



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Sběr světla v zobrazovacích systémech na bázi komprimovaného snímání

Bakalářská práce

Studijní program: B3901 – Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: 3901R055 – Aplikované vědy v inženýrství
Autor práce: **Lukáš Klein**
Vedoucí práce: RNDr. Karel Žídek, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Light Collection in the Imaging Systems Based on Compressed Sensing

Bachelor thesis

Study programme: B3901 – Applied Science in Technology
Study branch: 3901R055 – Applied Science in Technology
Author: **Lukáš Klein**
Supervisor: RNDr. Karel Žídek, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Sběr světla v zobrazovacích systémech na bázi komprimovaného snímání

Jméno a příjmení: **Lukáš Klein**
Osobní číslo: M16000100
Studijní program: B3901 Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Aplikované vědy v inženýrství
Zadávací katedra: Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s problematikou komprimovaného snímání.
2. Seznámení se s možnostmi implementace komprimovaného snímání do snímání obrazu, zejména s ohledem na tzv. jednopixelovou kameru.
3. Navržení několika variant sběru světla pro jednopixelovou kameru.
4. Experimentální testování variant sběru a vyhodnocení jejich účinnosti, zejména s ohledem na sběr infračerveného světla.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 30 – 40 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] STERN, Adrian (ed.). Optical compressive imaging. CRC Press, 2016.
- [2] DUARTE, Marco F., et al. Single-pixel imaging via compressive sampling. IEEE signal processing magazine, 2008, 25.2: 83-91.
- [3] CARR, K. F. Integrating sphere theory and applications, Labsphere.com, 2017.

Vedoucí práce: RNDr. Karel Žídek, Ph.D.
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Datum zadání práce: 18. října 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2019

L. S.

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

Ing. Josef Novák, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Liberci 18. října 2018

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

27. 4. 2019

Lukáš Klein

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce RNDr. Karlu Žídkovi, Ph.D. V průběhu tvorby celé práce byl důležitou oporou, pomohl mi při seznamování se s novými optickými prvky i vlastním principem komprimovaného snímání. Na pracovišti jsme poté společně intenzivně řešili také časté problémy s funkčností jednotlivých prvků a jejich vzájemnou komunikací. Jeho přátelský přístup vytvářel v průběhu tvorby celé práce velice příjemné pracovní prostředí.

Dále bych rád poděkoval všem svým spolužákům z našeho ročníku oboru AVI za pravidelné debaty o našich bakalářských pracích, rady při správném formátování, kritiku a donucení opravdu co nejlépe pochopit problematiku, kterou člověk musel poté často vysvětlovat. Zároveň byli skvělou motivací pro průběžné sepisování práce, jelikož jsme prakticky závodili, kdo má již napsáno více stran.

Nakonec patří poděkování také mé rodině, která v průběhu roku musela pravidelně poslouchat zážitky z výzkumu, kterým pravděpodobně ani po té době příliš neporozuměli. Jejich zájem byl i přesto přínosem.

Název práce

Sběr světla v zobrazovacích systémech na bázi komprimovaného snímání

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na problematiku komprimovaného snímání a jednopixelové kamery. Jejím cílem je vytvořit co nejefektivnější systém pro sběr požadovaných parsků světla do jednoho bodu, odkud je optickým vláknem vedeno na zpracování. Pro tento účel jsou nejprve otestovány některé prvky a poté porovnány jednotlivé sestavy, z nichž je poté vybrána ta s nejlepšími vlastnostmi. Vybraný systém je poté dále využit pro otestování a úspěšnou demonstraci jednotlivých vlastností komprimovaného snímání ve viditelném spektru i blízké infračervené oblasti.

Klíčová slova

Komprimované snímání, jednopixelová kamera, SPC, sběr světla, DMD, integrační koule, difusor, mimoosé parabolické zrcadlo, parabolický kolimátor, optické vlákno, fotodioda, spektrometr, viditelné spektrum, blízká infračervená oblast, NIR

Title of thesis

Light Collection in the Imaging Systems Based on Compressed Sensing

Abstract

This bachelor thesis focuses on the topic of compressed sensing and the single-pixel camera. Its aim is to create as effective light collection system as possible bringing all desired light rays into one spot. From here the rays would then be transferred using optical fiber to analysis. For this purpose some parts are tested individually. After that the layouts themselves are compared and the one with most suitable output is chosen. The best system created would then be used to test compressed sensing itself and successfully demonstrate its features in visible and also in near-infrared spectrum.

Key words

Compressed sensing, single-pixel camera, SPC, light collection, DMD, integrating sphere, difusor, off-axis parabolic mirror, parabolic collimator, optical fiber, photodiode, spectrometer, visible spectrum, near-infrared spectrum, NIR

Obsah

ÚVOD	15
1 SOUČÁSTI SESTAVY	16
1.1 DIGITAL MICROMIRROR DEVICE	16
1.2 SBĚR SVĚTLA	17
1.3 POČÍTAČOVÉ SIMULACE	25
1.4 DETEKTORY	26
2 SINGLE-PIXEL CAMERA	28
3 MĚŘENÍ	32
3.1 DIFRAKCE NA DMD	32
3.2 OPTIMÁLNÍ POLOHA DIFUSORU	37
3.3 NOVÁ INTEGRAČNÍ KOULE	40
3.4 TESTOVÁNÍ SESTAV	42
4 KOMPRIMOVANÉ SNÍMÁNÍ	54
4.1 VIDITELNÉ SPEKTRUM	54
4.2 BLÍZKÁ INFRAČERVENÁ OBLAST	59
5 ZÁVĚR	61
ZDROJE	63

Úvod

Zaměřením této práce jsou systémy na bázi komprimovaného snímání. Jedná se o relativně nový přístup k zaznamenávání obrazu a optickým měřením, které popsal poprvé v roce 2006 David L. Donoh [1]. Konkrétně se budeme zabývat tzv. „jednopixelovou kamerou“, která nabízí velké množství výhod oproti konvenčním kamerám. V této sestavě se nevyužívá klasické zobrazovací rovnice k přenesení obrazu scény na jinou detekční plochu. Místo toho se zde snažíme dostat všechny paprsky splňující podmínku vzoru (masky) dostat na co nejmenší plochu a poté do optického vlákna, což by se dalo přirovnat k nutnosti vytvořit jakýsi optický trychtýř. Za tímto účelem je využíváno mnoho prvků, které v klasické kameře nenalezneme. V teoretické části se tedy seznámíme jak s prvky pro tvorbu masek, tak nepříliš obvyklými optickými komponenty využívanými pro sběr světla v našich experimentech. Dále se také zaměříme na detektory, které je možné v komprimovaném snímání využít a jejich výhody i nevýhody. Nakonec se teoreticky seznámíme s principem fungování vlastního komprimovaného snímání a jednopixelové kamery (single-pixel camera).

Cílem práce je pro tento systém zkonstruovat co nejefektivnější způsob přenesení světla z masky do optického vlákna. Nejprve byly otestovány vlastnosti některých komponentů jako například sledování difrakčních jevů na generátoru masek. Poté byly vytvářeny jednotlivé sestavy pro vlastní sběr světla a sledována jejich efektivita. Pozorována byla celková intenzita přenesená do optického vlákna, přesnost reprezentace optického spektra či jak efektivně se která část masky měří.

Po výsledném porovnání námi navržených sestav byla nejlepší sada vybrána a testována v samotném komprimovaném snímání. Cílem bylo vytvořit obraz scény pro celé viditelné spektrum a případně i se pokusit o zobrazení mimo viditelnou oblast, kde není možné využít klasické detektory na bázi křemíku, což u obyčejných kamerových systémů zásadně zvyšuje jejich cenu. Byl zde zároveň pozorován vliv počtu měření na kvalitu celkového obrazu.

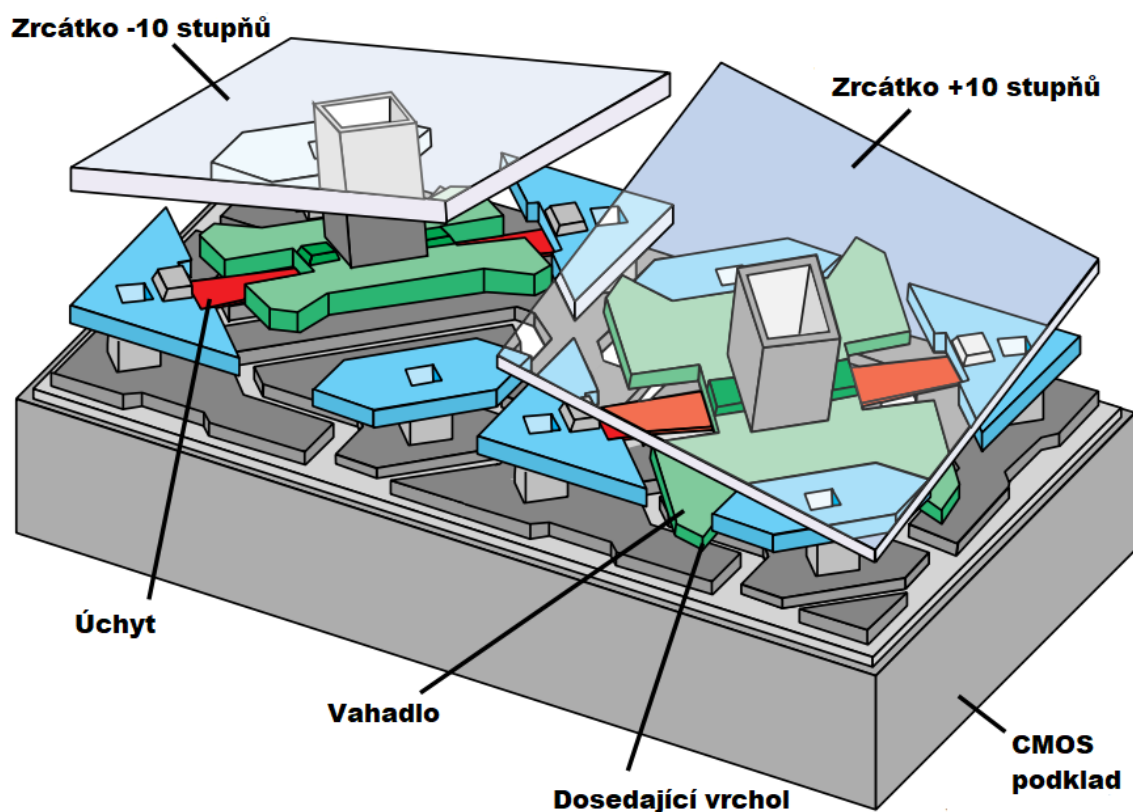
1 Součásti sestavy

Komprimované snímání se ve svém principu a svých součástech značně liší od konvenčního, se kterým se setkáváme v každodenním životě. Před popsáním samotného principu jednopixelové kamery je nezbytné se seznámit s komponenty použitými v komprimovaném snímání a této bakalářské práci.

1.1 Digital micromirror device práce

Digital micromirror device (digitální mikrozrcátkové zařízení, DMD) byl vynalezen společností Texas Instrument v roce 1987. Je součástí technologie DLP (Digital Light Processing), která je v současnosti běžně využívána v digitálních projektorech.

DMD se skládá z mikrozrcátek s délkou strany typicky okolo 16 μm překlápěných pomocí polovodičových elektrod umístěných pod nimi (obrázek 1), které při přivedení napětí zajistí vyklopení mikrozrcátka na jednu nebo druhou stranu. Vzniká tím čip rychlých digitálních prepínačů, které přesně ovládají světelný zdroj na základě pulzní šířkové modulace (PWM) [2].

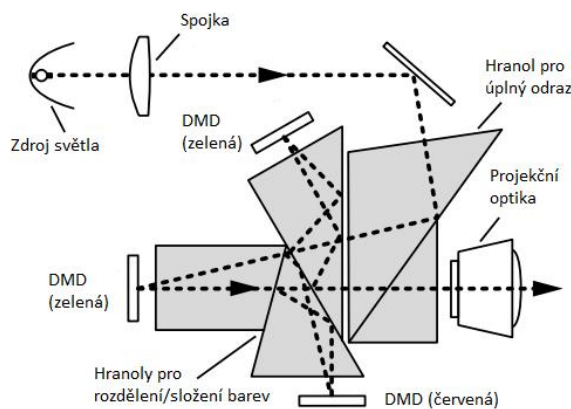
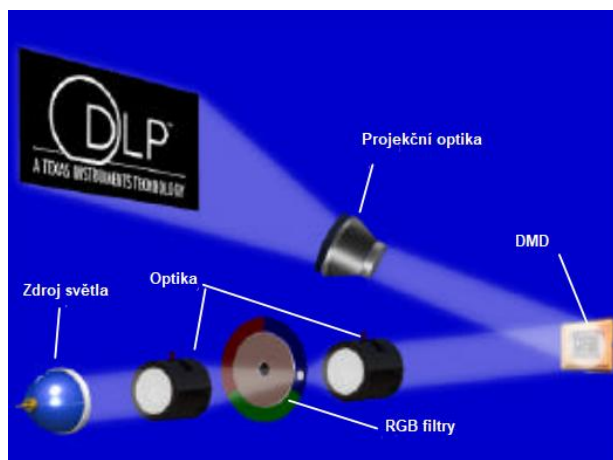


Obrázek 1: Struktura zrcátek DMD (Hornbeck, 1997)

Reflektivní plocha DMD mikrozrcátka je připevněna k vahadlu pod ním. Přicházející signál je binární a přichází informace má tedy hodnotu „1“ nebo „0.“ Tato hodnota se zpracovává v paměťové buňce CMOS pod zrcátkem a podle přichází hodnoty se přivede napětí pod vahadlo, které je poté elektrostatickou silou přitaženo tímto směrem. Při logické jedničce se zrcátko vyklopí o +10 stupňů a signál prochází, při logické nule se zrcátko vyklopí o -10 stupňů směrem do absorpční plochy, kde je světlo pohlceno. Díky úchytům je možné zrcátko zanechat v předcházející poloze, zatímco již

paměťová buňka pod ním přijme informaci o další poloze a přivede na elektrody požadované napětí pro nadcházející stav.

V projektorech poté DMD funguje dvěma odlišnými způsoby (obrázek 2) – jednočipové nebo tříčipové DLP. V prvním případě obsahuje projektor pouze jedno DMD. Střídá se pak barva odraženého světla, což se děje buďto rychlým přepínáním diodových RGB zdrojů nebo mezi zdrojem světla a čipem se nachází rotující díl s barevnými filtry a postupně se na DMD promítá červená, zelená a modrá. Čip tedy každou barvu zpracovává zvlášť a promítá do míst, kde má být. Intenzita dané barvy je poté ovládána poměrem mezi časem logických jedniček a nul [3]. Díky rychlosti, s jakou tyto procesy probíhají, vnímá lidské oko až cílenou barvu daného pixelu. Tříčipové DLP využívá několik skleněných hranolů a dichroických filtrů, díky kterým se světlo ze zdroje rozdělí na stejné barvy jako v prvním případě. Trajektorie každé barvy vede přes jiný DMD čip, který určuje, kam má daná barva v projekci dopadat. Intenzita je ovládána stejně jako v případě jednočipového DLP. Barvy se poté opět setkávají a vytváří výsledný obraz.



Obrázek 2: Jednočipové a tříčipové DLP (Dudley, 2003, Hornbeck, 1997)

Zatímco jednočipová konfigurace je méně náročná na prostor a může být instalována do menších zařízení, tříčipová konfigurace umožňuje průchod větší části intenzity světla ze zdroje, protože všechny barvy jsou zpracovávány souběžně a není zde filtr, který v danou chvíli propouští pouze část intenzity světla [2].

V této práci DMD slouží k vytváření náhodných masek v komprimovaném snímání. Každá maska vytvořená z náhodné kombinace jedniček a nul (různých náklonů zrcátek) odrazí část intenzity světla jedním a část druhým směrem. Jednu z těchto intenzit se poté snažíme co nejefektivněji měřit a získat z ní informace o původním obrázku.

1.2 Sběr světla

Hlavní částí této práce je analýza různých přístupů ke sběru světla a jeho svedení do jednoho bodu, například optického vlákna nebo snímače. V komprimovaném snímání není nutné každý bod z DMD zobrazit na jedno specifické místo, je jen zapotřebí získat celkovou intenzitu všech bodů, které jsou na DMD nastaveny jedním směrem. Pro tento účel je možné využít několik různých komponentů, které budou v následující části popsány.

1.2.1 Integrační koule

Integrační koule je konstrukčně jednoduchý nástroj určený pro měření intenzity světla. Její funkce spočívá v prostorové integraci světelného toku [4]. Obvyklé se jedná o kulovitou, případně válcovitou

dutinu se vstupním a jedním či více výstupními otvory. Na výstupní otvor je možné napojit detektor nebo intenzitu světla do optického vlákna. Vnitřní povrch integrační koule je charakterizován vysokou odrazivostí a rozptýlností. Díky tomu se světlo dopadající na vnitřní povrch koule odrazí skoro ideálně difúzně neboli dochází k téměř Lambertovskému odrazu.

Pro výpočet efektivit integracní koule se využívá radiometrické veličiny L_e zvané zář, která je definovaná jako zářivost I_e malé části dS plochy zdroje přepočítaná na jednotkovou plošku. V šikmém směru se však tato ploška projevuje pouze průmětem ve směru vyzařování a je tedy přepočítána na tento průmět v závislosti na úhlu θ mezi normálou dS a směrem vyzařování [5]. Jednotkou této veličiny je $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$. Z definice získáváme rovnici:

$$L_e = \frac{dI_e}{dS \cdot \cos\theta} \quad (1.2.1-1)$$

Zářivost je definována jako zářivý tok Φ_e vysílaný bodovým zdrojem do jednotkového prostorového úhlu Ω v daném směru. Podle této definice můžeme vztah pro zář dále upravit:

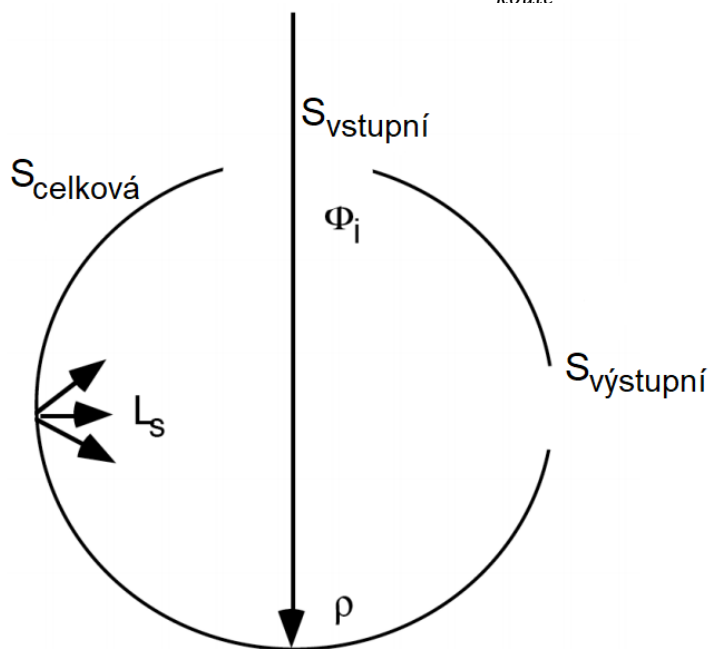
$$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{dS \cdot d\Omega \cdot \cos\theta} \quad (1.2.1-2)$$

Pokud světlo dopadá na vnitřní povrch integrační koule, vzniká tím na něm virtuální zdroj světla. Zářivý tok virtuálního zdroje na zářivém toku Φ_i na něj dopadajícím, odrazivosti povrchu ρ a osvětlené ploše S . Při Lambertovském odrazu získáme vztah:

$$L = \frac{\Phi_i \cdot \rho}{\pi \cdot S} \quad (1.2.1-3)$$

Pro integrační kouli se zavádí jako parametr f :

$$f = \frac{S_{otvorů}}{S_{koule}} \quad (1.2.1-4)$$



Obrázek 3: Schéma integrační koule (Labsphere, 2017)

Světelný tok s každým odrazem uvnitř koule klesá o $\rho \cdot (1-f)$. Pokud je integrační koule stále osvětlena, je výsledný světelný tok uvnitř součtem světelných toků po všech odrazech.

$$\Phi = \lim_{n \rightarrow \infty} \Phi_i \rho (1-f) \{1 + \rho(1-f) + \dots + \rho^{n-1}(1-f)^{n-1}\} \quad (1.2.1-5)$$

Jelikož jsou ρ i $(1-f)$ menší než 1, je možné tento výraz dále upravit a dosadit do rovnice (1.2.1-3).

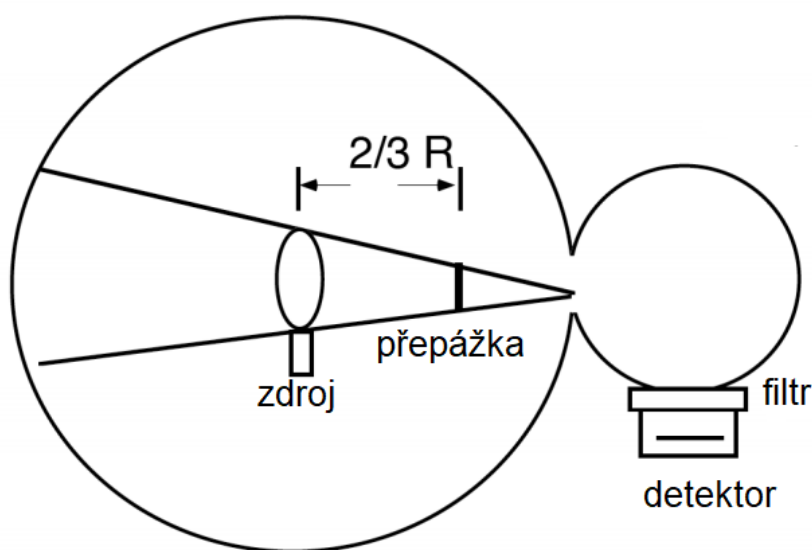
$$\Phi = \frac{\Phi_i \rho (1 - f)}{1 - \rho (1 - f)} \quad (1.2.1-6)$$

$$L_s = \frac{\Phi_i}{\pi \cdot S \cdot (1 - f)} \cdot \frac{\rho (1 - f)}{1 - \rho (1 - f)} \quad (1.2.1-7)$$

$$L_s = \frac{\Phi_i}{\pi \cdot S} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho (1 - f)} \quad (1.2.1-8)$$

Ze vzorce vyplývá několik důležitých poznatků pro tvorbu integračních koulí. Její efektivita přímo závisí na její odrazivosti a nepřímo na f a celkové ploše koule. Čím menší tedy integrační koule bude, tím větší bude při stejné odrazivosti její účinnost. Tento faktor je ovšem spojen s parametrem f a má být integrační koule využitelná v reálných aplikacích, nelze ji zmenšovat donekonečna, jinak bychom již museli začít zmenšovat i vstupní a výstupní otvory.

Integrační koule je nejběžněji využívána k měření světelného toku z různých světelných zdrojů, například zářivek nebo LED svítidel (obrázek 4). Pro tyto aplikace se většinou využívají větší integrační koule, do nichž je zdroj světla umístěn a za přepážku zamezující přímému svitu je umístěn detektor. Ten může být napojen na druhou menší integrační kouli nebo vybaven difuzorem. Pro měření pouze v určitém pásmu vlnových délek je také možné využít různé filtry nebo detektor vyměnit za spektrometr a měřit celé spektrum záření daného zdroje.

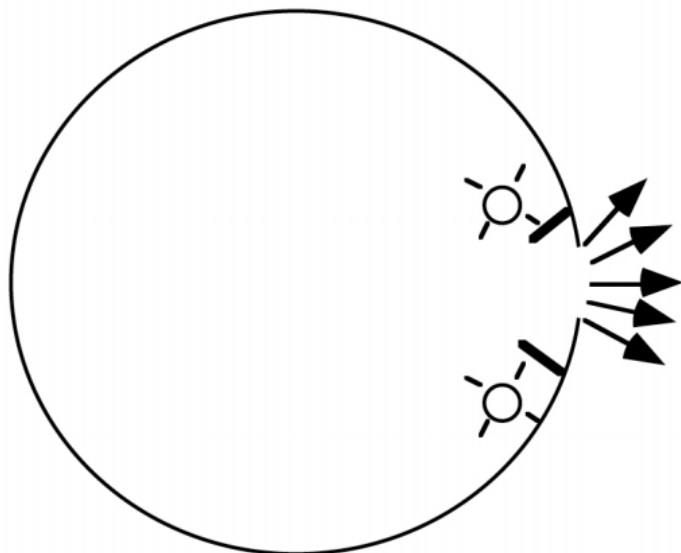


Obrázek 4: Kulový fotometr (Labsphere, 2017)

S pomocí integrační koule je také možné měřit výkon silných laserů, které by při přímém měření mohli detektor zničit. V neposlední řadě může toto zařízení fungovat také obráceně. Pokud bude zdroj světla umístěn uvnitř koule (a přepážkou oddělen od výstupního otvoru), bude se integrační koule sama v místě výstupu chovat jako difúzní zdroj světla se stejnou intenzitou světla vysílanou ve velkém prostorovém úhlu (obrázek 5).

V této práci je integrační koule uplatněna k měření intenzity světla odraženého z masky na DMD. Její výhodou je neselektivita vůči vlnové délce do ní dopadajícího světla. Veškeré světlo dopadající do koule tedy bude se stejnou efektivitou přeneseno na výstupní otvor a tvar křivky závislosti intenzity světla na vlnové délce se použitím tohoto komponentu nemění. Optickým vláknem je však pozorována

pouze velmi malá část povrchu koule a tato intenzita je tedy pouze zlomková oproti té vstupující do koule. To hlavně u menších hodnot intenzit může znamenat jejich nerozlišitelnost od vlastního šumu detektoru nebo jiných vlivů.

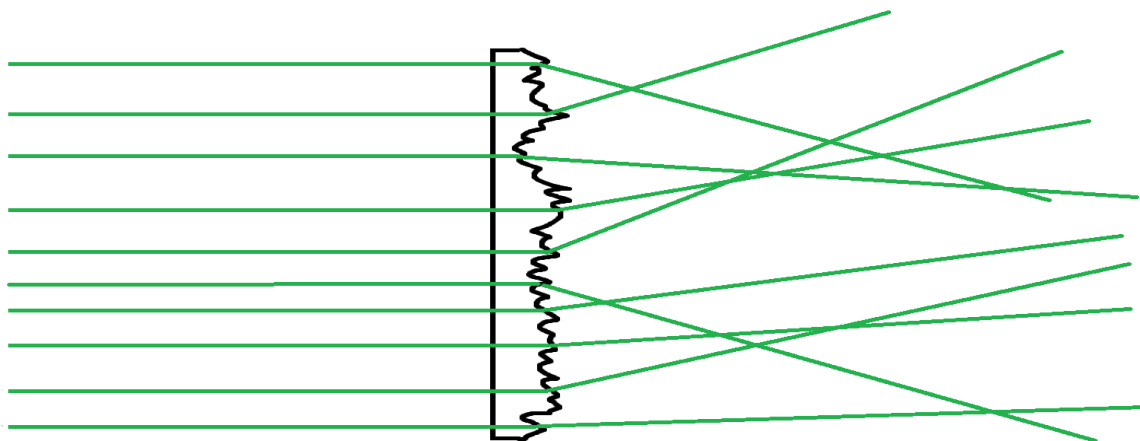


Obrázek 5: Integrační koule jako difúzní zdroj světla (Labsphere, 2017)

1.2.2 Difusor

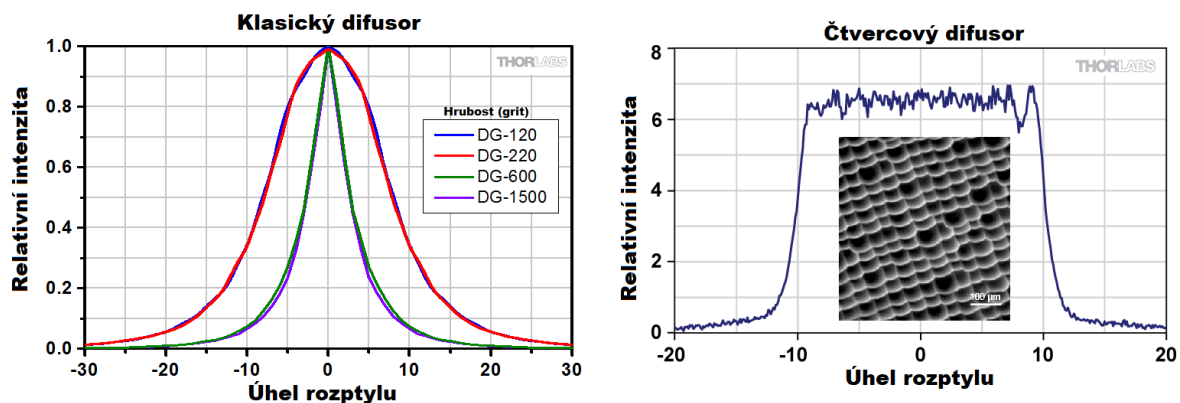
V optice je za difusor možné považovat prakticky vše, co působí rozptyl světla, tedy že na difusor dopadající světlo se náhodně láme/odráží do různých směrů. V reálné situaci takovému popisu vyhovuje prakticky jakýkoliv hrubý povrch – pokud na něj dopadá kolimovaný svazek paprsků, každý z těchto paprsků se na nerovnostech podle zákona odrazu odrazí jinam. Když tedy například v tmavé místnosti budeme svítit na hrubou stěnu, částečně osvětlíme celou místnost.

V případě naší aplikace je jako difusor využito ploché sklíčko, které má jednu stranu vyleštěnou do hladkého povrchu a druhou vybroušenou do hrubého (obrázek 6). Paprsky dopadající na hladkou stranu se pouze lámou ke kolmici, prochází vnitřkem difusoru a na jeho druhé straně se na hrubém povrchu lámou od kolmice v různých směrech.



Obrázek 6: Princip fungování skleněného difusoru

Hrubý povrch skleněného difusoru může být vytvořen náhodně a poté se úhel procházejících paprsků mění statisticky podle normálního (Gaussovského) rozdělení [6]. Mikrostrukturu difusoru je však také možné vytvořit cíleně na účelem dosažení požadovaného výsledku. S přesně zvoleným tvarem hrubého povrchu je možné upřednostnit lom paprsků do některých úhlu oproti jiným a pozměnit tak jejich hustotu pravděpodobnosti (obrázek 7) [7].

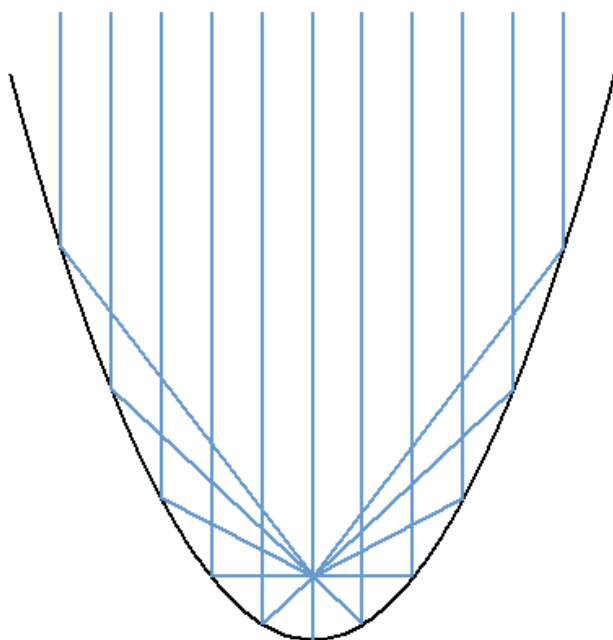


Obrázek 7: Porovnání difusorů, mikrostruktura čtvercového difusoru (Thorlabs, 2019)

V této práci je difusor převážně využíván pro kompenzování difrakce na DMD a jiných optických vad. Náhodným lámáním všech paprsků se i část informace mířící mimo místo sběru může zlomit zpět. Za cenu poklesu celkové intenzity získaného světla je možné získat přesněji reprezentovat tvar křivky její závislosti na vlnové délce podobně, jako tomu je v případě integrační koule.

1.2.3 Parabolické zrcadlo, kolimátor

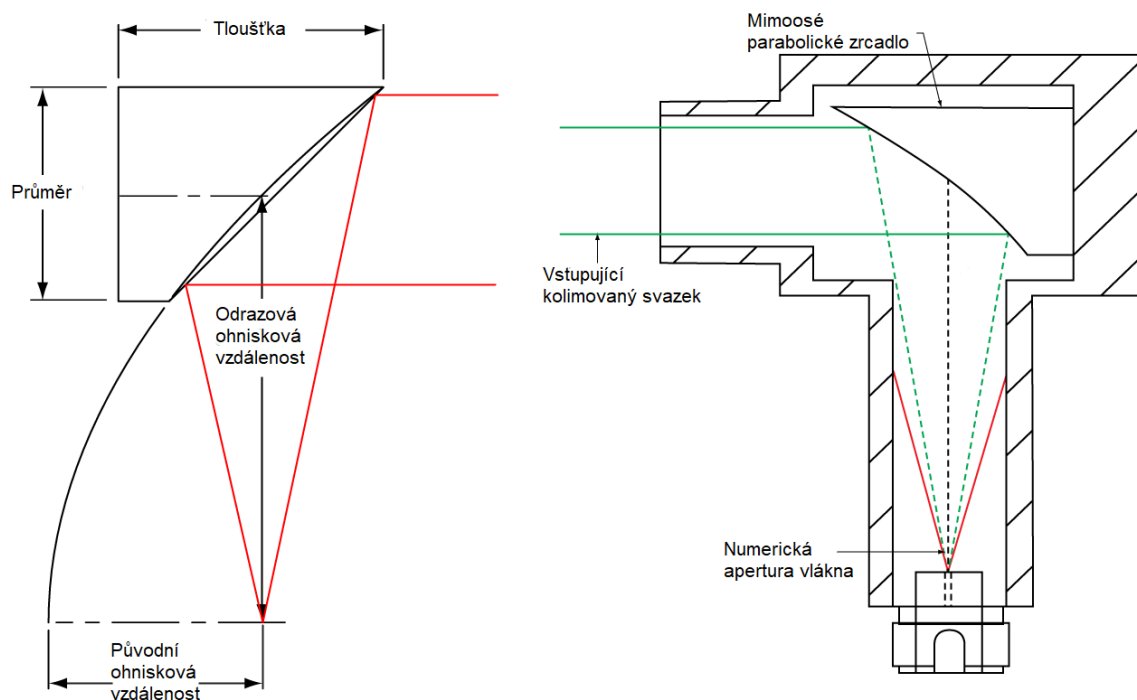
Parabolické zrcadlo (parabolický reflektor) je speciální typ zrcadla, který má na svém průřezu tvar paraboly, v případě tří dimenzí poté nejčastěji tvar rotačního paraboloidu [8]. Pokud na toto zrcadlo dopadá kolimovaný svazek světelných paprsků, jsou všechny odraženy do jednoho bodu – ohniska (obrázek 8).



Obrázek 8: Průběh paprsků v parabolickém zrcadle (Paschotta, 2008)

Parabolické zrcadlo má několik výhod ve srovnání s jinými optickými prvky, které by bylo možné využít ke stejnému účelu. V případě klasického kulového zrcadla můžeme pro správné fungování využívat pouze paraxiální prostor (blízko optické osy). Při větší vzdálenosti od osy již totiž vzniká otvorová vada a paprsky tímto zrcadlem odražené se nesetkávají v jednom bodě. Při použití spojně sférické čočky dochází ke stejnému problému, navíc se ovšem projevuje chromatická aberace. Index lomu čočky se totiž mění v závislosti na vlnové délce procházejícího světla a každý paprsek se tedy láme pod nepatrně odlišným úhlem. Pro každou barvu tedy ohnisko vzniká v jiném místě. Tato vada lze zmírnit například použitím více čoček a tvorbou takzvaných achromatických soustav, které tento problém značně redukuje. U parabolického zrcadla se s chromatickou aberací nesetkáváme, jelikož úhel odrazu paprsku na jeho vlnové délce nezávisí.

Jelikož se ohnisko parabolického zrcadla nachází uvnitř této paraboly a v cestě přicházejících paprsků, je z reálného hlediska velice obtížný přístup k tomuto bodu. V praxi proto vznikají mimoosé parabolické reflektory, které zaujímají pouze části křivky paraboly (obrázek 9 vlevo). Díky tomu se již ohnisko nachází mimo prostor dopadajícího světla i mimo prostor zrcadla samotného. Tento typ zrcadla je ovšem také výrazně náchylnější na správné natočení. Při špatném úhlu mezi zrcadlem a dopadajícími paprsky může v jeho ohnisku vznikat koma.



Obrázek 9: Mimoosé parabolické zrcadlo a kolimátor (Thorlabs, 2019)

Speciálním případem aplikace parabolického zrcadla jsou poté kolimátory (obrázek 9 vpravo). To je v kolimátoru umístěno v pevně dané poloze vůči vstupnímu i výstupnímu otvoru. Pokud poté do vstupního otvoru přichází kolimované světlo, odráží se do ohniska v místě výstupního otvoru, na který je připojeno optické vlákno [9].

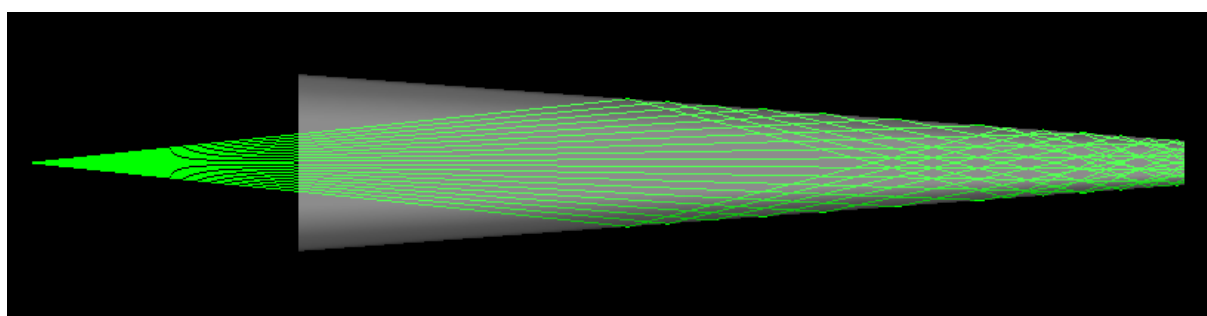
Důležitými parametry mimoosého parabolického zrcadla jsou průměr vstupního svazku a dosažitelná numerická apertura. Tyto dvě vlastnosti spolu velice úzce souvisí. Čím širší kolimovaný svazek chceme získat, tím větší bude jeho numerická apertura na výstupu. Z tohoto důvodu je vhodné také volit na výstup kolimátoru vlákna s větší vlastní numerickou aperturou, což nám umožní pojmout kolimátorem maximum dopadajícího světla.

V této práci slouží mimoosé parabolické zrcadlo spíše jako pomocná součást většiny ostatních sestav. Jak již bylo zmíněno, trpí parabolická zrcadla výrazně menším vlivem optických vad, než obyčejné

čočky. Jelikož ovšem z DMD nevychází čistě kolimovaný, ale spíše divergentní svazek, není fokusace paraboly do jednoho bodu dokonalá. Tento problém je již čočkou řešen, protože v místě použití již jsou paprsky odražené od parabolického zrcadla velice blízko optické osy a vady zanesené touto čočkou se prakticky neprojeví. Kolimátor se naopak dá využít díky svým rozměrům samostatně nebo například v kombinaci s difusorem na přímý sběr světla odraženého od DMD.

1.2.4 Koncentrátor

Jako optický koncentrátor je možné označit prakticky jakoukoliv součástku usměrňující světlo na menší plochu. V případě této práce je koncentrátorem skleněný komolý kužel či jehlan. Hlavní (dolní) podstavou do koncentrátoru vstupují paprsky světla, které na boční stěny dopadají pod velkým úhlem a dochází zde k totálnímu odrazu. Pokud před výstupem horní podstavou dochází k více interakcím se stěnou, klesá již úhel odrazu a je možné, že paprsky koncentrátor opustí. Slouží tedy spíše jako doplňující prvek, který může zmírnit ztráty v jiných sestavách.



Obrázek 10: Simulace optického kužele v toolboxu Optometrika

1.2.5 Optické vlákno

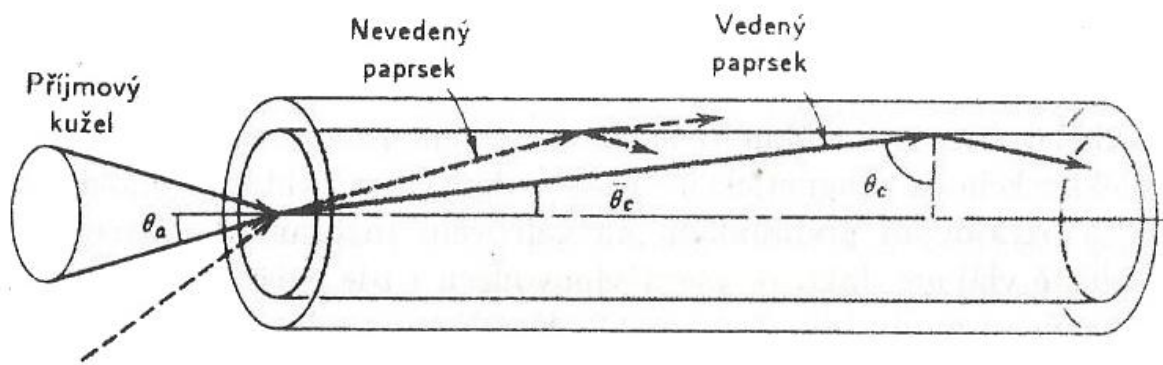
Cílem výše zmíněných prvků je co nejefektivněji dostat co největší množství získaného světla do jednoho bodu. V tomto bodě je ve většině případů umístěno optické vlákno, které poté získanou informaci přenesou. To v naší aplikaci umožňuje získat informaci (intenzitu světla), přenést ji a až poté ji v jiném místě, konkrétně vláknovém spektrometru, zpracovat.

Optické vlákno sestává z jádra a jeho obalu – pláště. Pro vedení světla skrz vlákno je důležité, aby index lomu pláště byl menší než index lomu jádra. Vlákno totiž pro vedení využívá principu úplného odrazu. Pokud se totiž paprsek šíří z opticky hustšího prostředí s indexem lomu n_1 (jádra) směrem do opticky řidšího s indexem lomu n_2 (pláště), nastává lom od kolmice. Při zvyšování úhlu dopadu dosáhneme v určitý moment situace, kdy se paprsek láme rovnoběžně s rozhraním optických prostředí. Tento úhel se nazývá mezním úhlem a je definován podle Snellova zákona vztahem:

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_{\text{plášť}}}{n_{\text{jádro}}} \quad (1.2.3-1)$$

Při dalším zvyšování úhlu dopadu se již všechny paprsky odrazí zpět do opticky hustšího prostředí a dochází k úplnému (totálnímu) odrazu. Tímto způsobem se paprsky splňující podmínku mezního úhlu mohou šířit jádrem optického vlákna při minimálních ztrátách (obrázek 11). Paprsky dopadající na rozhraní pod úhlem menším, než je mezní úhel, se odráží pouze z malé části, zatímco většina výkonu prochází do pláště. To způsobuje u těchto paprsků velké ztráty a proto nejsou vláknem vedeny [10].

Významným parametrem optického vlákna je takzvaná numerická apertura. Její hodnota vychází z indexů lomu jádra a pláště a ovlivňuje, pod jakým úhlem mohou z vnějšího prostředí (nejčastěji vzduchu) dopadat paprsky do vlákna, aby se jím mohli šířit.



Obrázek 11: Schéma numerické apertury (Saleh, Teich, 1991)

Pro vedení vláknem musí světlo na rozhraní vrstev dopadat pod úhlem větším než θ_c a tedy mít na vstupu úhel od osy vlákna menší než

$$\bar{\theta}_c = \frac{\pi}{2} - \theta_c. \quad (1.2.3-2)$$

Paprsek s tímto vstupním úhlem vzniká lomem ke kolmici. Pokud budeme chtít vyjádřit maximální velikost úhlu θ_a , pro kterou bude světlo vláknem vedeno, využijeme opět Snellův zákon. Pro zjednodušení vztahu předpokládáme index lomu vzduchu roven jedné.

$$1 \cdot \sin \theta_a = n_1 \cdot \sin \bar{\theta}_c \quad (1.2.3-3)$$

$$\sin \theta_a = n_1 \cdot (1 - \cos^2 \bar{\theta}_c)^{1/2} \quad (1.2.3-4)$$

$$\sin \theta_a = n_1 \cdot \left(1 - \left(n_2/n_1\right)^2\right)^{1/2} \quad (1.2.3-5)$$

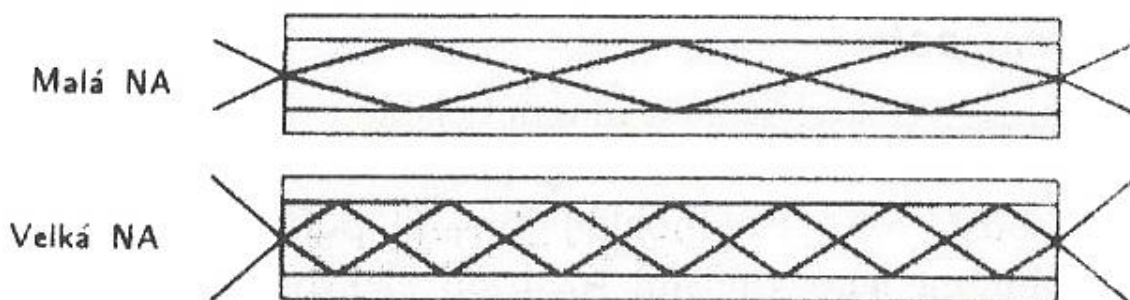
$$\sin \theta_a = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.2.3-6)$$

Po úpravách počátečního vztahu získáváme rovnici pro výpočet úhlu θ_a , který závisí pouze na hodnotách indexů lomu vlákna. Pravou stranu rovnice (1.2.3-6) nazýváme numerickou aperturou vlákna a můžeme ji zapsat jako

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.2.3-7)$$

$$\theta_a = \arcsin NA \quad (1.2.3-8)$$

Volba indexů lomu jádra a pláště ovlivňuje hned několik vlastností optického vlákna. Jak již bylo ukázáno výše, vychází z nich právě velikost příjmového kužele (obrázek 12). S tím se mění i mezní úhel uvnitř vlákna. Při velkých úhlech $\bar{\theta}_c$, pro které vlákno vede paprsek, vznikají také dlouhé optické dráhy a světlo se šíří prostředím pomaleji. Zároveň se již více projeví závislost indexu lomu na vlnové délce a může docházet k časové disperzi světla, kdy signály různých barev vstupující do vlákna ve stejnou chvíli na konci z vlákna vychází v odlišných časech.



Obrázek 12: Vliv velikosti NA (Saleh, Teich, 1991)

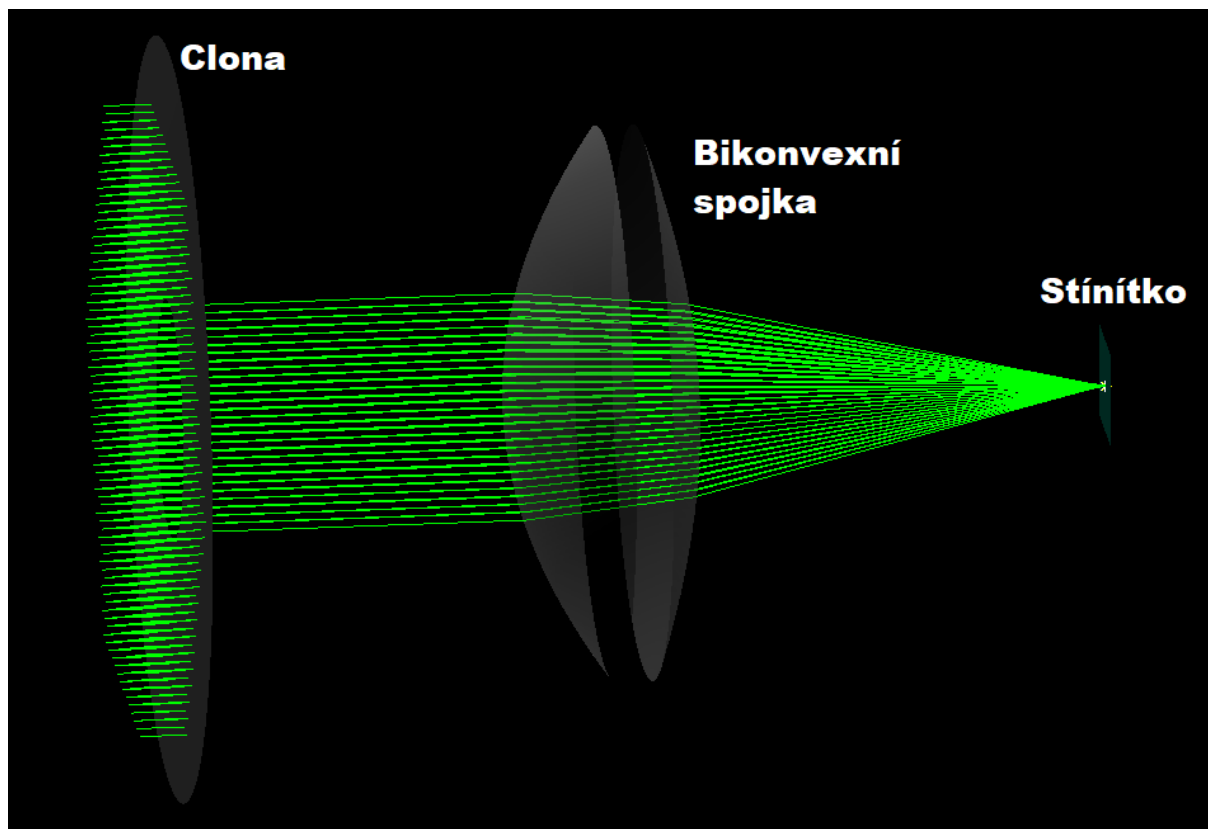
Pro různé aplikace jsou tedy vhodné různé hodnoty NA. Pokud vláknem chceme pojmout světlo z co největšího prostoru, zvolíme vzdálenější hodnoty n_1 a n_2 . Naopak pokud chceme informaci přesunout co nejrychleji a například zamezit vniknutí nežádoucích paprsků z okolí do vlákna, zvolíme hodnoty blízké. Protože většina reálných aplikací zahrnuje napojení konektorem přímo ke zdroji paprsků a úhel θ_a je minimální, vznikají prakticky výhradně vlákna s velmi malými rozdíly indexů lomu. U jádra jde nejčastěji o hodnoty 1,44 až 1,46 a index lomu pláště je menší jen o 0,1 až 2 % [10].

V našem případě je cílem efektivní sběr světla, typicky z širokého zorného pole. Z toho důvodu je výhodné využívat vlákna s vysokou numerickou aperturou. Vzhledem k použití krátkého vlákna a spojitému snímání intenzity světla nevzniká problém s časovou disperzí vlnových délek měřeného signálu.

1.3 Počítačové simulace

Při tvorbě návrhů jednotlivých konceptů pro sběr světla je výhodné před samotnou konstrukcí a případnou výrobou nových součástí pro sestavu vyzkoušet danou konfiguraci v počítačové simulaci. S použitím vhodných programů je možné předpovědět, jak velká část intenzity světla by se v realizaci dané konfigurace mohla přenést. Tím je možné předejít vynakládání zdrojů na zcela neefektivní způsoby sběru světla. Výsledky se i přesto od těch skutečných mohou značně lišit, protože v simulacích je jen obtížně možné zahrnout vady optických systémů, především vliv difrakce na čipu DMD.

V této práci se pro počítačové simulace využívá toolbox pro MATLAB s názvem Optometrika od autora Yuryho Petrova [11]. Program sleduje jednotlivé paprsky (raytracing) generované podle počátečního nastavení ve zdroji a jejich průchod prostředím, se kterým interagují podle Snellova zákona, zákona odrazu a Fresnelova principu. Při tvorbě jednotlivých sestav se všechny elementy umísťují na virtuální „lavici“ (bench) – souřadnicový prostor.



Obrázek 13: Příklad sestavy v toolboxu Optometrika (Petrov, 2019)

Kód každé sestavy je psán v klasickém skriptu programu MATLAB a je tedy možné kombinovat funkce tohoto programu i s funkcemi MATLABu samotného. Pro určení efektivity jednotlivých sestav tak například můžeme počítat, kolik paprsků dopadajících na stínítko splňuje podmínky pro vedení vláknem – dopadají do určité vzdálenosti od středu stínítka (dopadají na vstup vlákna) a maximálně pod úhlem odpovídajícím numerické apertuře vlákna.

Raytracing je také stejným způsobem v opačném uspořádání využíván v počítačové grafice v renderování 3D obrazu. Zde se naopak sleduje průběh paprsků od pozorovatele (kamery) a propočítává se jejich interakce s objekty. Díky tomu mohou vznikat graficky realistické odrazy na vodních plochách, rozptyl světla na hrubém povrchu či efekt skleněné tabule [12].

1.4 Detektory

Informace získaná z masky nastavené na DMD může tedy být do jednoho bodu sesbírána různými způsoby. Dále je pak důležité vybrat vhodný systém pro analýzu získaných dat. I zde existuje několik možností, každá se specifickými výhodami a nevýhodami.

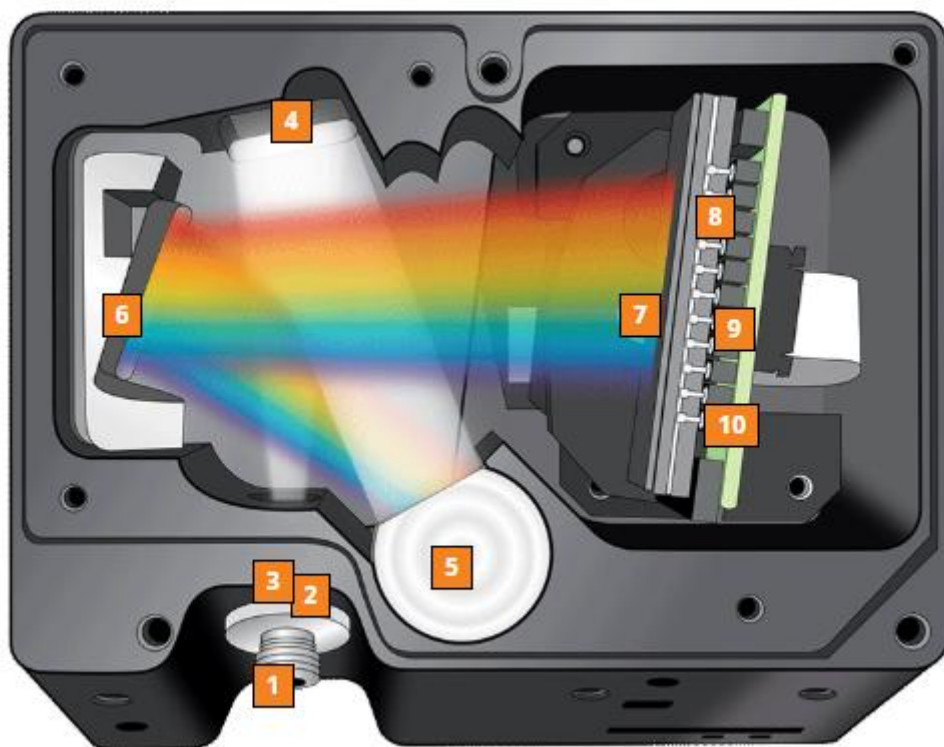
1.4.1 Fotodioda

Nejjednodušším snímačem, který může být v komprimovaném snímání využit, je fotodioda. Ta využívá vnitřního fotoelektrického jevu – do valenčního pásu polovodiče dopadá záření, které dodá energii elektronům v něm. Elektron se zvýšenou energií může přejít přes zakázaný pás do pásu vodivostního. Díky tomu se zvyšuje proud procházející v závěrném směru a záření je detekováno.

V komprimovaném snímání představuje použití fotodiody jedno z nejméně náročných řešení, které zároveň nabídne nejméně informací. Pokud se umístí přímo do požadované pozice místo vlákna, odpadá nutnost řešit numerickou aperturu při dopadu. Zároveň má typicky větší rozměry než vstup vlákna, díky čemuž nabízí větší toleranci při přípravě sestavy a může pojmout více z dopadajícího světla. Dokáže však měřit pouze celkovou intenzitu světla a není schopna rozeznat fotony jednotlivých vlnových délek. Není tedy s její pomocí možné určit zastoupení jednotlivých vlnových v obraze. Toto je možné částečně vyřešit větším množstvím měření s použitím pásmových filtrů, čímž se ovšem sestava značně komplikuje a výrazně se zvýší celkový čas nutný k získání informace, jelikož je pro každé pásmo nutné udělat celý nový snímek.

1.4.2 Spektrometr

Hlavním cílem sběru světla do optického vlákna je možnost signál zpracovat optickým spektrometrem. Díky tomu můžeme získat závislost intenzity na vlnové délce dopadajícího světla. Při vytvoření spolehlivé sestavy pro generování masek a sběr světla je poté možné v závislosti na optických vlastnostech použitých součástí měnit rozsah měřených vlnových délek pouze výměnou spektrometru. V ideálním případě by tedy sestava vytvořená pro měření viditelného spektra mohla měřit také blízké infračervené vlnové délky, pokud bude použit NIR (near-infrared) spektrometr.



Obrázek 14: Princip spektrometru Flame (Ocean Optics, Inc.,2019)

Fungování optického spektrometru se do jisté míry může lišit v závislosti na výrobci. Pro popsání principu fungování tedy využijeme spektrometr Flame [13] používaný ve většině této práce (obrázek 14). Optické vlákno je připojeno na konektor spektrometru (1). Zde do spektrometru vstupuje světlo získané ze sběrné sestavy. Na konec vlákna přiléhá vstupní štěrba sloužící jako clona (2). Její velikost ovlivňuje některé vlastnosti spektrometru – úzké clony umožňují lepší rozlišení, zatímco široké clony se více hodí na slabé zdroje světla, u kterých je potřeba propustit co největší množství světla. Společně s clonou se občas do vstupu umísťují také pásmové filtry (3). Díky nim můžeme měření omezit pouze na vybrané vlnové délky a zároveň zamezit vstupu vyšších řádů difrakce. Svazek paprsků vstupující z vlákna do spektrometru je divergentní. Z toho důvodu nejprve dopadá na kolimující zrcátko (4), které z něj vytvoří svazek kolimovaný a odrazí jej na difrakční mřížku (5). Zde se dopadající světlo dělí na jednotlivé vlnové délky a po odrazu od fokusujícího zrcátka (6) na detektor (8). Detektor je lineární sada několika tisíc pixelů (podobně jako u CCD čipů), které reagují na dopad fotonů. Díky rozložení světla na difrakční mřížce dopadá na každý pixel specifická vlnová délka. Při měření větších rozsahů vlnových délek je možné umístit před detektor ještě speciální čočku (7), která zužuje více vlnových délek na kratší úsek detektoru. I když jsou druhé a třetí harmonické vlny zachyceny již na vstupu do přístroje, samotná difrakční mřížka jich nepatrné množství vytváří také uvnitř. Z toho důvodu se občas instaluje ještě druhý filtr (9) v místě detektoru. Optické sklo BK7, které kryje detektor, může být také pro měření UV nahrazeno křemenem (10). Analogový signál získaný z detektoru je poté s pomocí USB přenesen na zpracování softwarem a vygenerování informace o získaných intenzitách.

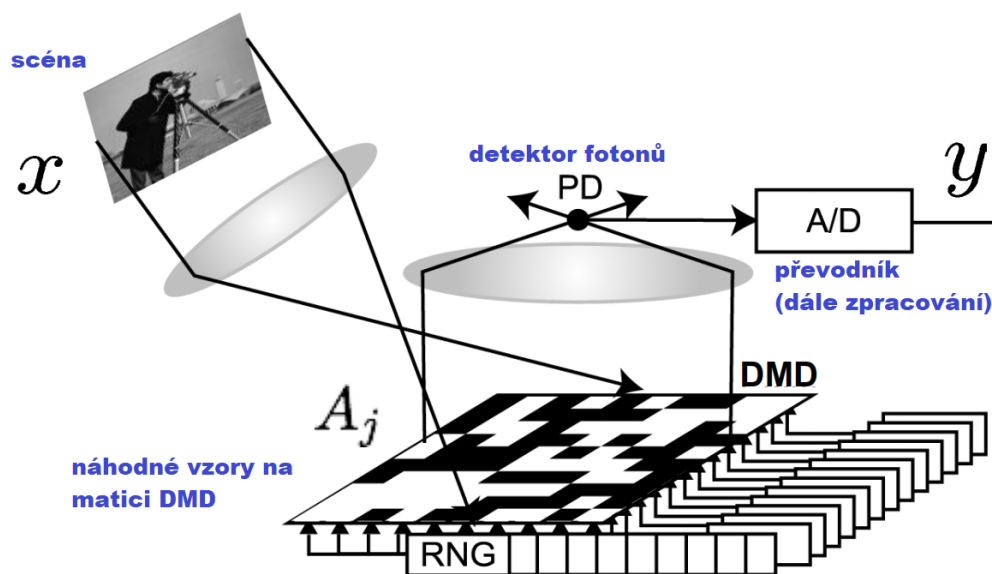
2 Single-pixel camera

Po seznámení se s jednotlivými prvky využitými v experimentální sestavě je důležité seznámit se i s vlastními principy komprimovaného snímání a takzvané jednopixelové kamery (single-pixel camera, SPC). V průběhu této kapitoly zároveň budeme porovnávat tento princip s klasickým způsobem pořizování obrazu a poukazovat na výhody a nevýhody obou uspořádání.

Při konvenčním snímání je obraz, který má být zachycen, přes sadu několika čoček nebo zrcadel (pro minimalizaci optických vad) fokusován na čip (nejčastěji CCD nebo CMOS), na kterém se nachází velké množství snímačů. Každý z těchto bodů poté získává informaci o světle dopadajícím přímo do tohoto místa. Pro pořizování barevných fotografií se pak nejčastěji volí skupina bodů, z nichž každý je vybaven specifickým filtrem a sleduje tak intenzitu světla v určité oblasti vlnových délek. Při zpracování poté máme informaci o intenzitě světla v každém jednotlivém bodě obrazu, případně o intenzitách určitých barev, z čehož software vytvoří původní barvu.

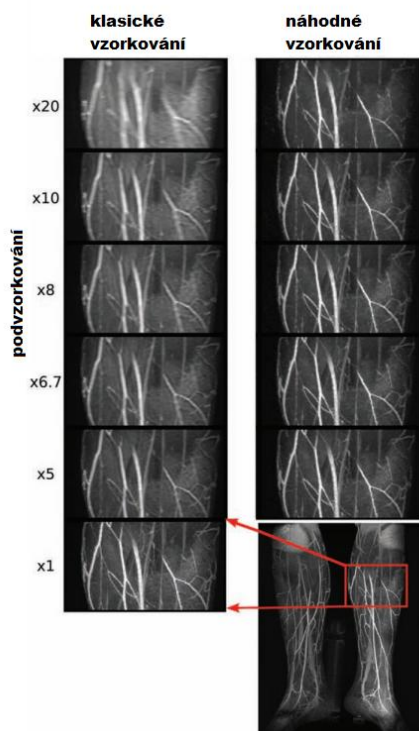
Při tvorbě těchto fotografií v reálné situaci však většinou vzniká veliké množství informací, které poté nejsou ve výsledném obraze využité. Příkladem toho je rozdíl mezi formátem fotografií RAW a komprimovanými verzemi, například .jpeg. Výsledná fotografie se však v těchto dvou případech prakticky neliší. Pokud není v plánu fotografii výrazně upravovat, nemá obrovský rozměr formátu RAW prakticky žádný význam. Většinou tedy dochází při fotografování k získání velkého množství dat, ze kterých je valná většina okamžitě zahozena při komprimaci. V systému přesto proběhne velký počet měření – u barevné fotografie nejčastěji čtyřikrát větší počet než počet bodů rozlišení (dva zelené, jeden červený a jeden modrý pixel tvoří jeden „barevný“ pixel).

Vznikla tedy úvaha, zda není možné pořídit rovnou fotografii bez nutnosti velkého množství zbytečných dat a snížit počet nutných měření na minimum. Toto vedlo k vytvoření takzvaného komprimovaného snímání a později i SPC. Předpokladem pro využití tohoto postupu je, že získávaná informace je takzvaně řídká (sparse) nebo též komprimovatelná. Řídký signál znamená, že existuje taková reprezentace (báze), ve které je možné signál popsat pomocí vektoru nebo matice, kde velká většina prvků je rovná nule a jen malý počet prvků je nenulový. U obrazu je taková vhodná reprezentace Fourierova nebo waveletová transformace. Tento předpoklad ale splňuje valná většina reálných situací (možných fotografií). Díky tomu je totiž možné do jisté míry obejít Shannůvův teorém. Pokud je totiž vrcholů velice málo, můžeme místo vzorkování s pravidelnými intervaly, které vy tomuto teorému podléhalo, využít náhodné vzorkování. V něm není konstantní časový rozdíl mezi jednotlivými vzorkovacími body. Nahodilost těchto bodů nám umožňuje malý počet vrcholů odhalit i s menším počtem měření, než by bylo potřeba při pravidelném vzorkování [14]. Tento způsob obejití Shannonova teorému je základem komprimovaného snímání. Díky náhodnému faktoru v získávání informace je možné původní obrázek zrekonstruovat s výrazně menším počtem měření.



Obrázek 15: Schéma jednopixelové kamery (Candes, 2010)

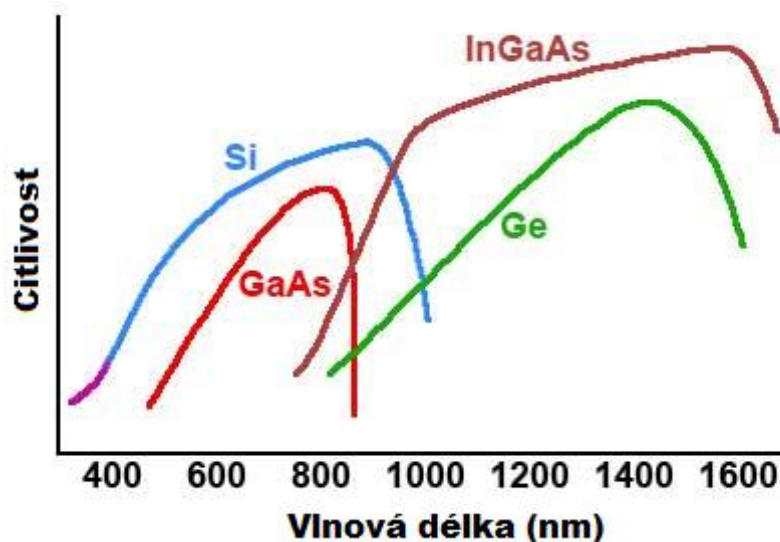
Principy fungování SPC (obrázek 15) se mohou v mnohém lišit hlavně použitím různých součástí pro generování náhodných masek a podobně jako v této práci různými způsoby sběru světla. Ve všech případech je však scéna přes optickou soustavu zobrazena na náhodnou (nebo pseudonáhodnou) masku. Tato maska vždy část intenzity propustí nebo odrazí požadovaným směrem. Po úspěšném sběru světla na detektor je změřena celková intenzita pro danou masku. Se znalostí masky (ze kterých míst je intenzita snímána) a její intenzity je poté z určitého množství měření možné zrekonstruovat původní obraz. Pro výpočty při rekonstrukci obrazu se nejčastěji využívá algoritmus TVAL3, který umožňuje vytvořit obraz z neúplné informace [15]. Počet těchto měření může být přitom výrazně menší než počet pixelů (měření) pro normální snímání stejné fotografie (obrázek 16).



Obrázek 16: Angiografie klasickým a komprimovaným snímáním. Se zvyšujícím se podvzorkováním klesá kvalita klasické fotografie výrazně rychleji. (Michael Lustig, 2009)

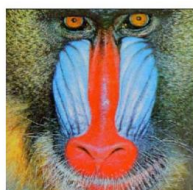
Komprimované snímání má oproti klasickému několik výhod i nevýhod. V současnosti jde stále o spíše experimentální uspořádání a v porovnání se zaběhnutou technologií je pořizování fotografií časově náročné. To do značné míry ovlivňuje již fakt, že měřičem je jediný bod, kvůli čemuž musí být masky měřeny jedna po druhé. Rychlost snímání je tedy nejvíce závislá na technickém řešení kamery, kvalitně vytvořené kamery již dnes umí zrekonstruovat i několik snímků za vteřinu a vytváří potenciál pro komprimovaná videa [16]. Zároveň jsou zatím sestavy výrazně větší než klasické fotoaparáty, které se v dnešní době vejdou i do mobilních telefonů.

Klasický snímač je cenově dostupný hlavně díky vlastnostem křemíku – levného materiálu používaného v čípech fotoaparátů. Takto vybavené čipy registrují vlnové délky velice podobné těm, na které reaguje lidské oko (obrázek 17). Problém nastává při snímání vlnových délek mimo tento rozsah, převážně poté v infračervené oblasti. Zde je již zapotřebí využití jiných materiálů (nejčastěji germania nebo slitiny gallia) při tvorbě snímačů. Tím ovšem narůstá cena výsledné kamery. Zároveň je u konvenčních infračervených kamer nutné kvalitní chlazení, aby nebyl snímek ovlivněn ohřevem součástek a časovou nestálostí snímače.

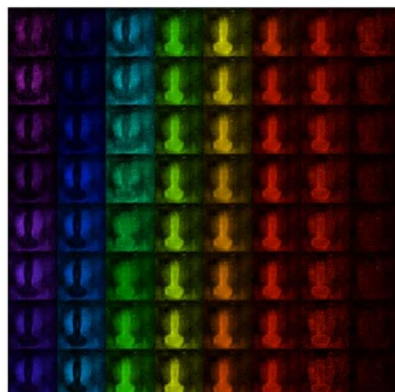


Obrázek 17: Relativní citlivost různých materiálů v polovodičích fotodiody (Eric Coates, 2007)

V případě komprimovaného snímání je problém drahého snímače omezen na jediný pixel (fotodiodu). Intenzity získávané z příchozích masek se zároveň statisticky musí pohybovat kolem jedné střední hodnoty, jelikož jde o náhodné pokusy, u kterých vzniká normální rozdělení získaných intenzit. Časová nestálost infračerveného snímače a ohřev součástí sestavy se projeví postupným růstem střední hodnoty dat s časem. Tento problém lze u komprimovaného snímání jednoduše odstranit odečtením tohoto časového nárůstu od získaných hodnot bez nutnosti tvorby složitého chlazení.



**původní
barevná
fotografie**



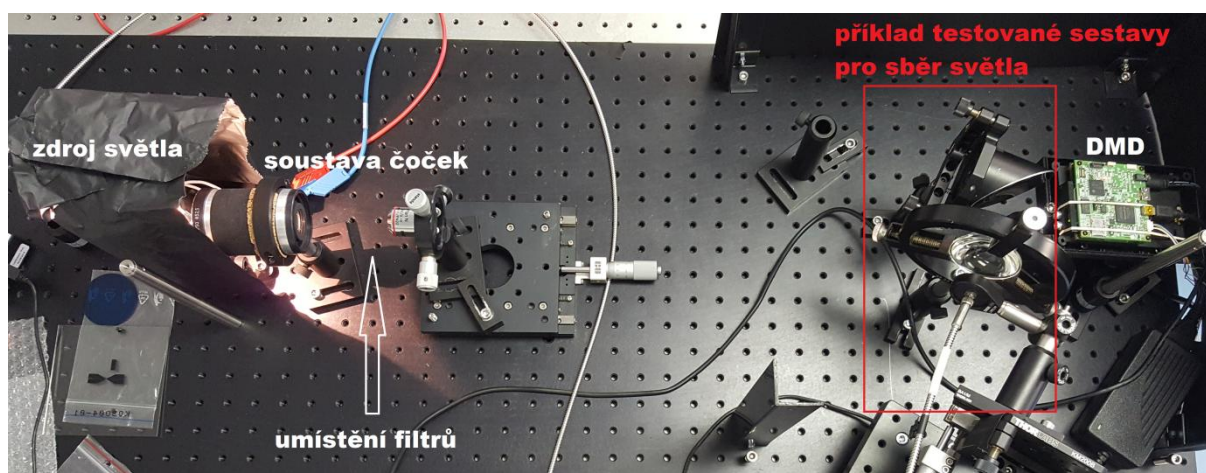
hyperspektrální krychle

Obrázek 18: Hyperspektrální komprimované snímání (Candes, 2010)

Zároveň při využití spektrometru (ve viditelném i IR spektru) v SPC získáme s menším počtem měření potenciálně výrazně užitečnější informaci o intenzitě jednotlivých vlnových délek. Díky tomu můžeme vytvořit hyperspektrální krychli fotografované situace (obrázek 18) [17]. Ve znalosti těchto informací se skrývá v budoucnosti veliký potenciál. Velké množství látek, převážně plynů, není pro běžné oko viditelné. Absorbují ovšem určité vlnové délky, což je v hyperspektrálních snímcích pozorovatelný jev. Díky tomu je například možné detekovat úniky jedovatých látek do ovzduší.

3 Měření

Hlavní náplní této bakalářské práce je vytvořit co nejefektivnější systém pro sběr světla v komprimovaném snímání. Základem celé sestavy byl zdroj světla – 20W žárovka, na kterou bylo přiváděno napětí 12 V a procházel skrz ni proud přibližně 1,65 A. Světlo z ní bylo zfokusováno na vzorek (filtr), který byl další čočkou (resp. mikroskopickým objektivem) přezobrazován na DMD čip, které vytvářelo měřené náhodné masky. Soustavu čoček bylo podle potřeby možné upravovat nebo do ní umístit různé překážky či barevné filtry pro sledování vlivu na celkový obraz (obrázek 19).

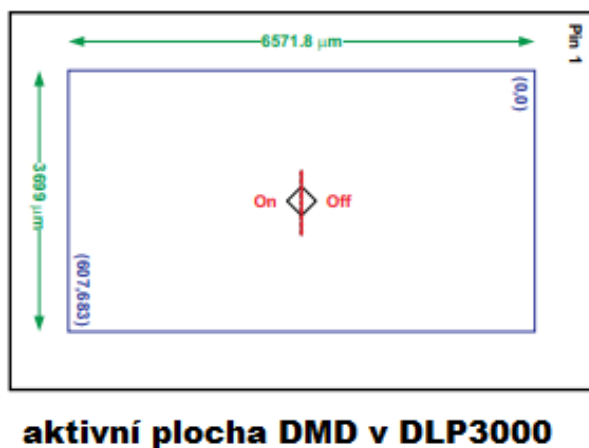


Obrázek 19: Laboratorní sestava pro komprimované snímání

Pro měření byly použité předpřipravené programy, které v MATLABu zajišťovaly komunikaci s jednotlivými prvky sestavy. Po úspěšném navázání komunikace programu s DMD byla na čip poslána sekvence jedniček a nul, podle kterých se nastavila mikrozrcátka a vytvořila se požadovaná maska. Do jedné takové komunikace s čipem DMD bylo možné umístit údaje maximálně pro 96 masek. Program byl také propojený se spektrometrem, od kterého po nastavení masky získal údaje o intenzitách jednotlivých vlnových délek. Po provedení měření všech masek v jedné komunikaci programu s čipem bylo možné odeslat další sadu masek a stejný postup opakovat do získání požadovaného množství údajů.

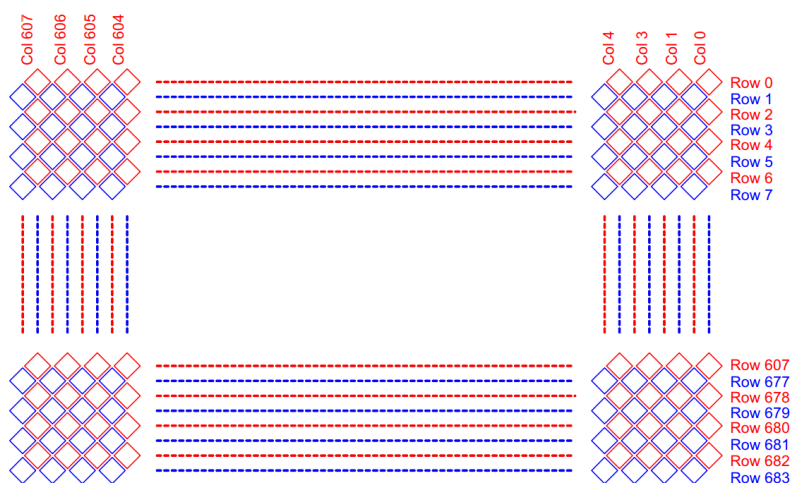
3.1 Difrakce na DMD

V případě naší sestavy bylo použito DMD, které je součástí výrobku DLP3000 od Texas Instruments. Jak vyplývá z názvu produktu, jedná se o nástroj původně určený k promítání světla. Za tímto účelem na DMD střídavě svítily RGB světlo emitující diody, které v kombinaci s nastavením zrcátek tvořily barevný obraz (tzv. light engine). Pro účely komprimovaného snímání byla tato část vymontována a ponechán byl pouze čip DMD s původní řídicí jednotkou, ta z programu tedy nyní dostávala pouze pokyny k nastavení zrcátek a ne zapínání/vypínání diod.



Obrázek 20: Parametry DMD v DLP3000 (Texas Instruments, 2012)

Celková velikost čipu, na který jsme mohli promítat světlo, v tomto případě činila obdélník o rozměrech přibližně $6,6 \times 3,7$ mm. V tomto obdélníku se nachází mikrozrcátka rozmístěná do 684 řad a 608 sloupců. Každé zrcátko byl čtverec o délce strany $7,637 \mu\text{m}$ [18].



Obrázek 21: Rozmístění zrcátek v DLP 3000 (Texas Instruments, 2012)

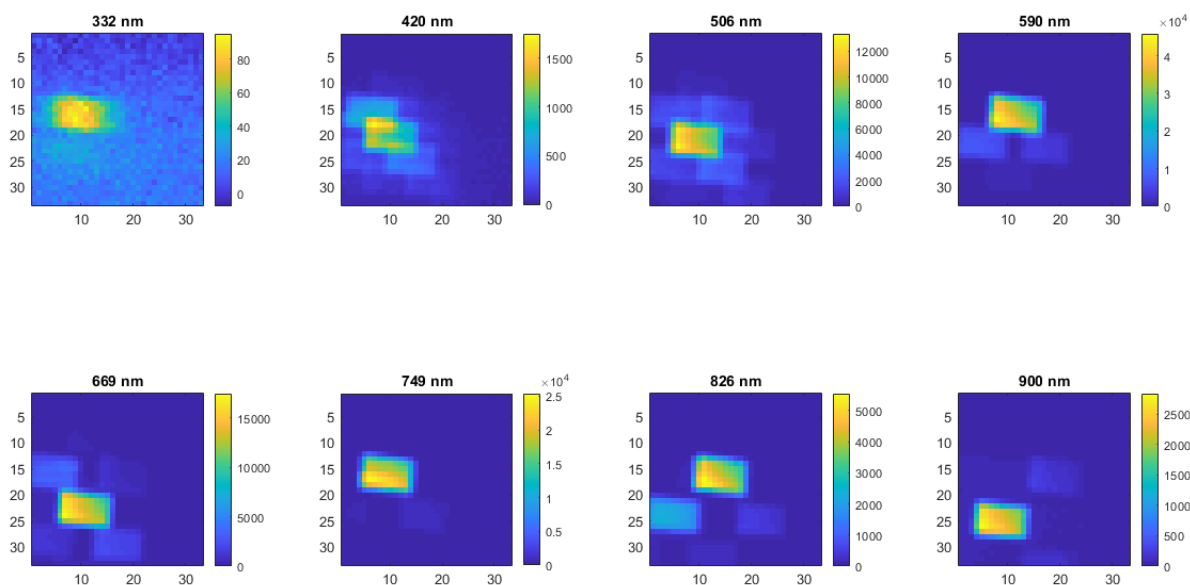
S rozměry zrcátek v použitém DMD ovšem přichází největší komplikace celého uspořádání. Velikost zrcátka se totiž v tomto případě značně přibližuje vlnovým délkám viditelného spektra a ještě výrazněji těm v infračervené oblasti (obrázek 20). Z tohoto důvodu se u tohoto DMD setkáme s poměrně výraznou difrakcí. Pokud DMD není zapojeno, jsou všechna zrcátka v neutrální poloze a vytváří celistvou plochu, jakmile má však být přivedeno napětí a nastaven jakýkoliv vzor, každé

zrcátko se nastavuje samostatně a i dvě zrcátka namířená stejným směrem mají mezi sebou skok a vytváří nespojitý povrch. Difrakce vznikající na DMD se velice podobá té na difrakční mřížce vzhledem k pravidelnosti struktury čipu.

$$\sin \varphi_k = \frac{k\lambda}{a} \quad (3.1-1)$$

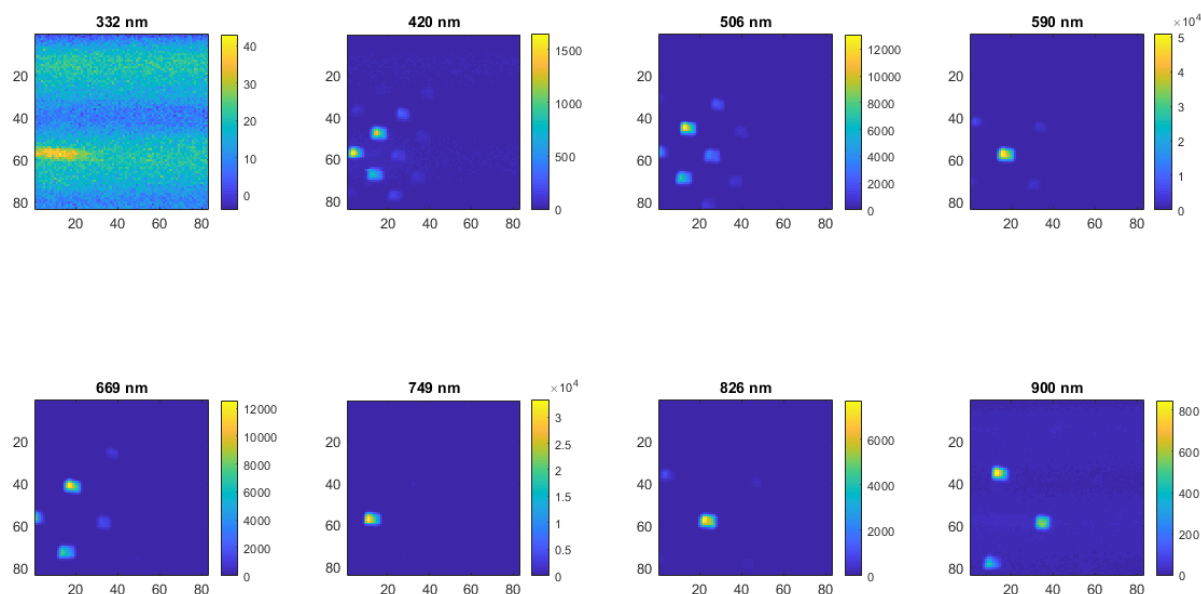
Pokud bychom do vztahu pro difrakci dosazovali za náš konkrétní případ, zjistíme, že již maximum prvního řádu se nám bude značně posouvat od optické osy. Například pro běžných 550 nm bude úhel mezi těmito dvěma směry činit 4,13°, pro krajní hranici blízké infračervené oblasti (2500 nm) tento úhel podle výpočtu vzroste již na 19,11°. Při nutnosti získat co nejvíce světla do jednoho bodu je tedy tento jev enormní komplikací obzvláště v případě vyšších vlnových délek.

Jelikož ale DMD nejsou pouze vrypy (čáry), nýbrž miniaturní čtverečky a podoba difrakčního obrazce se výrazně liší podle podoby periodické funkce (viz např. blazeování mřížek), bylo potřeba podobu difrakce pro náš konkrétní případ experimentálně naměřit. Pro tento účel byl využit princip jednobodového skenování (tzv. whiskbroom). DMD bylo nastaveno tak, aby všechna zrcátka na něm mířila jedním směrem (jednička nastavená pro všechna zrcátka). Do vzdálenosti 8 cm od DMD bylo umístěno optické vlákno upevněné na dva kolmo na sebe umístěné elektromotory. Každý z nich dokázal vlákno posunout o jeden palec (2,54 cm). Vznikl tedy čtverec o velikosti jednoho čtverečního palce, v jehož rámci se vlákno mohlo pohybovat. S předem nastaveným pravidelným krokem bylo vlákno posouváno a v každém bodě byla naměřena intenzita dopadajícího světla za použití spektrometru. Výsledkem bylo 3D pole intenzit jednotlivých bodů pro jednotlivé vlnové délky (tzv. hyperspektrální informace), ze kterého bylo možné vypočítat maxima jednotlivých řádů.



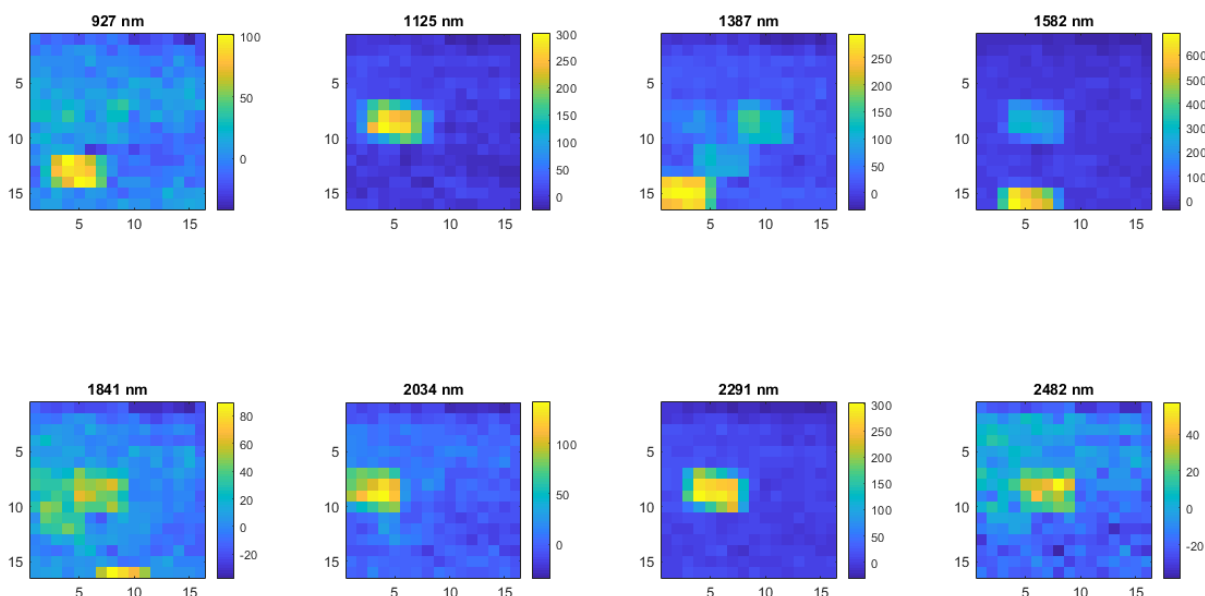
Obrázek 22: Difrakce viditelného spektra

Při prvním měření (obrázek 22) bylo použito vlákno o průměru 1,6 mm a krok motorů byl nastaven na 0,75 mm. U počáteční části spektra je patrné, že vyzařování v této oblasti je ještě velice slabé a světlo je výrazně pohlcováno krycím sklíčkem DMD a vzniká veliký šum. Na výsledném výstupu zbylých částí spektra je patrná silná závislost vzdálenosti maxim na vlnové délce, což odpovídá i vyjádření ve vzorci pro difrakci. V případě menších vlnových délek se obdélníky vytvořené jednotlivými maximy stále ještě částečně překrývají, s rostoucí vlnovou délkou se efekt zesiluje a maxima se od sebe vzdalují.



Obrázek 23: Difrakce ve viditelném spektru s použitím field lens

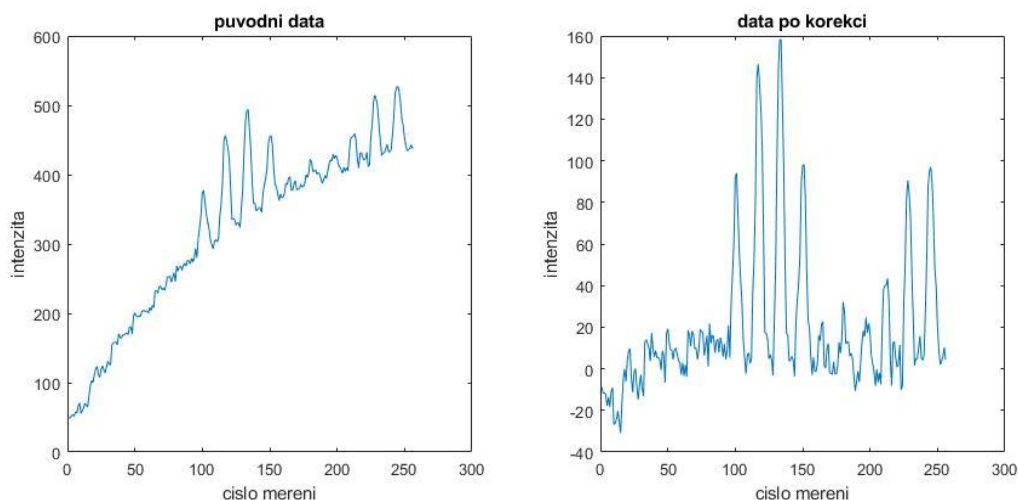
Při druhém měření (obrázek 23) bylo testováno využití slabé čočky (field lens), která byla umístěna bezprostředně před DMD. Tato čočka by měla vliv difrakce po odrazu částečně mírnit, aniž by narušila obraz dopadající na DMD. Pro přesnější sledování tohoto jevu bylo využito výrazně užší vlákno (průměr 0,4 mm) a kratší krok 0,3 mm. Z výsledků tohoto měření je ovšem patrné, že spíše než přiblížení maxim jednotlivých řádů k sobě tato čočka pouze samotná maxima zmenšila jako taková bez změny jejich polohy. Pro pomoc při sběru světla se tedy tato čočka ukázala jako nevyhovující, jelikož největší problém sestavy s ní vyřešit či zásadně omezit nelze.



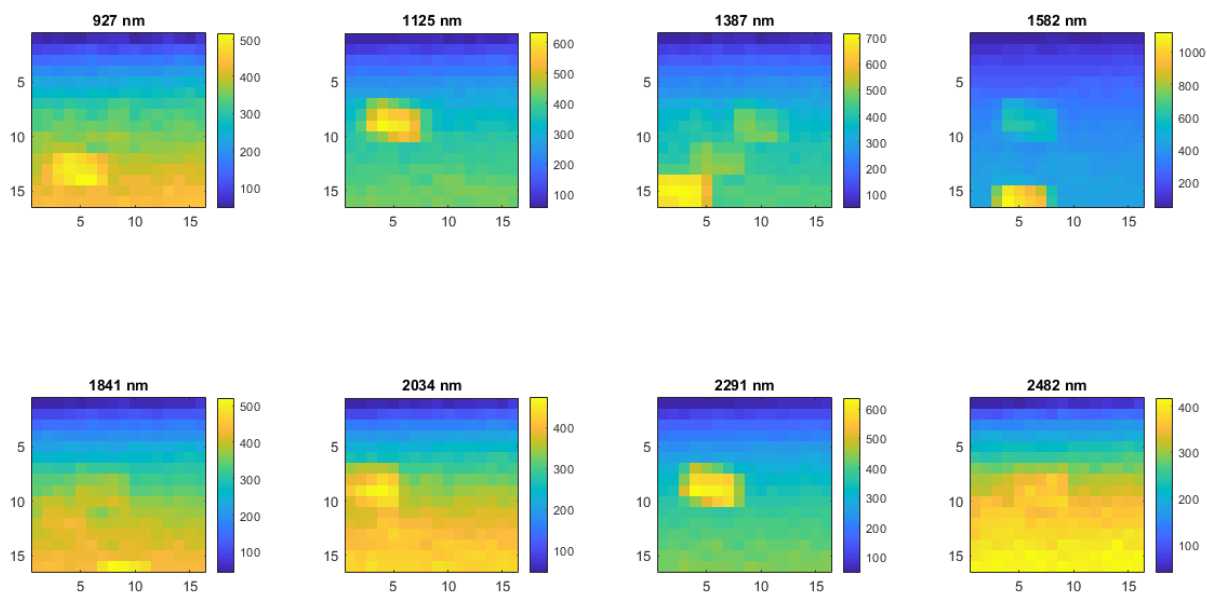
Obrázek 24: Difrakce v NIR oblasti

Jako poslední bylo důležité s využitím jiného spektrometru (NIRQuest 256 2.5) pozorovat chování difrakce mimo viditelné spektrum (obrázek 24). Zde již byla i celková pozorovaná intenzita světla velice malá a stoupal vliv šumu i temných proudů, které detektorem protékají i bez dopadu jakýchkoliv fotonů. Z tohoto důvodu bylo opět použito širší vlákno (průměr 1,6 mm) umožňující v každém měřeném bodě získat více fotonů. Zároveň ovšem tento experiment posloužil jako příklad výhody využití single-pixel kamery v infračervené oblasti. Vzhledem k tomu, že většina plochy

měřeného čtverce je mimo dopadající světlo, bylo možné snadno pozorovat v těchto tmavých místech celkový nárůst intenzity vlivem ohřevu spektrometru a temných proudů. Toto měření tedy hlavně posloužilo pro vyzkoušení korelace těchto jevů. Jelikož střední hodnota dat lineárně stoupala s počtem měření, bylo možné její změnu regresi vyjádřit a poté ji od všech dat odečíst (obrázky 25 a 26).



Obrázek 25: Korekce IR dat před tvorbou difrakčních obrazců



Obrázek 26: Data z měření NIR difrakce před korekcí

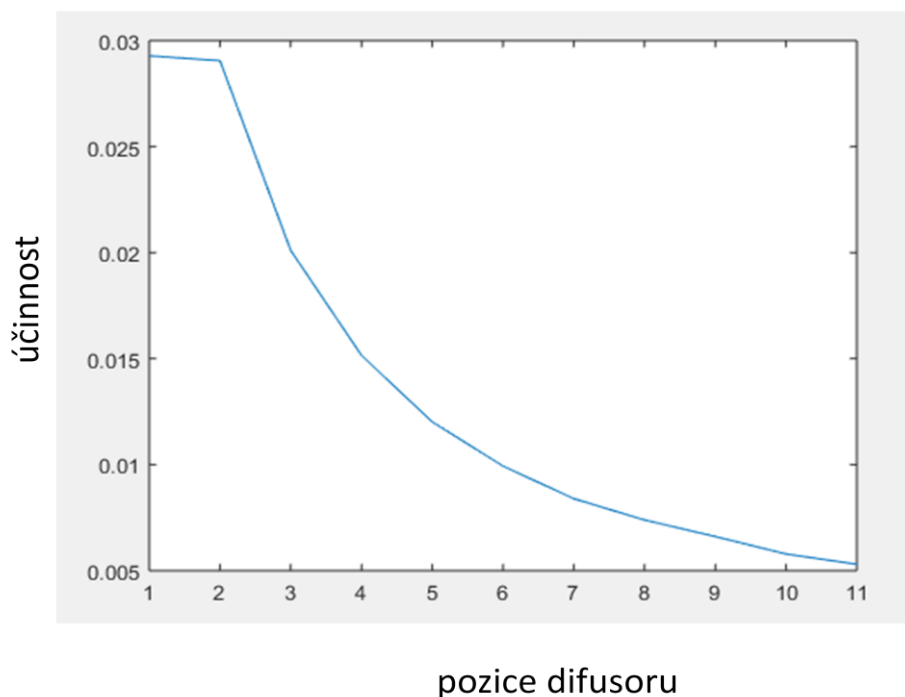
Pro korekci byla regrese prováděna polynomem druhého stupně. Díky ní byl poměrně úspěšně eliminován vliv ohřevu spektrometru. Vzhledem k trvání mohlo ovšem v rámci detektoru docházet ke složitějšímu vývoji, který by bylo nutné složitěji analyzovat v závislosti na konkrétním případě měření. Po provedení korekce tedy zůstala informace stále značně zašuměná, ale je již možné pozorovat zřetelně maxima nultého řádu ve všech případech. Pro měření jedním bodem v blízké infračervené oblasti tedy nebyl zapotřebí spektrometr se špičkovým chlazením. V SPC se navíc všechny hodnoty pohybují kolem jedné střední zcela náhodně a aproximace s následnou korelací tedy může být provedena výrazně přesněji.

3.2 Optimální poloha difusoru

V testovaných sestavách má většina součástí vcelku pevně dané umístění – například parabolické zrcadlo co nejbližší k DMD pro pojetí co nejvíce světla nebo kulový integrátor na konci sestavy v ohnisku. Výjimkou v tomto případě je difusor. Jak již zmíněno, jedná se spíše o prvek vnášející náhodný faktor do šíření paprsků a tedy pomáhá proti optickým vadám a difrakci. Při náhodné změně úhlů paprsků zároveň můžeme dosáhnout toho, že část těchto paprsků bude kolimovaná, což je případ, na který je většina optických součástí konstruována.

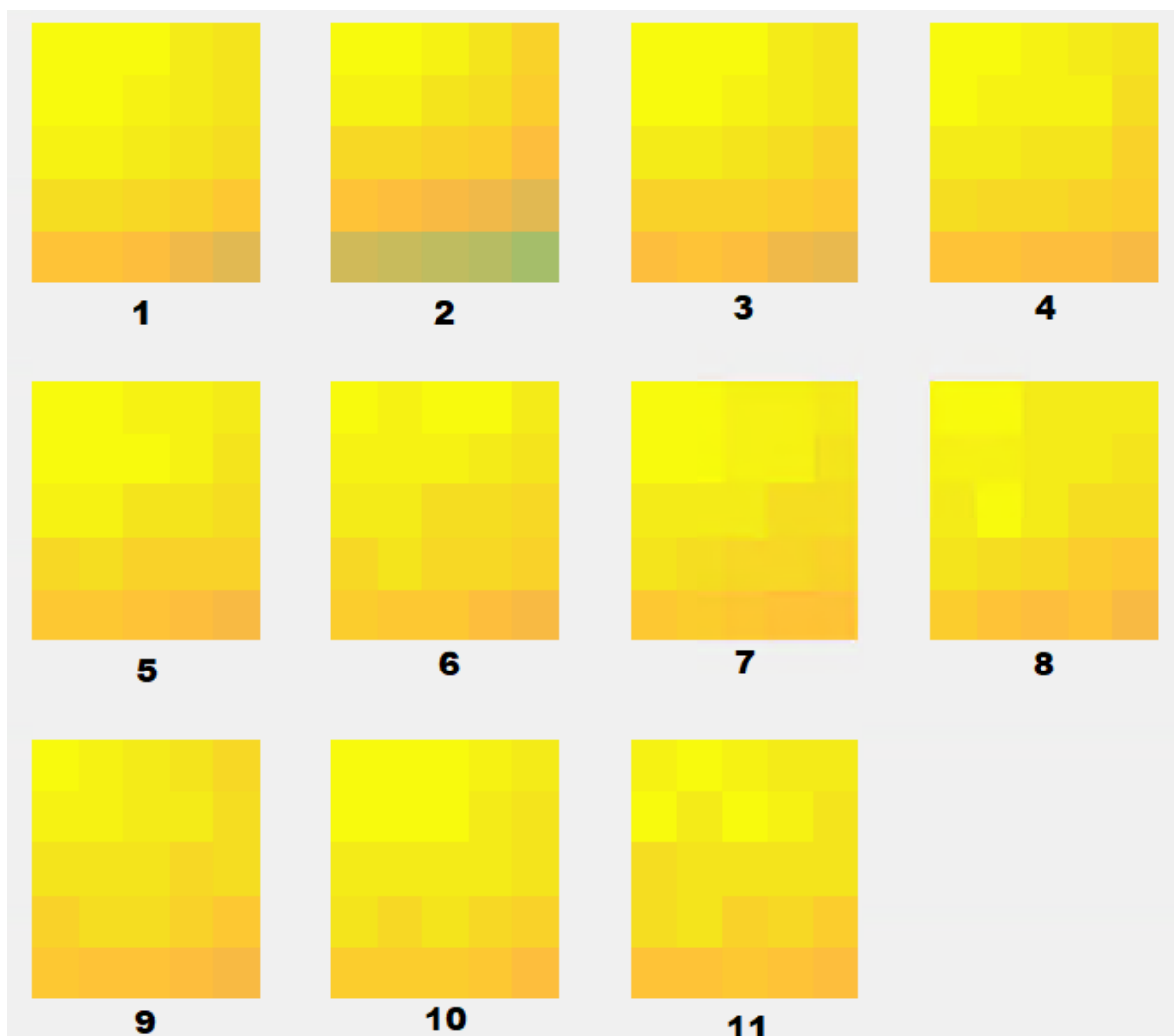
Cílem této části tedy bylo zjistit, v jaké poloze je umístění difusoru nejefektivnější. Pokud se difusor bude nacházet blízko DMD, dopadnou na něj prakticky všechny paprsky, ale po přidání náhodného faktoru může velká část paprsků sestavu opustit a cílový bod minout. Pokud naopak bude difusor daleko od DMD, kvůli difrakci na něj již dopadne méně světla, ale znárodnění je již blízko cílového bodu a mělo by do něj dopadnout více paprsků z difusoru.

Bude zde porovnávat výpočet s pomocí počítačových simulací v Optometrice a experimentální data. V případě Optometriky byla vytvořena virtuální sestava, ve které DMD sloužilo jako zdroj světla. Difusor byl vytvořen jako plocha, při jejímž průchodu paprsky mění úhel podle normálního rozdělení (viz obrázek 7). Následuje čočka a stínítko, na němž musí dopadající paprsky splnit podmínky vstupu do vlákna (vzdálenost od středu, úhel). Difusor byl lineárně posouván mezi 5 a 275 jednotkami délky (lze považovat za mm). Zároveň byla ověřována homogenita zobrazení DMD přes tento difusor. Jelikož je DMD symetrické, byla ověřována jeho čtvrtina (od středu k rohu), která byla rozdělena na 5×5 bodů. Z každého bodu bylo do systému vysláno 10^6 paprsků, které po průchodu dopadly na virtuální stínítko, na kterém se počítalo, kolik paprsků splňuje podmínky vlákna.



Obrázek 27: Účinnost umístění difusoru

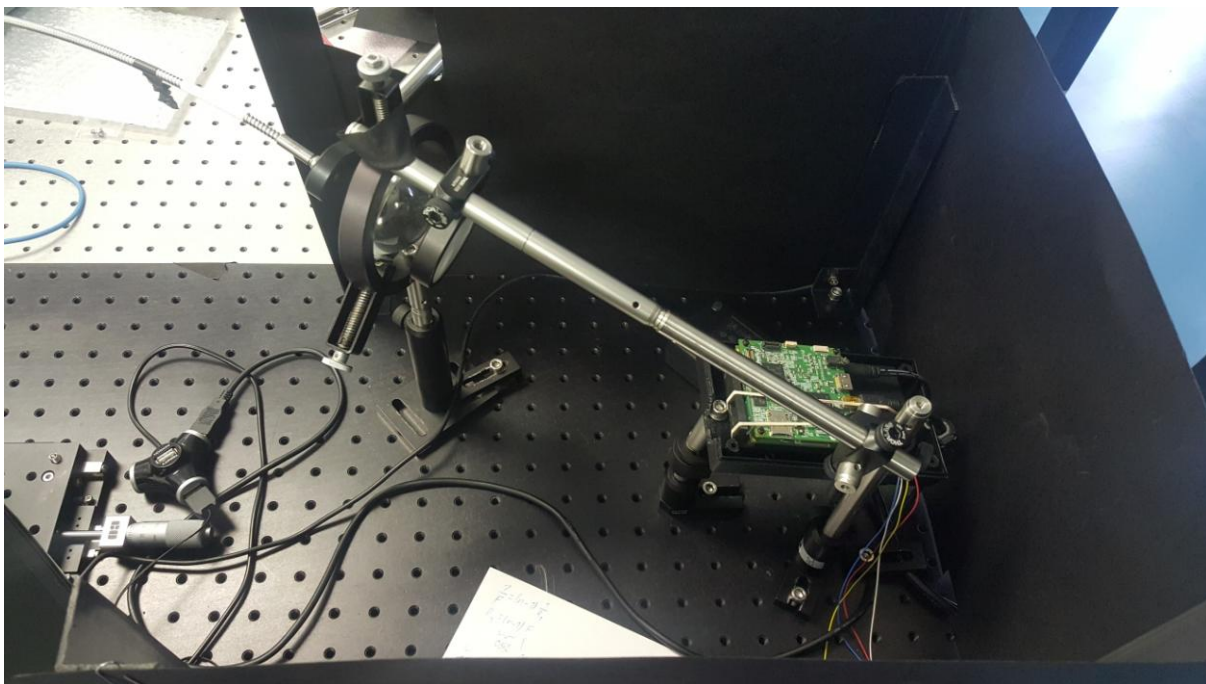
Z výsledků účinnosti (podíl paprsků splňujících podmínky vlákna a celkového počtu paprsků) je patrné, že ve všech případech ztrácíme obrovské množství intenzity (obrázek 27). V nejlepším případě (difusor 5 mm od DMD) do vlákna stejně dojdou pouze necelá 3 % paprsků. Se vzdáleností intenzita prudce klesá.



Obrázek 28: Homogenita zobrazení

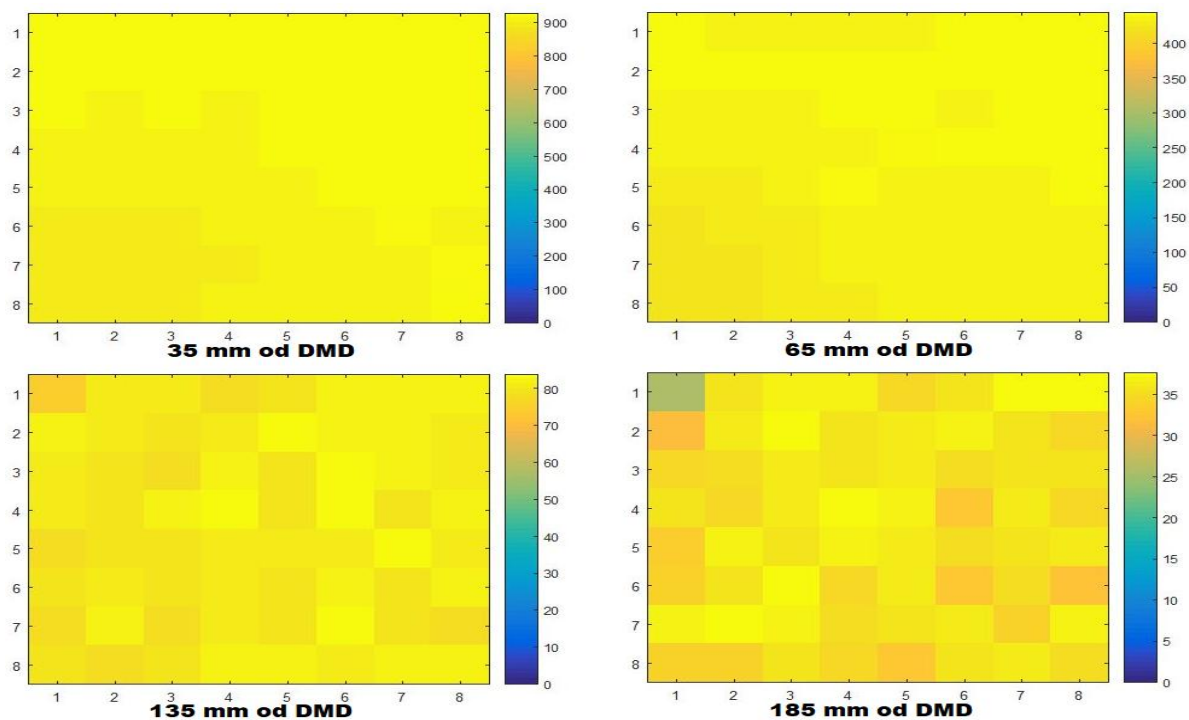
Z výstupu homogenity (obrázek 28) je patrné, že ve všech případech je nejtmavější část obrazu bod nejvíce vzdálený od optické osy virtuální sestavy. Zároveň se vzdalováním se difusoru od DMD je vidět výrazně náhodnější dopadávání paprsků. Rozdíl mezi středem a okrajem je menší za cenu vzniku prakticky nekorelovatelných dat. Pokud víme, o kolik nám intenzita světla směrem k okraji DMD klesá, jsme schopni uměle data v těchto rozích vynásobit koeficienty, které nám pomohou vyrovnat světlost celého obrazu (tzv. flat field correction).

Druhou fází bylo ověření počítačové simulace v reálné situaci (obrázek 29). Od simulovaného provedení se experiment lišil pouze v několika detailech – difusor nebylo například možné umístit přímo k DMD, jelikož by bránil příchodu paprsků ze zdroje na čip. Čočka byla v sestavě umístěna také o trochu blíže (20 cm od DMD) než v případě simulací. Difusor byl umístěn na nosník mezi DMD a čočkou, který byl rovnoběžný se směrem šíření paprsků a difusor byl tedy k tomuto směru umístěn kolmo.



Obrázek 29: Sestava pro měření vlivu difusoru

Měření homogenity zobrazení probíhalo podobně jako v případě počítačové simulace, tentokrát byl ovšem již pozorován celý čip, jelikož v sestavě musí být umístěn kolmo vůči dopadajícím paprskům a je tedy pootočen o přibližně 10 stupňů oproti ose spojující jeho polohu s čočkou. Plocha DMD byla rozdělena na 8×8 sekcí zrcátek. V každé fázi měření zkoumaným směrem mířila všechna zrcátka v jedné sekci a určil se počet fotonů získaných detektorem za jednotku času. Takto bylo možné určit homogenitu zobrazení celého čipu a zároveň poté určit průměrný počet dopadů na jednu sekci, což nám posloužilo k porovnání intenzit získaných v jednotlivých polohách (nebylo možné určit celkový počet fotonů odražených na DMD).



Obrázek 30: Vybraná měření homogenity zobrazení

Ve výsledcích (obrázek 30) můžeme vidět, že i přes změnu délek oproti simulaci je pozorovaný jev v experimentu prakticky totožný. Rozdílem je, že vzhledem k pootočení DMD je nejtmaší sekce ta nejvzdálenější od vlákna (při pohledu na DMD zepředu pravý dolní roh). Se vzdalováním se od DMD prudce klesá počet fotonů zachycených detektorem a zároveň podobně jako v Optometrice jsou již intenzity jednotlivých sekcí spíše náhodné než rozmístěné stupňovitě jedním směrem.

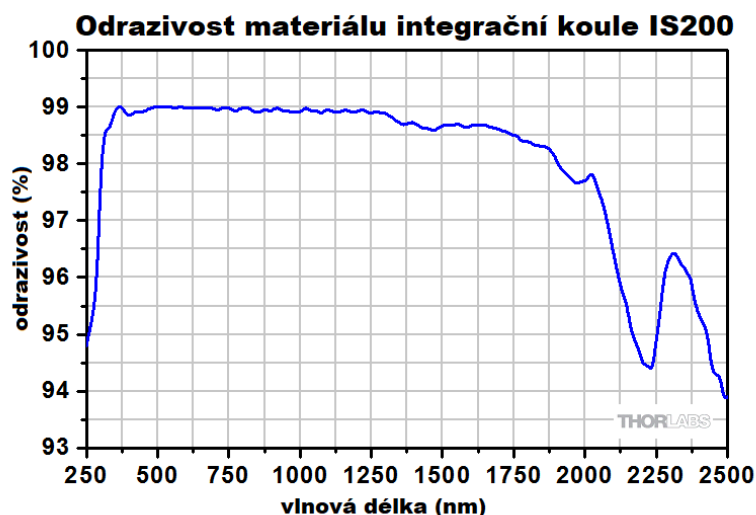
Tabulka 1: Výsledky posunu difusoru

vzdálenost od DMD (mm)	kontrast homogenity	průměrný počet fotonů (county)
35	0,96	910,1056
50	0,9545	615,4341
65	0,9479	434,6862
95	0,9416	213,2457
120	0,9312	115,9523
135	0,8858	80,4051
160	0,8057	51,6734
185	0,6863	35,2657

V tabulce je patrné, že umístit difusor co nejblíže k čipu DMD je nejvýhodnější možné uspořádání. Získáváme největší část informace a kontrast (podíl countů nejtmašího a nejsvětějšího bodu) je velice blízký jedničce. Hodnota kontrastu klesá výrazně pomaleji než celková intenzita a výrazně se mění až u jejích velmi nízkých hodnot, kde se již projevuje také šum a temné proudy. Difusor je vhodný pro zlepšení homogenity obrazu, samotná čočka ovšem kvůli difrakci způsobuje velkou spektrální selektivitu.

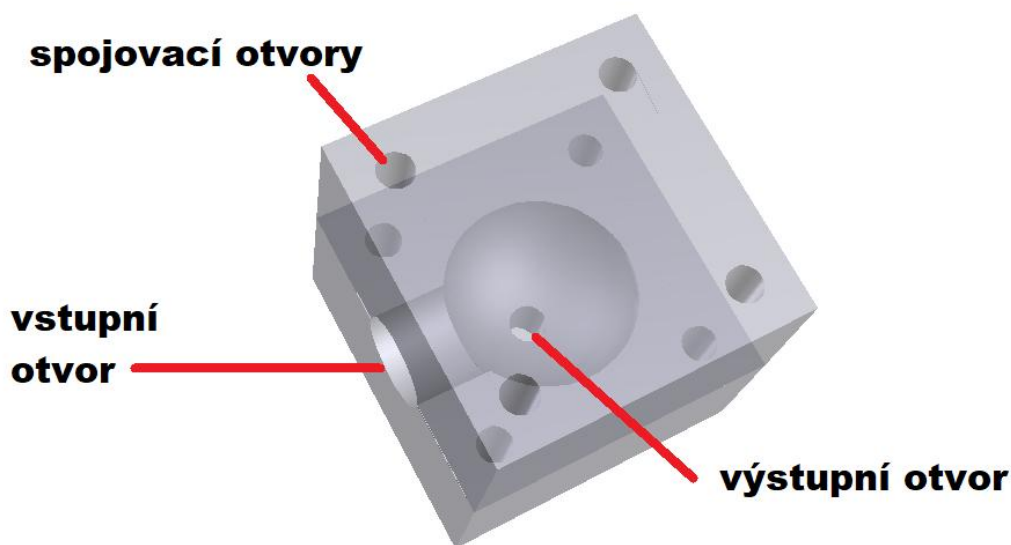
3.3 Nová integrační koule

K použití v experimentu byla v základu dostupná sériově vyráběná integrační koule IS200 od společnosti Thorlabs. Jedná se o kouli s vnitřním průměrem dva palce (50,8 mm) a třemi vyšroubovatelnými kryty otvorů o průměru půl palce (12,7 mm). Celý vnitřek koule a vnitřní plochy krytů jsou pokryté vysoce difuzním povrchem s odrazivostí dosahující 99 % (obrázek 31) [19].



Obrázek 31: Odrazivost povrchu IS200 (Thorlabs, 2010)

Pro využití v naší aplikaci je ovšem tato integrační koule zbytečně veliká a i její vstupní otvory by bylo možné zmenšit. Podle vzorce (1.2.1-8) bychom při úpravě rozměrů integrační koule a vstupního otvoru (změna parametru f) mohli dosáhnout výrazného zvýšení její účinnosti.

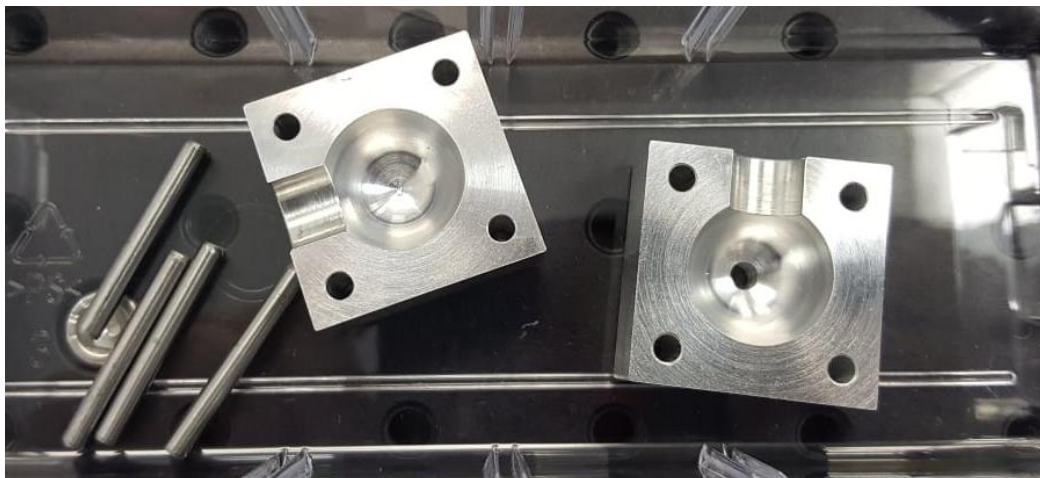


Obrázek 32: 3D model navržené integrační koule

Vznikl tak návrh nové integrační koule (obrázky 32 a 33) pro sběr světla v naší sestavě. Její vnitřní průměr činí pouze 16 mm, její součástí je jeden vstupní otvor o poloměru 7 mm a výstupní o poloměru 3 mm (optické vlákno je sice užší, ale umístěné v širším kovovém ochranném pouzdře). Vytvořené dvě poloviny byly uvnitř pokryty BaSO₄, jehož odrazivost je pouze nepatrně nižší než u IS200 (přibližně 96 %). Tyto části byly poté spojeny pomocí kovových kolíčků ve spojovacích otvorech. Pokud pro oba kulové integrátory využijeme výše zmíněný vzorec, získáme výsledný poměr (fotonový tok můžeme při určování poměru považovat za rovný jedné)

$$\frac{L_{návrh}}{L_{IS200}} = \frac{\frac{1}{\pi \cdot S_2} \cdot \frac{0,96}{1 - 0,96 \cdot (1 - f_2)}}{\frac{1}{\pi \cdot S_1} \cdot \frac{0,99}{1 - 0,96 \cdot (1 - f_1)}} \quad (3.3-1)$$

Po vypočítání ploch S , parametrů f a dosazení do tohoto vztahu zjistíme, že námi navržená integrační koule by měla mít při stejném vstupním fotonovém toku výslednou zář 2,68krát vyšší než IS200.



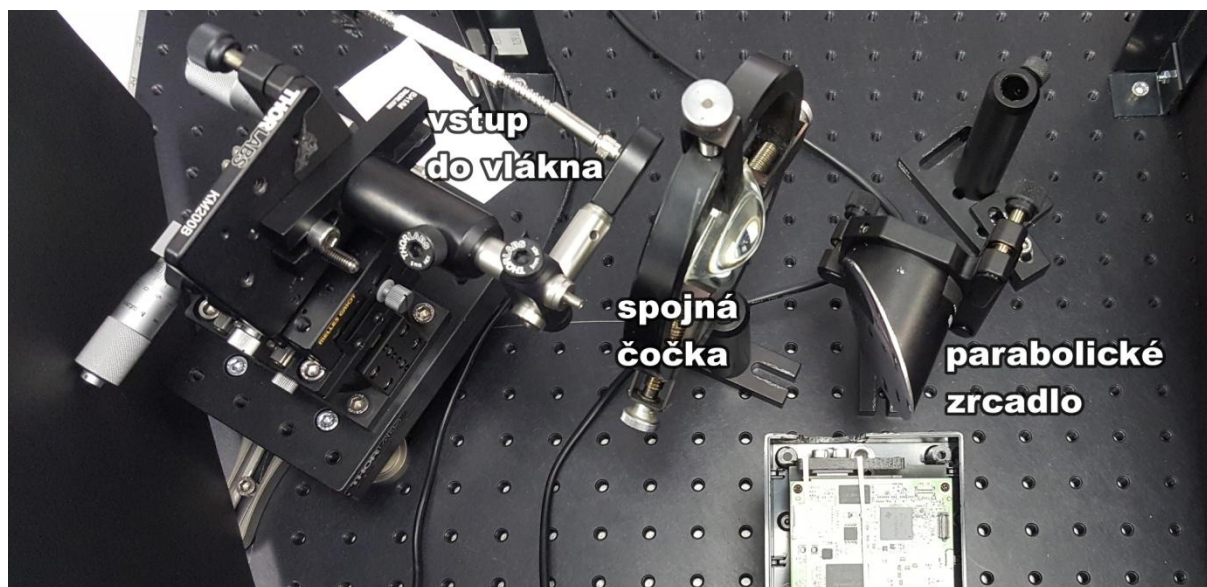
Obrázek 33: Vyrobená integrační koule před aplikací BaSO_4

3.4 Testování sestav

Po získání informací o chování dostupného DMD a závislosti chování difusoru na jeho poloze bylo možné přejít k vlastnímu testování jednotlivých uspořádání celého experimentu a porovnání jednotlivých variant mezi sebou. K tomuto účelu byly měřeny a porovnávány dva faktory. Prvním z nich bylo testování homogenity podobně jako při testování difusoru – čip byl rozdělen na 64 sekcí a byla postupně měřena celková intenzita každé sekce. Druhým faktorem bylo zachycené spektrum – závislost intenzity světla na vlnové délce. Jelikož je jako zdroj světla použita obyčejná žárovka, mělo by v ideálním případě spektrum zobrazené detektorem tvořit široký spektrální pás ve viditelném a blízkém infračerveném spektru, na kterém nebudou žádné výrazné špičkové hodnoty ani propady.

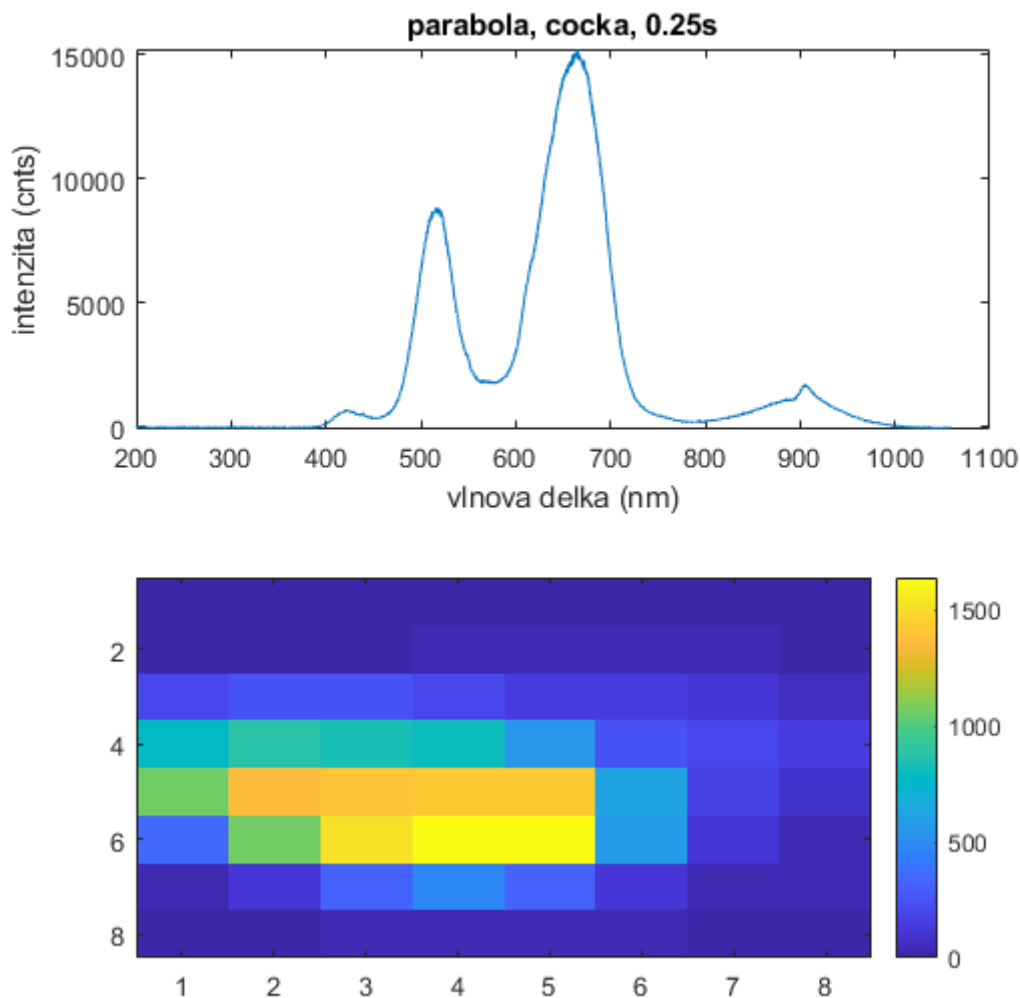
Při měření byla vždy jedna sekce zrcátek namířena do sestavy a měřil se počet fotonů zachycený z její oblasti. Nakonec byla ve směru měření natočena všechna zrcátka a získáno celkové spektrum pro celé DMD. Pro většinu experimentů byla integrační doba (čas, během kterého detektor počítá fotony) 0,25 s, pouze pro případ měření s integračními koulemi byl čas desetkrát vyšší vzhledem k velkým ztrátám intenzity uvnitř koule (viz 1.2.1).

3.4.1 Sestava 1: parabola, čočka, vlákno



Obrázek 34: Sestava 1

Jak již bylo uvedeno v části zabývající se paraboličtím zrcadlem, slouží ve většině sestav jako pomocná složka. Největší výhodou využití tohoto prvku na prvním místě je minimalizace optických vad oproti použití čočky. Zároveň je díky svému tvaru ideální pro umístění velice blízko DMD, aniž by stínila paprsky na něj dopadající. Odraz od DMD tak usměřňuje do ohniska dříve než se diverguje na příliš velkou plochu. Jelikož svazek na parabolu dopadající není dokonale kolimovaný, je jako druhý prvek využita ještě spojka. Ta pracuje v tomto případě blízko optické osy a sama tedy již do sběru světla prakticky žádné vady nevnáší. V první sestavě (obrázek 34) následuje za touto čočkou již přímo úchyt s optickým vláknem. Použito je vlákno o průměru 1,6 mm s vysokou numerickou aperturou (viz 1.2.5).

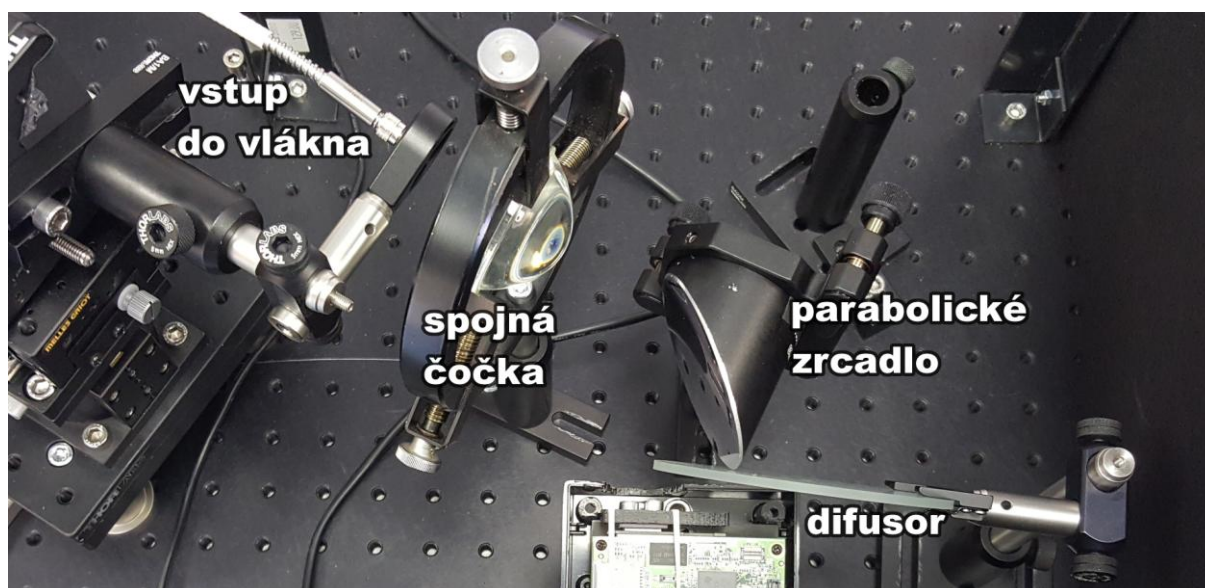


Obrázek 35: Posouzení sběru světla sestavou 1. Horní graf: spektrum světla získaného z celé plochy DMD; dolní obrázek: průměrná intenzita světla odraženého z jednotlivých sekcí DMD.

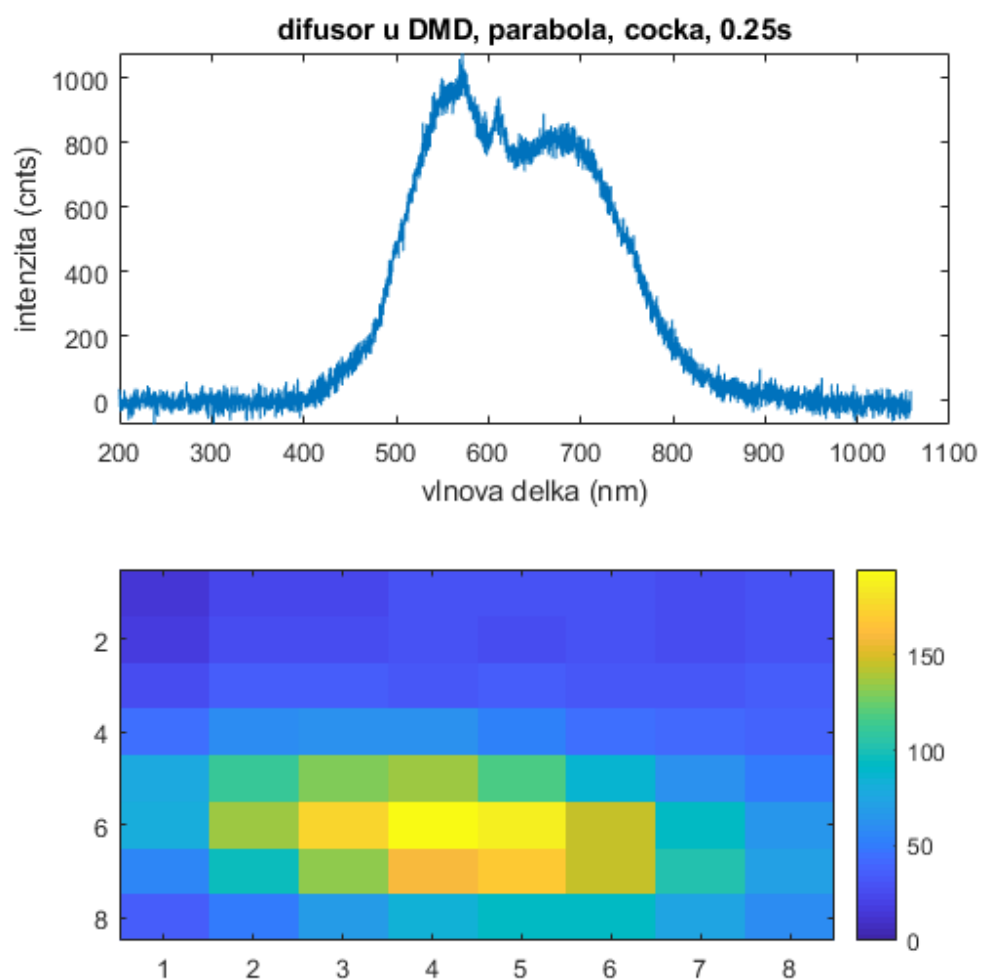
Jak je patrné z naměřených dat (obrázek 35), je nejjednodušší sestava zároveň velice problematická. V průměru je sice schopna zachytit relativně velké množství fotonů, má ale v oblastech okolo 580 a 750-800 nm vlnové délky velké propady intenzity. Toto je způsobeno kombinovaným vlivem difrakce a velice malého cíle pro dopad paprsků. Tyto vlnové délky se při difrakci na DMD odráží v úhlu, po kterém při průchodu sestavou nedopadnou na střed úchytu a tedy ani do vlákna. Podobný výsledek ukazuje také test homogenity. Vláknem vcelku spolehlivě pojme světlo ze sekcí v okolí optické osy, mimo ni ale intenzita prudce klesá a na okrajích již naměříme prakticky nulové hodnoty. Rekonstrukce jakéhokoliv obrazu by tedy mimo střed byla prakticky nemožná.

3.4.2 Sestava 2: difusor před parabolou

Po získání výsledků z první zkoušené sestavy bylo patrné, že je potřeba provést úpravy jejího řešení. Jako první byl tedy vyzkoušen již dříve testovaný difusor (obrázek 36). Podle výsledků z určování vlivu jeho umístění byla vybrána pozice co nejbližší DMD čipu.



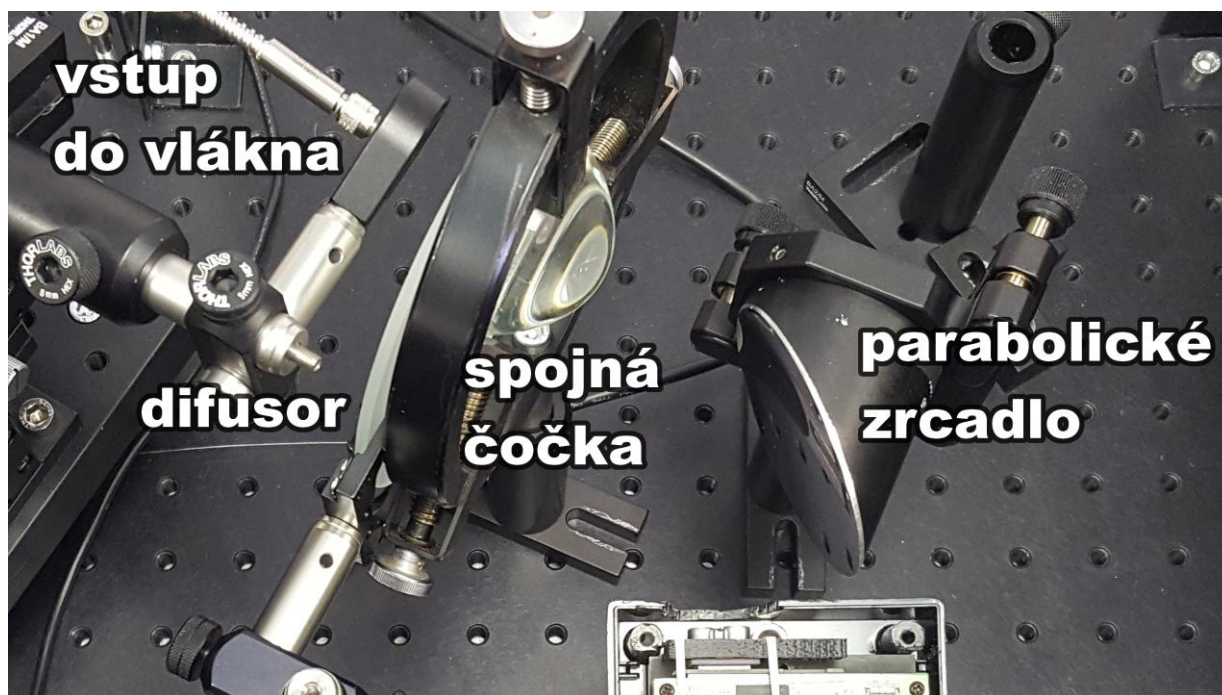
Obrázek 36: Sestava 2



Obrázek 37: Posouzení sběru světla sestavou 2. Horní graf: spektrum světla získaného z celé plochy DMD; dolní obrázek: průměrná intenzita světla odraženého z jednotlivých sekcí DMD.

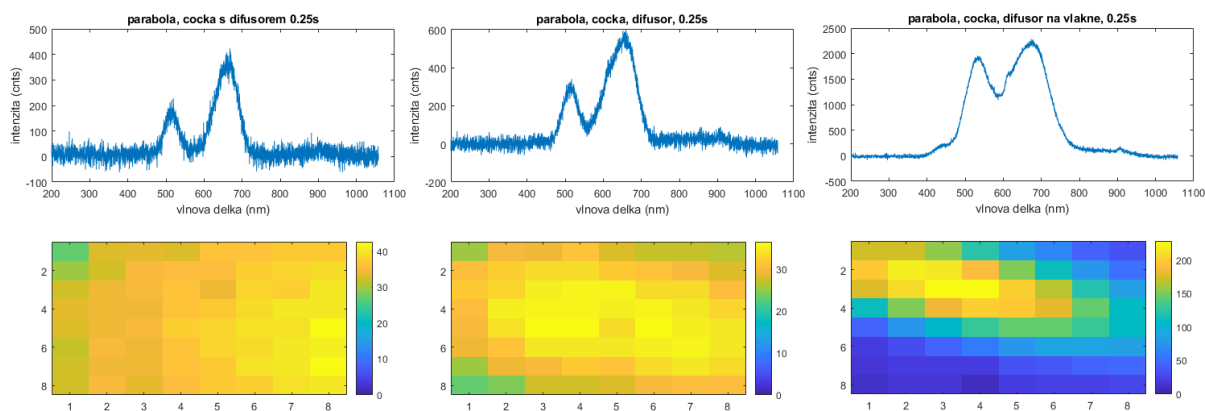
Z dat naměřených s pomocí druhé sestavy (obrázek 37) je patrné, že použitím difusoru se zásadním způsobem mění informace získaná spektrometrem. Oproti prvnímu testovanému uspořádání výrazně klesla celková získaná intenzita světla. Maximální počet zaznamenaných fotonů se snížil o více než 90 % a je již viditelné menší zašumění. Graf spektra ovšem naopak vykazuje výrazně lepší spojitost bez předchozích propadů intenzity. Zároveň s tím je i viditelné lepší homogenita obrazu, kdy můžeme pozorovat výrazně menší rozdíl mezi hodnotami uprostřed a na okraji obrazu. Druhá sestava je tedy horší pro snímání situací s malou celkovou intenzitou světla, ale při dobrém osvětlení je s její pomocí možné získat přesnější informaci než v přecházejícím případě.

3.4.3 Sestava 3: difusor za čočkou



Obrázek 38: Sestava 3

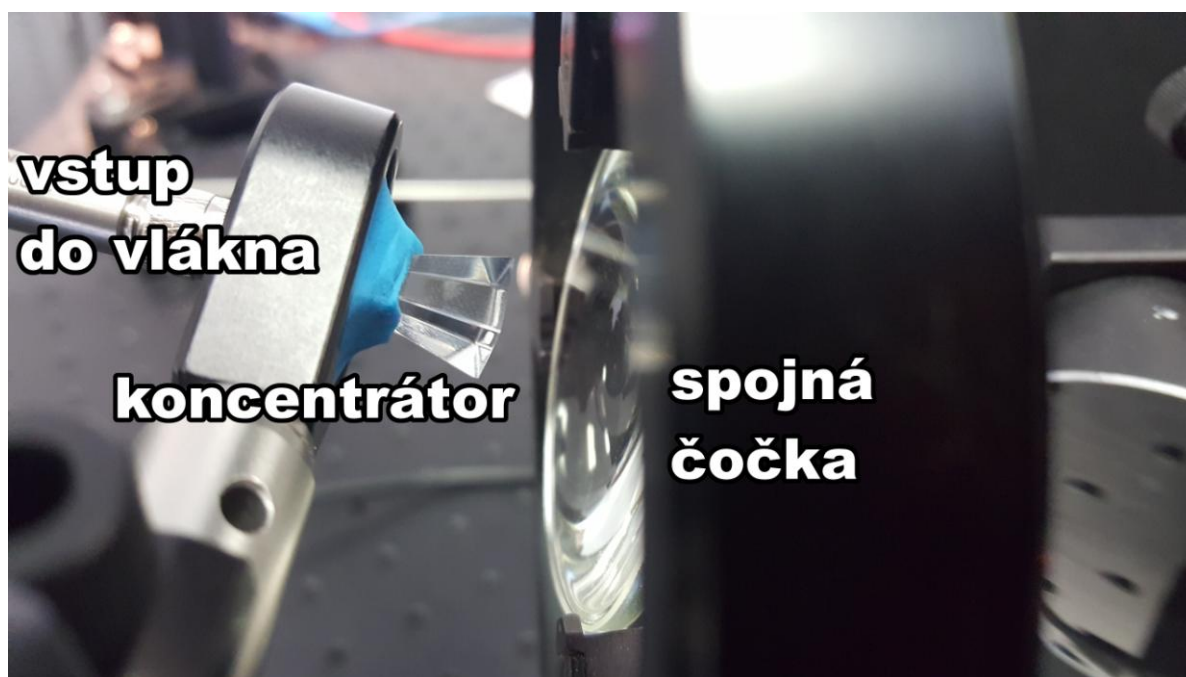
V rámci třetího testovaného uspořádání byl difusor posunut až mezi spojku a vstup do optického vlákna (obrázek 38). Tento difusor byl umístěn do tří různých poloh – přímo k čočce, doprostřed mezi oba prvky a nakonec přímo k vláknu. Všechny tři možnosti byly proměřeny a porovnány.



Obrázek 39: Posouzení sběru světla sestavou 3 (difusor u čočky, uprostřed, u vlákna). Horní grafy: spektra světla získaného z celé plochy DMD jednotlivými verzemi; dolní obrázky: průměrná intenzita světla odraženého z jednotlivých sekcí DMD jednotlivými verzemi.

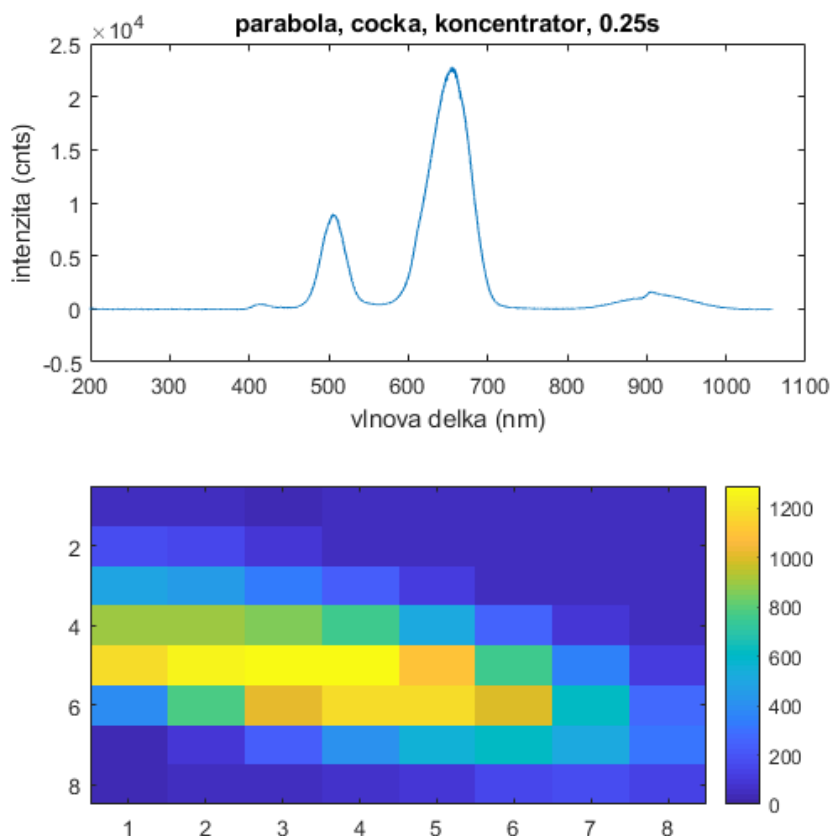
Mezi daty (obrázek 39) z prvních dvou případů jsou pouze nepatrné rozdíly. S difusorem umístěným uprostřed je naměřená intenzita světla přibližně o 50 % vyšší, zobrazení obou provedení je poměrně homogenní, i když se již počty fotonů v jednotlivých sekcích blíží k nule. Obě tyto polohy difusoru ovšem podobně jako u sestavy 1 působí propady vlnových délek v stejných částech spektra (580 a 750-800 nm). Oproti nim se sestava s difusorem umístěným přímo na vlákne svým chováním značně odlišuje. S její pomocí byla naměřena výrazně vyšší celková intenzita světla a částečně jsou omezené i její propady v okolí již zmíněných vlnových délek. Zároveň je její zobrazení ovšem silně nehomogenní a například levý dolní roh DMD se přenáší prakticky zcela mimo vlákno. Pokud vezmeme v úvahu i výsledky sestavy 2, je vývoj závislosti homogenity obrazu na poloze difusoru značně odlišný od toho, který byl pozorován při měření s jednou čočkou. V něm při vzdalování se od DMD klesala zároveň intenzita i homogenita obrazu. Zde můžeme vidět, že intenzita při přesunu difusoru za poslední optický element také klesne, ale při přibližování se ke vstupu do vlákna intenzita opět narůstá. Homogenita obrazu se naopak od sestavy 2 vylepší v sestavě 3, ale pokud je difusor již přímo u vlákna, opět se značně zhorší. Posledním velice zajímavým jevem je vývoj oněch problematických vlnových délek. V sestavě 2 nepozorujeme prakticky žádné zásadní propady ve spektru, při přesunu za spojnou čočku ovšem vzniknou v oblastech shodných s výsledky ze sestavy 1, což by nasvědčovalo tomu, že se fotony těchto vlnových délek v sestavě 1 nenávratně odchýlí právě někde při průchodu mezi DMD a čočkou. Dopadali by na parabolu pod takovými úhly, že se odrazí zcela pryč, nebo ji dokonce mohou minout úplně. Tuto teorii ale značně narušuje výsledek s difusorem přímo u vlákna, kde jsou již tyto vlnové délky opět zachycené. Jejich výrazné odklonění v první části trajektorie je tedy nepravděpodobné.

3.4.4 Sestava 4: koncentrátor



Obrázek 40: Koncentrátor v sestavě 4

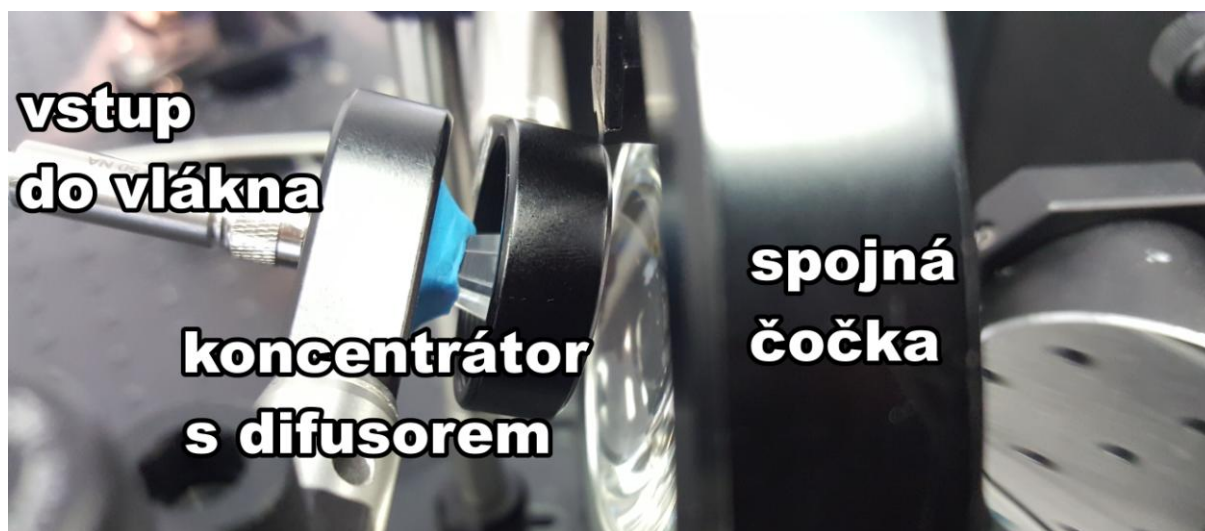
V sestavě 4 bylo vyzkoušeno použití jednoduchého improvizovaného optického koncentrátoru (obrázek 40). Vychází se zde opět ze sestavy 1 (po přecházejících měřeních byl odstraněn difusor), ve které byl na vstup do vlákna upevněn malý skleněný komolý jehlan s délkou hrany podstavy 5 mm. Tento prvek by měl umožnit úplný odraz alespoň části paprsků na jeho vnitřních stěnách a měl by tedy vést především ke zlepšení vlastností sestavy 1.



Obrázek 41: Posouzení sběru světla sestavou 4. Horní graf: spektrum světla získaného z celé plochy DMD; dolní obrázek: průměrná intenzita světla odraženého z jednotlivých sekcí DMD.

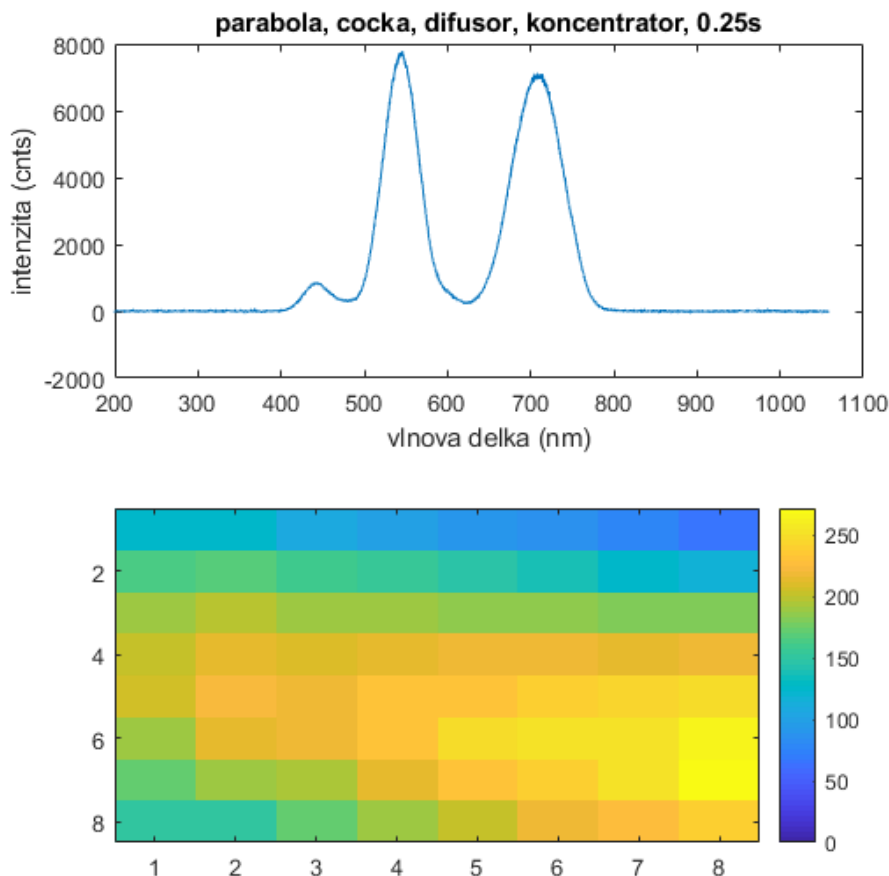
Výsledky tohoto měření (obrázek 41) bohužel výrazné zlepšení neukázaly. V případě spektra došlo k získání více fotonů ve vrcholu v oblasti 650 nm, ale naopak ztráty v prvním propadu jsou ještě vyšší než u sestavy 1. Zároveň ani výsledky homogenity neukazují žádný zásadní pokrok oproti porovnávanému případu, je vidět pouze nepatrný nárůst intenzit v rohových sekcích blízko původního maxima. Toto nasvědčuje tomu, že paprsky v sestavě 1 dopadaly pod velice podobným úhlem, pod jakým jsou zkoseny boční stěny koncentrátoru.

3.4.5 Sestava 5: koncentrátor s difusorem



Obrázek 42: Difusor na koncentrátoru sestavy 5

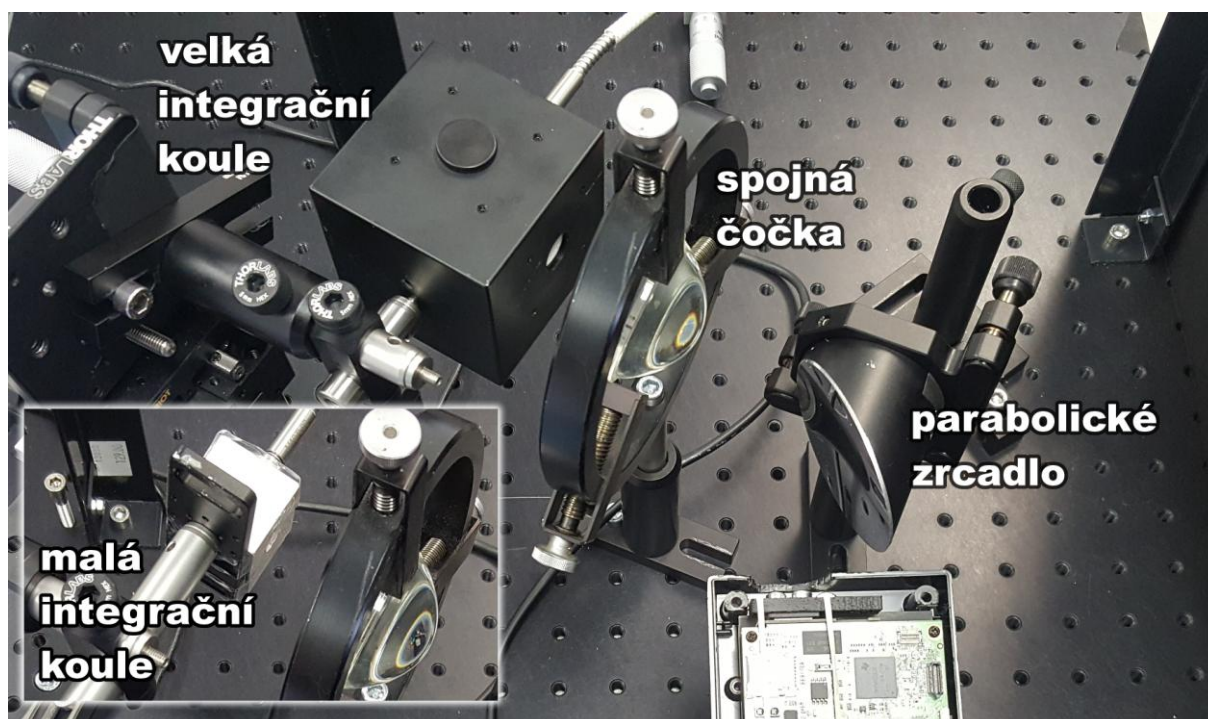
Jelikož použití samotného koncentrátoru nevedlo k žádnému významnému zlepšení oproti sestavě 1 nevedlo, byla jako další možnost vyzkoušena možnost umístit difusor přímo před něj (obrázek 42). V tomto případě se tedy bude nabízet mimo jiné porovnání se sestavou 3, konkrétně její poslední verzí, ve které byl difusor také přímo na vstupu do optického vlákna.



Obrázek 43: Posouzení sběru světla sestavou 5. Horní graf: spektrum světla získaného z celé plochy DMD; dolní obrázek: průměrná intenzita světla odraženého z jednotlivých sekcí DMD.

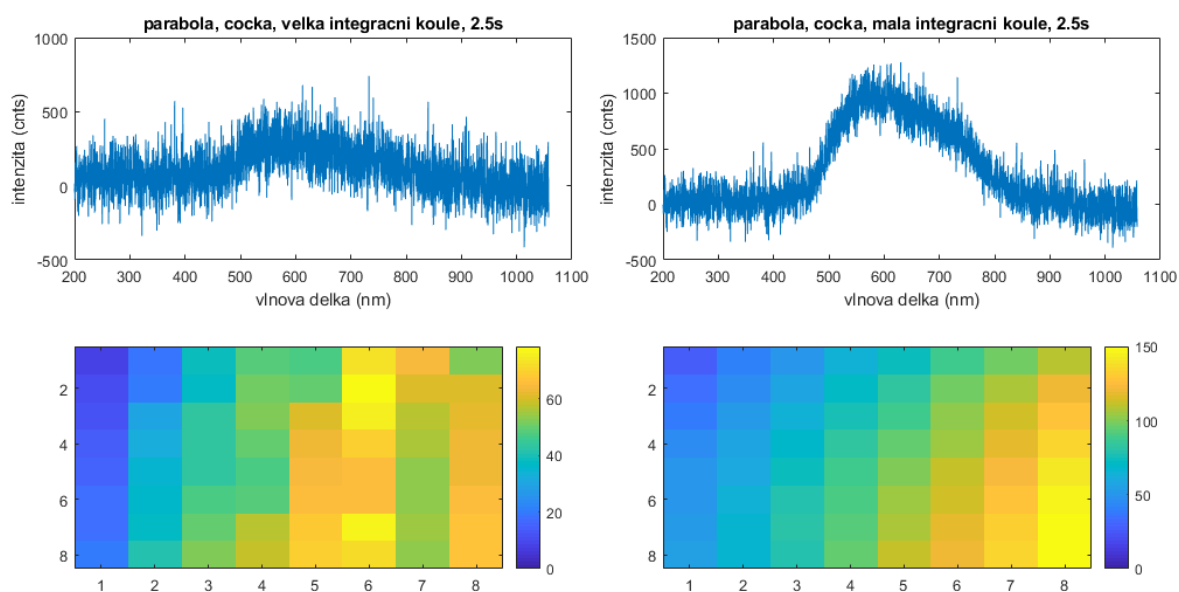
Údaje naměřené s pomocí sestavy 5 (obrázek 43) jsou do jisté míry výrazně odlišná od všech ostatních, která byla získána. Na první pohled je analýza spektra velice podobná většině ostatních, u nichž byl zaznamenán propad intenzity určitých vlnových délek. Zde ovšem sestava naopak pro vlnové délky těchto propadů naměřila největší intenzity světla a propady se oproti tomu posunuly do oblastí, které jinými sestavami byly změřeny bez jakýchkoliv komplikací. Vzniká však výrazně homogennější zobrazení. Nejtmavší sekce obrazu mají pokles intenzity oproti maximu přibližně 60 %, stále však i v těchto místech získáváme dostatečné množství intenzity.

3.4.6 Sestava 6: integrační koule



Obrázek 44: Obě verze sestavy 6

Pro další experiment byly použity kulové integrátory. Sestava stále využívá parabolické zrcadlo i čočku pro přenesení paprsků do jednoho místa, ve kterém se nachází vstupní otvor integrační koule (obrázek 44). Předchozí experimenty ukázaly, že sestavou prochází všechny vlnové délky, ale je problémem je celé spektrum spojitě zachytit. Jelikož mají integrátory větší vstupní otvor než samotné vlákno, mohou za cenu snížení výsledné celkové intenzity spojitě spektrum vytvořit. Porovnávána byla komerční integrační koule IS200 s námi vyprojektovanou a vyrobenou menší integrační koulí (viz 3.3).



Obrázek 45: Posouzení sběru světla sestavou 6. Horní graf: spektrum světla získaného z celé plochy DMD; dolní obrázek: průměrná intenzita světla odraženého z jednotlivých sekcí DMD.

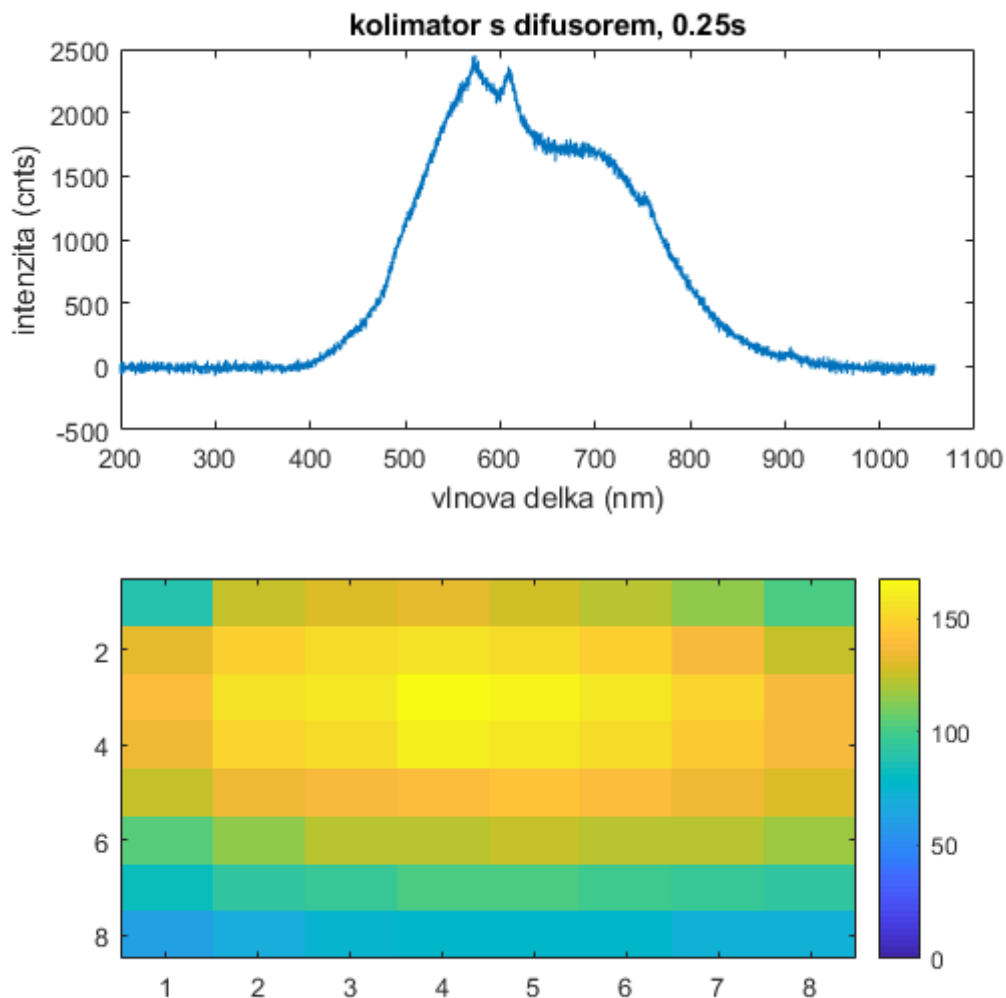
Jelikož vlákno sleduje pouze zlomek intenzity vstupující do integrátoru, bylo nutné zvýšit dobu snímání a počítání dopadajících fotonů (integrační dobu) na desetinásobek (2,5 s) té použité ve všech dosavadních měřeních. To zároveň umožní větší vliv šumu, který je také desetinásobně vyšší. Z výsledků měření spektra (obrázek 45 nahoře) je patrné, že opravdu získáváme velice spojitou křivku. V případě velké integrační koule je však maximum této křivky pouze nepatrně vyšší oproti šumu, který data doprovází. V souladu s výsledkem výpočtu (3.3-1) můžeme pozorovat, že maximální intenzita naměřená malou integrační koulí je více než dvojnásobná oproti IS200. V případě homogenity (obrázek 45 dole) obou zobrazení můžeme pozorovat zcela jiný vývoj než u ostatních sestav. Obě integrační koule nejlépe zobrazují pravý dolní roh (při pohledu na DMD zepředu) a naměřená intenzita postupně klesá směrem k protějšmu rohu. Pravý dolní roh je přitom paradoxně tím nejvíce vzdáleným od prvního optického elementu. V případě velké integrační koule je právě na zobrazení homogenity vidět vliv příliš velkého zašumění a intenzita klesá velice nespojitě. Oproti tomu malá integrační koule již ukazuje velice plynulý pokles intenzity, který by bylo možné snáze odpočítat a intenzitu tmavých bodů uměle zvýšit, aby citlivost všech pro všechna místa DMD byla v praxi stejná.

3.4.7 Sestava 7: kolimátor s difusorem



Obrázek 46: Sestava 7

Jako poslední bylo testováno velice minimalistické uspořádání pro sběr světla (obrázek 46). Bylo odstraněno parabolické zrcadlo i spojka, které sloužily jako pátevní součásti minulých experimentů a místo nich byl použit reflektivní kolimátor. Jelikož je pro správné fungování kolimátoru nutný (jak vyplývá i z jeho názvu) kolimovaný svazek, bylo nutné na něj umístit ještě difusor, abychom zabránili tomu, že by byl selektivní vůči některým vlnovým délkám a tvořil na spektru propady jako většina testovaných sestav. Prakticky tedy vznikla zmenšená verze sestavy 2 bez použití spojky. Jelikož je kolimátor výrazně menší, je možné ho umístit výrazně blíže k DMD. Díky tomu je možné sbírat světlo výrazně dříve, než se rozšíří na příliš velkou plochu vlivem difrakce. Při měření byla opět použita integrační doba 0,25 s.



Obrázek 47: Posouzení sběru světla sestavou 7. Horní graf: spektrum světla získaného z celé plochy DMD; dolní obrázek: průměrná intenzita světla odraženého z jednotlivých sekcí DMD.

Při pohledu na naměřená data (obrázek 47) je jasné patrné, že i přes svoji jednoduchost a malé rozměry je sestava 7 velice účinná. I když maximální hodnoty spektra dosahovaly u některých sestav i o řád vyšších hodnot, spektrum tohoto uspořádání je jedno z nejvíce spojitých a pravděpodobně nejlepší kombinací velmi dobré spojitosti a zároveň vysoké získané celkové intenzity. Zároveň tato sestava nabízí velice uspokojivou homogenitu, kde hodnoty okrajových bodů klesají výrazně méně než u předcházejících sestav (přibližně o 50 %). Sestava 7 tedy ukazuje zásadní vliv celkové velikosti sestavy. I když se jedná o prakticky nejjednodušší uspořádání experimentu, je právě s jeho pomocí dosaženo velice dobrých výsledků. Celá sestava je totiž maximálně kompaktní a světlo se tedy po odrazu na čipu nestihne příliš rozptýlit. Díky difusoru jsme zároveň získali skutečně neselektivní sběr světla, ve kterém se nenachází žádné větší propady intenzity spektra. Je spolu s kolimátorem umístěn tak blízko DMD, že na něj ještě dopadají difrakční maxima prakticky všech vlnových délek, které jsou poté lámány do náhodných směrů, z nichž část je kolimovaná vůči parabolickému zrcátku uvnitř kolimátoru a tedy vstupuje do vlákna, kterým je poté vedena. Prostorové uspořádání sestav bylo obecně náročnou výzvou, protože snahu umístit všechny komponenty co nejblíže k DMD omezuje nutnost nezakrývat příchozí paprsky jak komponentem samotným, tak jeho úchytem. Při použití takto malých součástí s dobře tvarovanými úchyty je tedy možné dosáhnout minimálních možných rozměrů.

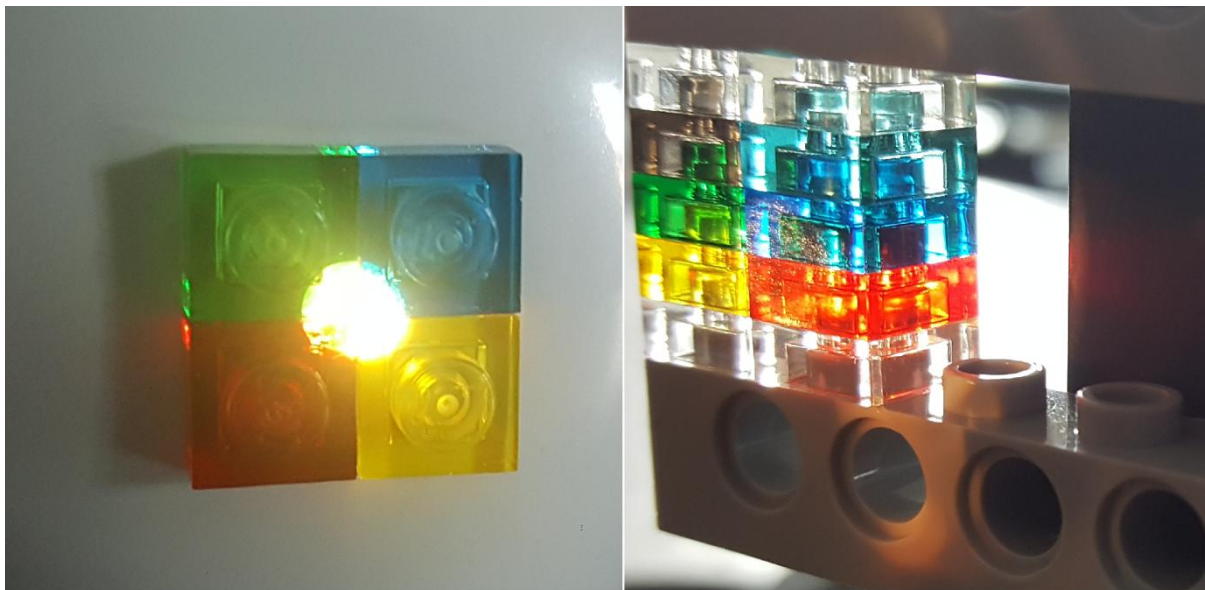
3.4.8 Zhodnocení sestav

Vlastnosti testovaných sestav se v mnohém zásadně lišily. U mnoha z nich byly pozorovány vysoké maximální intenzity u některých vlnových délek za cenu výrazných poklesů u jiných. Pokud bychom měřily pouze v určitém úzkém spektrálním pásu, daly by se tyto sestavy využít, což ovšem do značné míry neguje hlavní výhodu jednopixelové kamery – její možnost zaznamenat širokou část spektra. Homogenita byla do jisté míry problematická pro všechny sestavy, problematické bylo především horší zobrazování světla z rohových bodů obrazu. V tomto ohledu by bylo nejjednodušší využití integračních koulí, u kterých je pokles intenzity prakticky lineární z jedné strany na druhou a flat-field correction by tedy byla poměrně jednoduchá. Při pozorování vysokých intenzit světla, které by omezily šumu u integračních koulí, by sestavy s jejich využitím byly pravděpodobně pro komprimované snímání nejlepší. V našem případě se nejlepší kombinací vlastností stala poslední testovaná sestava s kolimátorem a difusorem. Její zobrazení je stále velice dobré z hlediska homogenity a vytváří široký spektrální pás, který není zatížen příliš velkým šumem.

4 Komprimované snímání

4.1 Viditelné spektrum

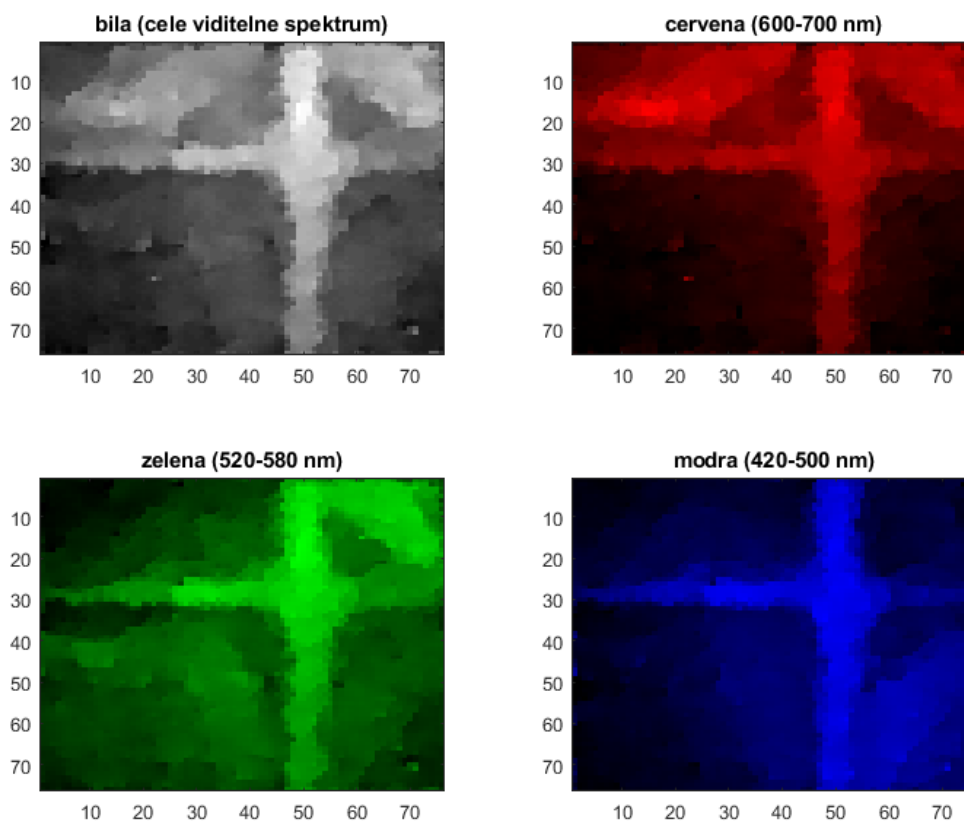
Jelikož jsou vlastnosti sestavy 7 velice uspokojivé, byla tato sestava vybrána na testování v samotném komprimovaném snímání. S využitím spektrometru jako snímače je možné u SPC naměřit závislost intenzity světla na vlnové délce pro každý bod obrazu (hyperspektrální informaci). Toto je možné nejlépe pozorovat při vytvoření kombinace barevných filtrů, z nichž každý propouští jinou část spektra.



Obrázek 48: Ukázka uspořádání barevných filtrů

Jelikož mělo použité uspořádání před DMD veliké zvětšení, bylo nutné vybrat filtry způsobem, aby k sobě přiléhaly co nejlépe. Pokud by byla mezi nimi příliš velká mezera, nebylo by možné umístit všechny požadované barvy na DMD. Pro tyto účely se nakonec staly ideálními barevné transparentní LEGO kostičky, které k sobě přiléhají velice těsně a zároveň nabízí snadno dostupnou širokou škálu barev, které je možno pozorovat. První takto sestavený filtr (obrázek 48 vlevo) sestával ze čtyř barevných kostiček umístěných do čtvercového uspořádání. Na výsledném obraze by tedy měla být viditelná různá propustnost různých barev v každé čtvrtině obrazu a všechny barvy na kříži mezi těmito kostičkami, kde se nachází velice tenké mezery. Obraz byl snímán v rozlišení 76×76 pixelů, což by u normální kamery znamenalo 5776 měření. Jednapixelovou kamerou jsme nejprve naměřili 2914 měření (na DMD je najednou odesíláno 94 masek, $94 \cdot 31 = 2914$ je nejbližším celočíselným násobkem poloviny počtu pixelů obrazu – 2888). Výstup byl pro názornost rozdělen do několika částí – intenzita obrazu celého spektra, intenzita pro červenou (údaje získané ze spektrometru pro vlnové délky 600-700 nm), zelenou (520-580) a modrou (420-500). Pokud by se získanými daty mělo dále pracovat při hlubší analýze, je samozřejmě možný výběr jakéhokoliv úseku vlnových délek.

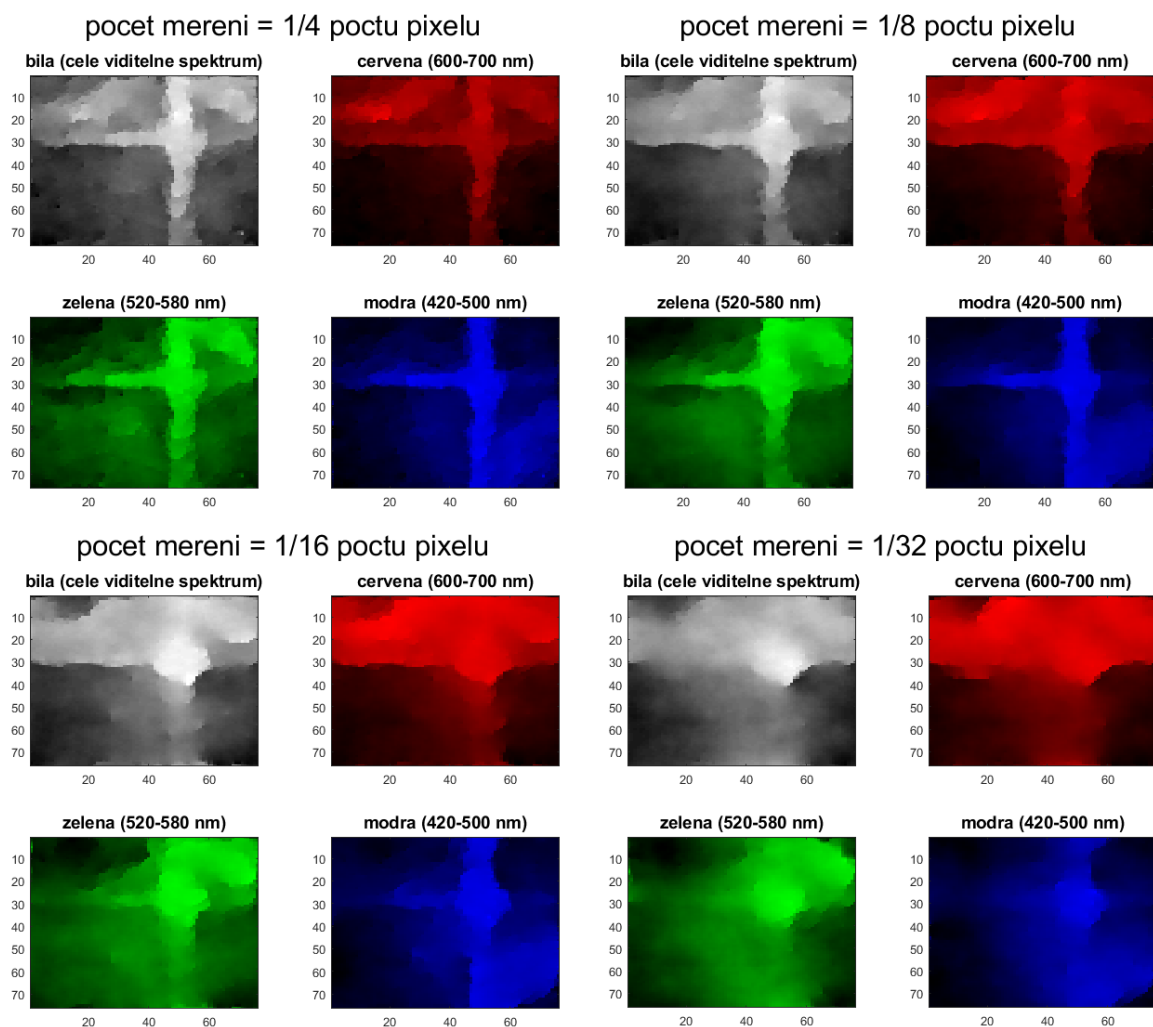
pocet mereni = 1/2 poctu pixelu



Obrázek 49: SPC snímek – 50 % měření (převrácený obraz)

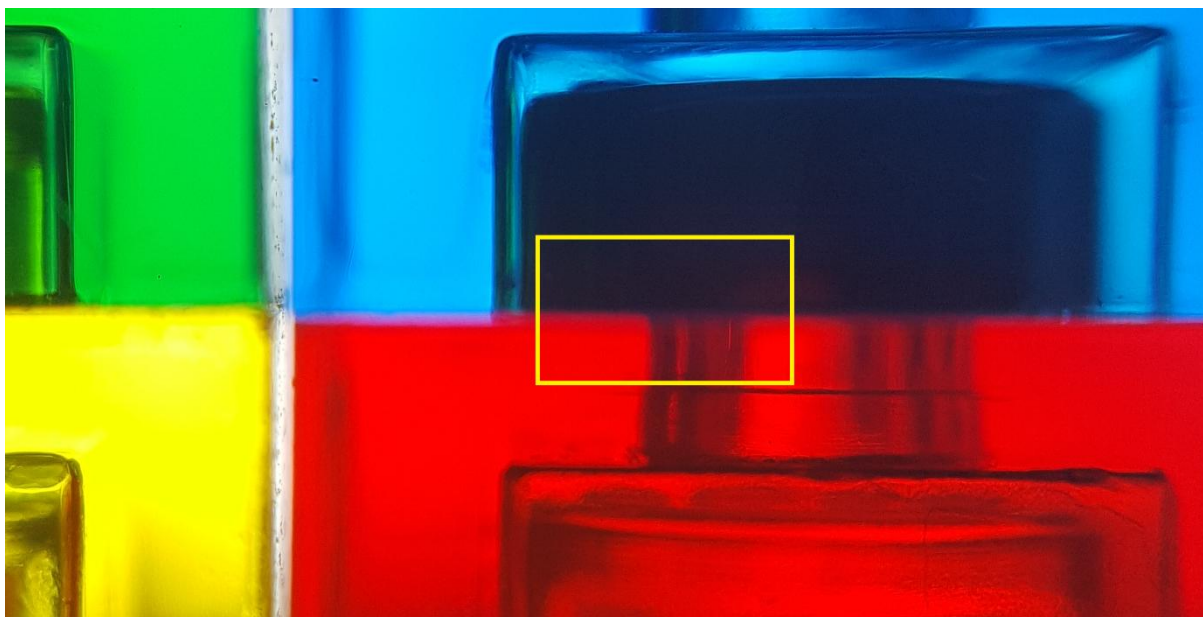
V našem programu z hlediska měření „snímá“ kolimátor obraz na DMD, zároveň se obrázek filtru cestou na čip převrací a červená kostička se tedy zobrazuje do levého horního rohu DMD, žlutá do pravého horního, zelená do levého dolního a modrá do pravého dolního. Na výsledném výstupu (obrázek 49) je patrná největší intenzita obrazu pro celé spektrum i jednotlivé části v oblasti kříže mezi kostičkami. U červeného spektra si můžeme všimnout, že v největším množství prochází červenou kostkou a pouze o něco méně kostkou žlutou. Překvapivě nejvíce zelené barvy prochází skrz žlutou kostičku. V RGB modelu se podílí zelená na tvorbě žluté barvy podobnou silou jako barva červená, navíc použitá zelená kostička je výrazně tmavší jako taková, což dokazuje i obraz celého spektra, kdy právě skrz ní prochází výrazně menší množství celkové intenzity. Modrá barva je poté prakticky výhradně zastoupena v oblasti modré kostičky.

Jelikož jsou měření na sobě navzájem nezávislá, je možné data získaná z tohoto měření dále využít. Při komprimovaném snímání totiž výpočetní algoritmy využijí takové množství dat, kolik je jich jim poskytnuto. Pokud tedy z 2914 měření, která máme, využijeme pouze část, bude se program chovat stejně, jako by jich jen tato část byla skutečně naměřena. Vyzkoušeli jsme tedy brát poloviční počet předcházejících měření a postupně tak rekonstruovat tento obraz s menším a menším množstvím informací.



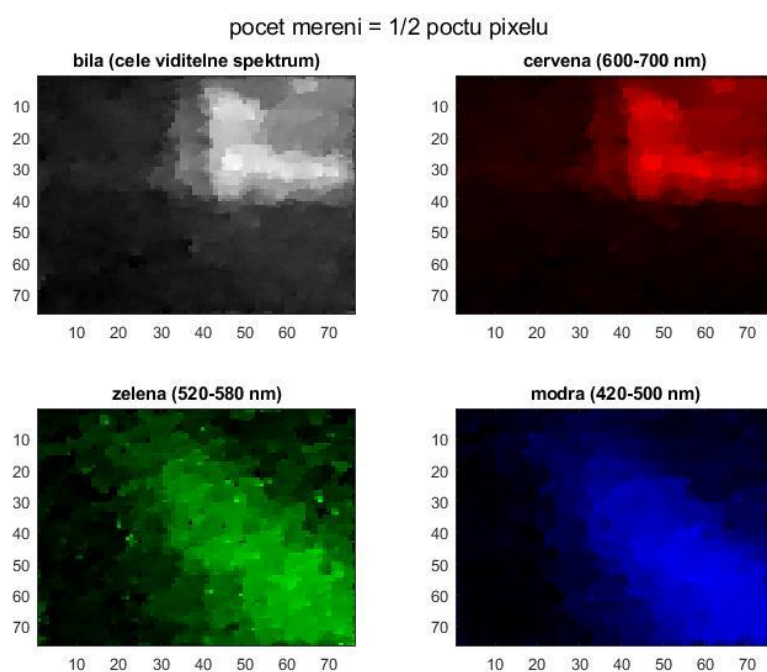
Obrázek 50: Snižování počtu měření

Potřebné množství měření do značné míry závisí na tom, jak velké množství informace potřebujeme získat z daného snímku (obrázek 50). Pokud vezmeme počet měření čtvrtinový nebo dokonce i osminový oproti počtu pixelů, stále je na zrekonstruovaném obraze patrný světlý kříž uprostřed a rozmístění barev stejné jako v přecházejícím případě. Na spolehlivou informaci o námi měřeném předmětu tedy stačí prakticky jen 12,5 % měření, než kolik by potřebovala obyčejná kamera. Při dalším snížení počtu o polovinu si již můžeme všimnout, že zřetelnost kříže se značně snížila. Pokud poté ještě jednou vezmeme polovinu měření předchozího případu, je již tento kříž velice rozmazaný. Zároveň ale stále velice dobře vidíme jeho středový bod a barvy jsou stále rozmístěné prakticky přesně ve stejných kvadrantech jako u 50 % měření (červená v horní polovině obrazu, zelená vpravo nahoře a vlevo dole, modrá vpravo dole). Z toho vyplývá, že i s pouhými 3 % měření oproti konvenční kameře jsme schopni prvotní informace z obrazu získat. V mnoha aplikacích, ve kterých stačí určit pouze přibližné umístění, tedy i takto malé množství dat může být užitečné. Podle potřeby je pak možné naměřit více hodnot a obraz dodatečně zlepšit. Obecně je možné říct, že v našem případě již od 1/8 měření se zvyšujícím se počtem nedochází k žádnému výraznému zlepšení výsledné kvality. Samozřejmě při snímání složitějšího útvaru s méně řídkou informací (např. více přechodů, křivek) by pro spolehlivé určení bylo potřeba také větší množství měření (viz kapitola 2).



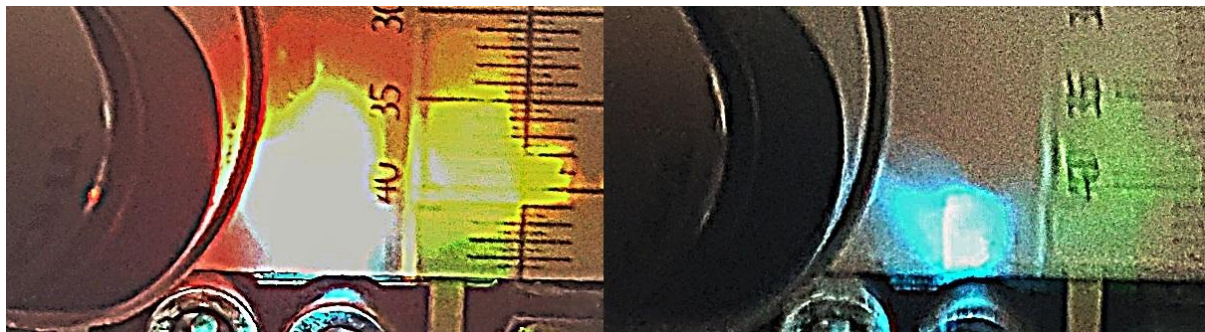
Obrázek 51: Zkoumaná oblast druhého barevného filtru

V případě druhého barevného filtru (obrázek 48 vpravo) jsme se nakonec místo snímání dalšího pomezí 4 kostek zaměřit na spoj mezi červenou a tmavě modrou kostkou (obrázek 51). Toto místo totiž nabízelo několik zajímavých částí pro zkoumání. Nachází se v něm homogenní oblast červeného plastu (vlevo dole, zobrazí se tedy do pravého horního rohu), vedle které je uvnitř kostky dutina (pro odlehčení) s kruhovým tvarem. Na ní se tedy procházející paprsky s nejvyšší pravděpodobností budou značně lámat a jejich průchod v přímém směru je nepříliš pravděpodobný. V horní polovině filtru (dolní polovina obrazu) máme nejzajímavější část tohoto experimentu – místo spoje, ve kterém je červená kostička zaklesnuta do modré a projevují se tedy efekty obou dvou filtrů zároveň. Výstupek na červené kostičce má v tomto místě také kruhový tvar, což do jisté míry měření může ovlivnit. Opět jako u prvního filtru bylo nejprve změřeno 50 % počtu pixelů.



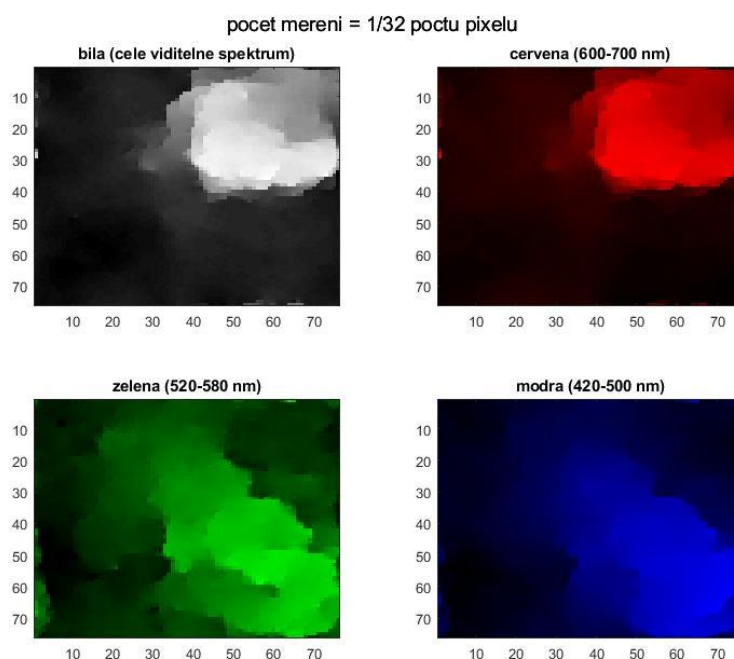
Obrázek 52: SPC snímek druhého filtru – 50 % měření

Praktická shoda zobrazení celého spektra se zobrazením z červené oblasti (obrázek 52 nahoře) ukazuje, že zcela největší množství intenzity prochází skrz homogenní část červené kostky. Jak bylo předpokládáno, složitý tvar dutiny vedle tohoto místa způsobuje v této části velký pokles intenzity i v červené oblasti. Obraz v oblastech vlnových délek zelené a modré barvy vytvářel směrem od spoje obou kostek pruh mířící šikmo vzhůru na DMD (obrázek 52 dole).



Obrázek 53: Obraz vytvořený přes druhý barevný filtr na stínítku v úrovni DMD

Tento pruh vzhledem k výrazně vyšší intenzitě červeného světla nebyl okem na DMD pozorovatelný. Proto bylo jeho naměření spektrometrem vcelku překvapivé. Pro zjištění, jestli se opravdu tento pruh vytváří, bylo do místa DMD umístěno stínítko a za testovaný filtr byl umístěn ještě druhý filtr, který je nepropustný pro červenou barvu. Při pozorování přes tento filtr je již i obyčejným okem vidět, že výběžek modré barvy opravdu vzniká. Toto názorně ukazuje jednu z velkých výhod SPC vybavené spektrometrem – díky jejímu použití je možné získat i informace, které nejsou normálním okem (či kamerou) zachytitelné.

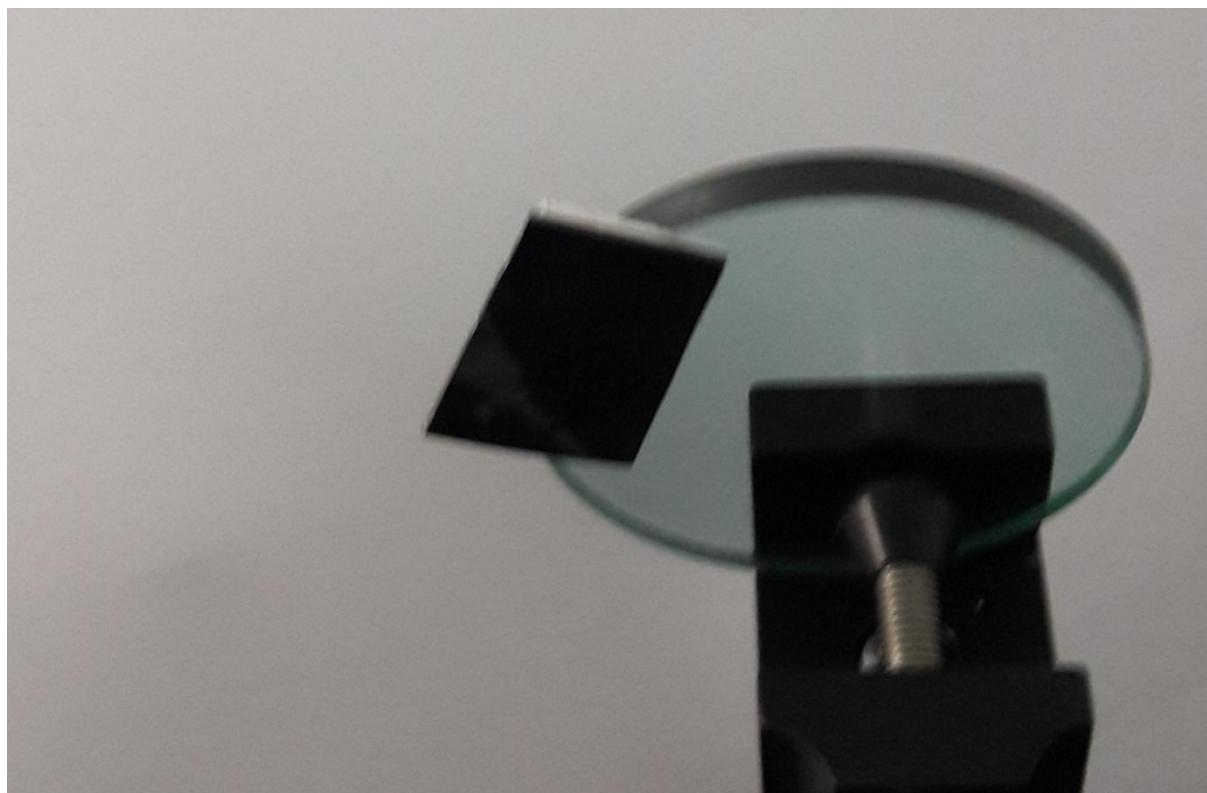


Obrázek 54: SPC snímek druhého filtru – 3,125 % měření

I v tomto případě jsme vyzkoušeli snížit počet měření, tentokrát rovnou na nejnižší předchozí počet (obrázek 54). Zde můžeme vidět, že díky vysokému kontrastu a spojitosti obrazu je tentokrát naměření 1/32 počtu pixelů prakticky dostačující a z výsledného obrazu dostáváme velice podobnou informaci a můžeme také identifikovat stejné jevy jako v předchozím případě.

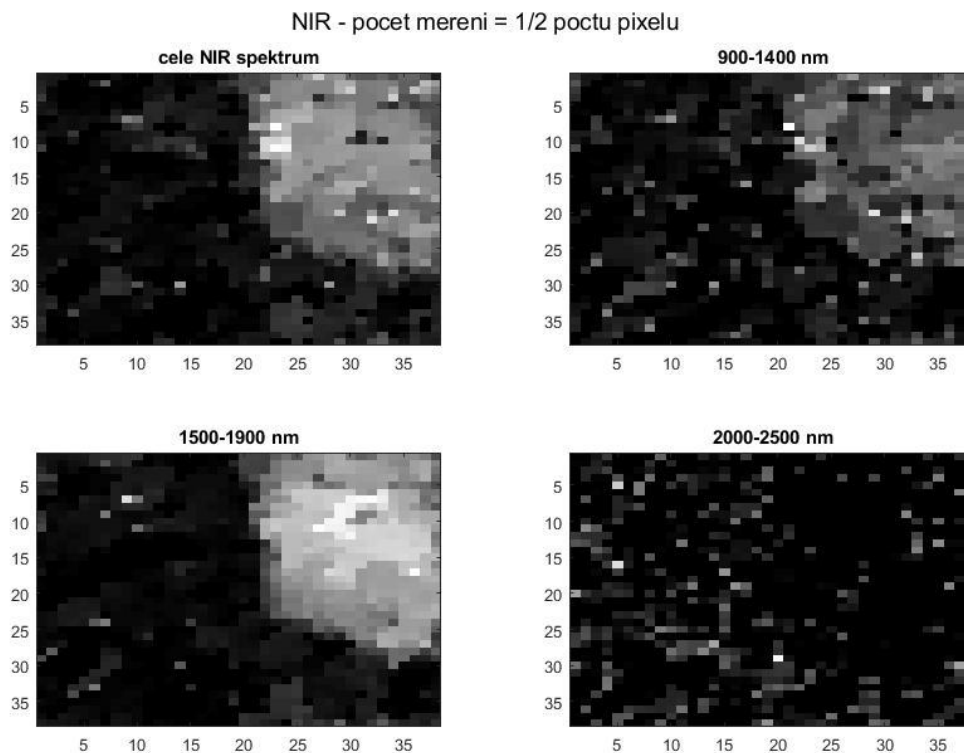
4.2 Blízká infračervená oblast

Přestože již bylo při měření difrakce ukázáno, že dostupné DMD není pro blízkou infračervenou oblast vlnových délek (900-2500 nm) ideální a intenzita vlnových délek je zachytitelná s velkým zašuměním, vyzkoušeli jsme se sestavou 7 komprimované snímání i pro ni. Rozlišení bylo sníženo na 38×38 obrazových bodů a byl testován pouze 50% počet (722) měření. Spektrometr Flame pro viditelnou oblast byl nahrazen spektrometrem NIRQuest pro vlnové délky mezi 900 a 2500 nm. Aby bylo možné při měření něco pozorovat, bylo zároveň nutné vyměnit zkoumanou kombinaci filtrů, jelikož pro blízkou infračervenou oblast jsou předchozí testované filtry prakticky stejně prostupné.



Obrázek 55: Sestava filtrů pro NIR komprimované snímání

Vytvořena byla pro tento účel kombinace filtrů, která mohla nabídnout různou prostupnost vlnových délek (obrázek 55). Jedním z těchto filtrů bylo sklo KG5, které propouští viditelné spektrum, ale prakticky zcela zamezuje průchodu vyšších vlnových délek (ve výstupu v levé části obrazu). Spolu s ním byl použit křemíkový wafer, který naopak propouští pouze vlnové délky větší než 1100 nm a pro běžné oko je tedy neprůhledný (ve výstupu ve spodní části obrazu). V jedné části (levý dolní roh obrazu) se pak tyto dva filtry překrývaly, na opačné straně (pravý horní roh obrazu) naopak nebyl filtr žádný a paprsky sem dopadající procházely pouze vzduchem (a optickými elementy).



Obrázek 56: SPC snímek v NIR oblasti

Podobně jako v případě měření difrakce v NIR oblasti i zde musela probíhat korekce dat na vnější vlivy a dlouhodobý drift detektoru (hlavně temného proudu), ta byla již ovšem zakomponována do samotného zaznamenávání dat a výsledný výstup (obrázek 56) tedy již ukazuje upravená data. I zde tedy je možné nedokonalé chlazeným spektrometrem získat požadovanou informaci. Z dat je patrné, že se již pohybujeme na hranici možností DMD. Získané intenzity obrazu jsou již hlavně v okrajových částech spektra snímáče tak nízké, že se projevuje velkou mírou šum a například blízko 2500 nm již není možné z obrazu nic určit. Přesto však z celého spektra a střední části NIR oblasti můžeme některé předpokládané jevy opravdu vypořizovat. Intenzita světla je skutečně nejvyšší v místech, kde se žádný filtr nenacházel. U rekonstrukce celého NIR spektra si ale zároveň můžeme povšimnout, že pravý dolní roh (křemíkový filtr) je nepatrně světlejší než celá levá strana (KG5). Je tedy vidět, že křemíkový filtr je i pro NIR oblast propustný výrazně méně než vzduch, ale neabsorbuje tolik jako KG5. I při méně vyhovující sestavě tedy bylo možné část informace pro tuto oblast vlnových délek získat.

5 Závěr

V rámci této práce bylo porovnáno několik různých sestav pro sběr sestav. Ukázalo se, že výrazný vliv má celková velikost sestavy a nejlepší pro měření tedy nakonec byla sestava, která se dala umístit nejbližší k čipu DMD. Zároveň s tím byl také pozorovatelný vliv jednotlivých komponentů na celkové měření. Například integrační koule vytvářely prakticky nejvíce spojitě výsledné spektrum za cenu obrovských ztrát intenzity. Byly by tak ideální spíše pro měření s velmi vysokými intenzitami, při kterém by se výrazně snížil vliv šumu detektoru a zároveň by integrátor sloužil jako ochrana detektoru před saturací nebo i případným poškozením vlivem příliš silného světla.

S vybranou sestavou byly poté úspěšně pořízené záběry komprimovaným snímáním. Bylo ukázáno, že i s provedením 3 % měření oproti počtu pixelů jsme již schopni získat některé informace z obrazu. Při zaznamenání přibližně 20 % měření již byla výsledná rekonstrukce velice spolehlivá. Zároveň byly demonstrovány největší výhody komprimovaného snímání oproti konvenčnímu – záznam obrazu pro každou vlnovou délku zvlášť (získání informací okem i obyčejnou kamerou nepozorovatelných), možnost měření mimo viditelnou oblast pouze za pomoci výměny spektrometru nebo také nezávislost výsledného obrazu na ohřevu NIR spektrometru díky možnosti relativně jednoduchých korekcí.

Ani výsledná sestava použitá v tomto komprimovaném snímání není dokonalá a ze získaných dat by bylo možné navrhnout několik vylepšení. Velkou komplikací při sběru intenzity byla difrakce vznikající na dostupném DMD. Pokud bychom sestavu chtěli výrazným způsobem vylepšit, bylo by vhodné použití DMD s většími mikrozrcátky, čímž by se vliv difrakce snížil. Další možností by bylo použití transmisních generátorů náhodných masek (modulátorů), ve kterých by šíření paprsků, které mají být změřeny, pokračovalo směrem dále za masku v přímém směru. Toto by umožnilo dát přímo za masku komponenty pro sběr světla. Transmisní generátor masek by mohl být například umístěn na vstupní otvor kulového integrátoru nebo parabolického kolimátoru. Velkým problémem těchto modulátorů je ovšem velká závislost jejich funkčnosti na vlnové délce dopadajícího záření. Tím by tedy byla omezena šířka spektra, ve kterém by SPC s tímto prvkem mohla fungovat.

Zároveň bylo měření prodlužováno tím, že žádný z prvků není primárně tvořen pro komprimované snímání a je tedy velice náročné dosáhnout efektivní a rychlé komunikace počítače s DMD a detektorem. Na čip musela být odeslána sada masek s okrajovými „značícími“ body, které detektor také zaznamenal a poté signál mezi nimi dělil podle počtu masek a přiřazoval. Celý postup musel být prokládán pauzami v průběhu, aby byla jistota, že jsou oba komponenty připraveny na další krok. DMD zároveň nedokázalo přijímat průběžně nové masky a ty tak musely být odesílány po blocích obsahujících 96 masek (2 značící a 94 měřících). V ideálním případě by obě dvě součásti spolupracovali synchronně se vzájemnou komunikací. Vygenerované náhodné masky by byly spojitě odesílány na čip DMD a kdykoliv by byla jedna nastavena, signál z DMD by pro ni spustil měření spektrometrem. Dvojice informací maska-spektrum by poté mohli být ihned zpracovávány a tak by se již v průběhu měření dal obraz i postupně rekonstruovat. Mohli bychom díky tomu sledovat průběžně jeho vývoj a již například při zmíněných 3 % měření pozorovat některé jevy, zatímco by měření dále probíhalo. Toto by ovšem pravděpodobně vyžadovalo vysoké náklady na vlastní součásti a jejich specifický software, což můžeme nejspíš očekávat až s větším rozvojem komprimovaného snímání v budoucnu.

Další možnou úpravou specificky při využití DMD by mohlo být zdvojení sekce sběru světla i na druhou stranu, kam se odráží paprsky od zrcátek v opačném náklonu. Tímto způsobem by vznikly u jednoho DMD dvě jednopixelové kamery. Toto uspořádání by se dvěma stejnými spektrometry mohlo umožnit měřit dvě masky najednou a urychlit tak výsledné měření (jeden spektrometr by počítal s inverzí hodnot) o polovinu. Výrazně výhodnější sestava by ovšem vznikla, pokud by na každou větev byl umístěn spektrometr pro jiný rozsah vlnových délek – například pro viditelné spektrum na jednu stranu a pro NIR oblast na druhou. Zatímco by pro jednu masku (logické jedničky)

bylo měřeno viditelné spektrum, inverzní maska (logické nuly) by sloužila k měření NIR vlnových délek. Pokud by poté na DMD byly odesílány dvojice inverzních masek (maska nastavená v předchozím kroku pro jednu stranu by se v dalším nastavila pro druhou a naopak), mohl by program pro jednu podobu masky přiřadit údaje z obou detektorů a tuto informaci jako celek předat na zpracování, čímž by mohlo dojít k výraznému snížení výpočetní náročnosti. Tímto způsobem by takováto dvojitá SPC dokázala najednou měřit výrazně větší rozsah vlnových délek a vytvořit tak skutečný hyperspektrální snímek (hyperspektrální krychli), ve kterém je možné vytvořit obraz intenzit pro vlnové délky přesahující viditelné spektrum.

Zdroje

- [1] DONOHO, David L. Compressed Sensing. *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY* [online]. 2006, 52(4), 1289 [vid. 2019-04-21]. Dostupné z: doi:10.1109/TIT.2006.871582
- [2] HORNBECK, Larry J. *Digital Light Processing™ for High-Brightness, High-Resolution Applications* [online]. 1997 [vid. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://www.dlinnovations.com/dli/wp-content/uploads/white-paper-dlp-for-high-brightness-high-resolution-applications.pdf>
- [3] DUDLEY, Dana, Walter DUNCAN a John SLAUGHTER. *Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications DLP™ Products New Applications* [online]. 2003 [vid. 2019-03-11]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.515.9791&rep=rep1&type=pdf>
- [4] *Integrating Sphere Theory and Applications* [online]. 2017 [vid. 2019-03-11]. Dostupné z: https://www.labsphere.com/site/assets/files/2551/integrating_sphere_theory_apps_tech_guide.pdf
- [5] *Radiometrie a fotometrie* [online]. nedatováno [vid. 2019-03-12]. Dostupné z: <https://kfy.zcu.cz/export/sites/kfy/dokumenty/FYA2/Radiometrie-a-fotometrie.pdf>
- [6] THORLABS. *Unmounted N-BK7 Ground Glass Diffusers* [online]. 2019 [vid. 2019-03-19]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1132
- [7] THORLABS. *Engineered Diffusers™* [online]. 2019 [vid. 2019-03-19]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1660
- [8] PASCHOTTA, Dr. Rüdiger. Parabolic Mirrors. In: *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* [online]. 2008 [vid. 2019-03-14]. ISBN 978-3-527-40828-3. Dostupné z: https://www.rp-photonics.com/parabolic_mirrors.html?s=ak
- [9] THORLABS. *Reflective Collimators, Protected Silver Coating* [online]. 2019 [vid. 2019-03-14]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=4093
- [10] SALEH, Bahaa E.A. a Malvin Carl TEICH. *Základy fotoniky svazek 2*. Praha: MATFYZPRESS, 1994. ISBN 80-85863-02-2.
- [11] PETROV, Yury. *Optometrika* [online]. 2019 [vid. 2019-03-19]. Dostupné z: <https://www.github.com/caiuspetronius/Optometrika>
- [12] PARKER, Acm Reference Format G, S BIGLER, J DIETRICH, A FRIEDRICH, H HOBEROCK, J LUEBKE, D MCALLISTER, D MCGUIRE, M MORLEY, K ROBISON a A STICH. OptiX™: A General Purpose Ray Tracing Engine. *ACM Trans. Graph* [online]. 2010, 29 [vid. 2019-03-19]. Dostupné z: doi:10.1145/1778765.1778803
- [13] OCEAN OPTICS. *Flame Spectrometer - Ocean Optics* [online]. 2019 [vid. 2019-03-23]. Dostupné z: <https://oceanoptics.com/product/flame-spectrometer/#tab-details>
- [14] *Compressed Sensing Makes Every Pixel Count* [online]. nedatováno [vid. 2019-03-24]. Dostupné z: https://www.email.cz/download/k/gL5tWa3RiiZdff_PAtDO_r4BRZuS54Fi_SSVr4m0SX-4vMNFkqqBrdrJHNPmVShfw-E0688/Candes.CompressedSensingMakesEveryPixelCount.pdf
- [15] LI, Chengbo, Wotao YIN a Yin ZHANG. *User's Guide for TVAL3: TV Minimization by Augmented Lagrangian and Alternating Direction Algorithms* [online]. nedatováno [vid. 2019-04-27]. Dostupné z: <http://www.caam.rice.edu/>

- [16] CZAJKOWSKI, Krzysztof M, Anna PASTUSZCZAK, Rafał KOTY, M DUARTE, M DAVENPORT, D TAKBAR, J LASKA, T SUN, K KELLY, R BARANIUK, Z LI, J SUO, X HU, C DENG, J FAN, Q DAI, H WANGWEI, W YUNLONG, H KAICHENG, S QIUSHUAI, Y CUIFENG, L DONGQI, Ye QING a Z WENYUAN. Single-pixel imaging via compressive sampling. *IEEE Signal Process. Mag* [online]. 2008, **25**(2), 41435 [vid. 2019-04-21]. Dostupné z: doi:10.1364/OE.26.020009
- [17] CANDÈS, Emmanuel. *Compressive Sensing -- A 25 Minute Tour* [online]. 2010 [vid. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://nuit-blanche.blogspot.com/>
- [18] *DLP3000 DLP3000 DLP ® 0.3 WVGA Series 220 DMD 1 Features 3 Description* [online]. 2012 [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: www.ti.com
- [19] *Spec Sheet IS200 Series Integrating Spheres* [online]. nedatováno [vid. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.thorlabs.com>