principles of optics*, Doplnim, (1984)
- [12] A. Burý: *Teorie systémů a řízení*, VŠB Ostrava, (2007)
- [13] M. Lloyd-Hart: http://athene.as.arizona.edu/~lclose/a519/lectures_4_and_5.pdf, (2009)