



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

# Jedno- a dvoupixelová kamera pro výpočetní rekonstrukci obrazu

## Diplomová práce

*Studijní program:* N3901 – Aplikované vědy v inženýrství  
*Studijní obor:* 3901T055 – Aplikované vědy v inženýrství

*Autor práce:* **Bc. Ondřej Denk**  
*Vedoucí práce:* RNDr. Karel Žídek, Ph.D.





## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej Denk**  
Osobní číslo: **M16000151**  
Studijní program: **N3901 Aplikované vědy v inženýrství**  
Studijní obor: **Aplikované vědy v inženýrství**  
Název tématu: **Jedno- a dvoupixelová kamera pro výpočetní rekonstrukci obrazu**  
Zadávací katedra: **Ústav nových technologií a aplikované informatiky**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznámení se s principy komprimovaného snímání a jednopixelové kamery, implementace rekonstrukce obrazu v softwaru Matlab.
2. Navržení experimentálního uspořádání pro jednopixelovou kameru ve viditelné a blízké IČ oblasti.
3. Zkoumání aplikovatelnosti detekce pomocí zesílených vyvážených Si a Ge fotodiod, experimentální realizace dvoupixelové kamery.
4. Vyhodnocení dat a zkoumání vlivu rekonstrukčních parametrů na výslednou kvalitu obrazu.


Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Rozsah pracovní zprávy: **40 - 60 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

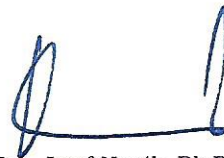
- [1] DUARTE, Marco F., et al. Single-pixel imaging via compressive sampling. **IEEE signal processing magazine**, 2008, 25.2: 83-91.
- [2] STERN A. ed. "Optical Compressive Imaging" CRC Press, Boca Raton (2017).
- [3] SOLDEVILA, F., et al. Computational imaging with a balanced detector. **Scientific reports**, 2016, 6: 29181.
- [4] BARANIUK, Richard G. Compressive sensing [lecture notes]. **IEEE signal processing magazine**, 2007, 24.4: 118-121.

Vedoucí diplomové práce: **RNDr. Karel Žídek, Ph.D.**  
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Datum zadání diplomové práce: **19. října 2017**  
Termín odevzdání diplomové práce: **14. května 2018**

  
prof. Ing. Zdeněk Pliva, Ph.D.  
děkan



  
Ing. Josef Novák, Ph.D.  
vedoucí ústavu

V Liberci dne 19. října 2017

## **Prohlášení**

---

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou 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.

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

Datum: 14.5.2018

Podpis:





## **Poděkování**

---

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce, RNDr. Karlu Žídkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, vytvoření kvalitních podmínek pro tvorbu práce, předání důležitých podnětů a cenných rad, jakožto i za čas, který mi věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat výzkumnému centru TOPTEC v Turnově, které poskytlo zázemí a materiální podporu pro tvorbu práce.

Na závěr bych rád poděkoval své partnerce a rodině, kteří mě při psaní práce plně podporovali a věřili ve mě v průběhu celého studia.

## ***Anotace***

---

Tato diplomová práce se zabývá aplikacemi teorie komprimovaného snímání, konkrétně metodou jednopixelové kamery. Komprimované snímání je již řadu let považováno za velmi elegantní teorii využívanou k záznamu informace a metoda jednopixelové kamery představuje přímou a velmi názornou aplikaci této teorie. Práce představuje základní pojmy komprimovaného snímání a uvádí ve stručnosti principy využití teorie pro vybrané aplikace. Na těchto principech je následně vybudováno hned několik přístupů k využití metody jednopixelové kamery. Nejprve jsou za pomoci umělých dat stanoveny podmínky, za kterých je rekonstrukční algoritmus schopen provádět věrnou rekonstrukci, a metoda je tedy spolehlivě použitelná. Následně je zkonstruováno několik návrhů měřicích aparatur, u každé z nich je diskutována její spolehlivost a jsou uvedeny příklady rekonstrukcí. V závěru hlavní sekce jsou pak zmíněny technické aspekty spojené s měřením jedno- a dvoupixelovou kamerou. Cílem práce je zkoumat možnost implementace jednopixelové kamery při zobrazování mimo rozsah běžných zobrazovacích detektorů (např. v infračervené oblasti) a také při konstrukci tzv. hyperspektrální kamery. Práce si také klade za cíl seznámit čtenáře se základními myšlenkami komprimovaného snímání a s metodikou využití jednopixelové kamery, proto jsou jednotlivé metody a postupy popisovány velmi podrobně.

## ***Klíčová slova***

---

komprimované snímání, jednopixelová kamera, záznam obrazu, počítačová rekonstrukce obrazu, komprese signálu, digitální pole mikrozrcátek, balanční fotodiody



## ***Annotation***

---

The diploma thesis concerns with application of theory of compressed sensing, in particular with a measurement method called single pixel camera. Theory of compressed sensing raised a considerable amount of attention in recent years and is considered a very elegant method for information acquisition, while the single pixel camera method represents a straightforward and illustrative application of the theory. The thesis introduces some basic terms connected to the theory and presents useful principles for the application. These principles allow for the construction of measurement methods that fully exploit the theory. At first, artificial data are used to specify particular conditions that allow the reconstruction algorithm to conduct a reliable reconstruction. Subsequently, we construct several measurement designs, discuss their reliability and present some reconstruction examples. We conclude the main section with technical aspects interconnected with the single- and double- pixel camera measurement method. The thesis aim is to investigate implementation of single pixel camera for imaging in spectral ranges that are not measurable with standard imaging detectors (i.e. infrared spectral range) and also construction of hyperspectral camera. In addition, the thesis presents an introduction to a basic scheme of compressed sensing techniques, as well as techniques used for single pixel camera imaging. Therefore, the methods used are described in great detail.

## ***Keywords***

---

compressed sensing, single pixel camera, image acquisition, computer aided image reconstruction, signal compression, digital micromirror device, balanced photodiode

## Obsah

---

Úvod .....	13
1. Argumenty pro využití komprimovaného snímání .....	15
1.1. Matematické základy komprimovaného snímání .....	17
1.2. Algoritmy rekonstrukce dat za využití $l_1$ -minimalizace .....	20
1.3. Implementace komprimovaného snímání pomocí jednopixelové kamery .....	22
2. Testování možností metody jednopixelové kamery pomocí simulovaných dat .....	26
3. Snímání obrazu za využití dataprojektoru .....	31
4. Sestava pro měření viditelného a blízkého infračerveného spektra s pevnou náhodnou maskou .....	36
5. Využití digitálního zpracování světla pro pokročilé experimenty .....	40
5.1. Barevný záznam s originálním DLP Light Engine .....	42
5.2. Měření pomocí balanční NIR fotodiody, využití vlastního zdroje světla .....	43
5.3. Použití spektrometru jako jednopixelového detektoru .....	50
5.4. Aspekty spojené s využitím DMD pro měření .....	53
5.5. Řešení technických problémů spojených s použitím DLP .....	58
Závěr .....	62
REFERENCE .....	64
Obsah příloženého CD .....	67

## Seznam obrázků

---

Obrázek 1: Základní schéma jednopixelové kamery [28].....	22
Obrázek 2: Závislost citlivosti křemíkové fotodiody na vlnové délce světla [29].....	24
Obrázek 3: Práce s umělými daty.....	28
Obrázek 4: Rozdílně škálované záznamy intenzity se stejnou informační hodnotou ..	29
Obrázek 5: Průměrná odchylka pixelu rekonstruované scény 100 x 100 .....	30
Obrázek 6: Spolehlivost rekonstrukce v závislosti na hladině šumu .....	31
Obrázek 7: Snímek a schéma měřicí sestavy s dataprojektorem .....	32
Obrázek 8: Záznam skutečné scény za využití dataprojektoru .....	32
Obrázek 9: Měření fluktuací intenzity a jejich korekce .....	33
Obrázek 10: Využití Fourierovy transformace do frekvenční domény.....	354
Obrázek 11: Měřicí sestava s posuvnou maskou.....	35
Obrázek 12: Hledání pozice submasky .....	37
Obrázek 13: Odlišnost scény v závislosti na spektrální oblasti .....	38
Obrázek 14: Porovnání kvality záznamu fotodiodou.....	39
Obrázek 15: Promítání obrazu pomocí DLP LightCrafteru a jeho časová závislost ...	40
Obrázek 16: Princip fungování LightCrafteru 1 .....	41
Obrázek 17: Princip fungování LightCrafteru 2 .....	41
Obrázek 18: Srovnání záznamu barevné scény.....	42
Obrázek 19: Schéma finální sestavy s balanční fotodiodou.....	44
Obrázek 20: Záznamy balanční fotodiodou .....	45
Obrázek 21: Zlepšování kvality rekonstrukce se stoupajícím snímacím podílem .....	45
Obrázek 22: Postup při korekci na pozadí .....	46
Obrázek 23: Výřez záznamu mřížky s prostorovou periodou $d=60 \mu\text{m}$ . .....	47
Obrázek 24: Skenování obrazu .....	48
Obrázek 25: Chyba měření způsobená kosočtverečnou sítí DMD.....	49
Obrázek 26: Porovnání kvality záznamu spektroskopem .....	51
Obrázek 27: Experiment se spektroskopem v IR .....	52
Obrázek 28: Záznam spektra procházejícího difusorem .....	52
Obrázek 29: Foto finální sestavy s fotodiodou.....	53
Obrázek 30: Osvětlení DMD „zespodu“ .....	55
Obrázek 31: Moiré .....	56
Obrázek 32: Měření S-maticemi .....	577
Obrázek 33: rozpoznávání sekvence .....	59
Obrázek 34: Kontrola linearit balanční fotodiody.....	60

## Seznam symbolů a zkratek

---

$A$ – Měřicí matice	$dS$ – Inkrement plochy
$d$ – Prostorová perioda mřížky	$T$ – Časová perioda signálu
$f$ – Frekvence rozvodové sítě	$x$ – Rekonstruovaný signál; Souřadnice
$f(x, y)$ – Funkce korelace	$y$ – Vektor měření; Souřadnice
$f_{beat}$ – Záznějová frekvence	$\nabla$ – Diskrétní gradient (rozdíl sousedních prvků matice)
$f_i$ – Vzorkovací frekvence	$\alpha_i$ – Transformační koeficienty
$H_n$ – Hadamardova matice velikosti $n$	$\alpha$ – Komprimovatelný vektor
$i, j$ – Index	$\hat{\alpha}$ – Nejlepší odhad řídkého vektoru
$I$ – Intenzita	$\delta_k$ – Konstanta zeslabené izometrie
$I_0$ – Vyzařovaná intenzita	$\delta_p$ – Maximální odchylka hodnoty pixelu
$I_{det}$ – detekovaná intenzita	$\Delta\lambda$ – Rozsah měřených vlnových délek
$K$ – Počet zachovaných koeficientů komprese	$\varepsilon_R, \varepsilon_G, \varepsilon_{TV}$ – Odchylka měřicí metody
$L$ – Velká pevná maska	$\lambda$ – Parametr totální variace
$M$ – Počet lineárních měření	$\mu(A)$ – Maximální hodnota kros-korelace matice $A$
$N$ – Velikost setu dat	$\sigma$ – Velikost šumu
$n_x, n_y$ – Rorměr menší masky	$\varphi$ – Normální distribuce
$N_x, N_y$ – Rorměr větší masky	$\phi_m$ – Testovací funkce
$O(\cdot)$ – Náročnost měření	$\psi_i$ – Bázové vektory transformace
$p$ – Normalizační koeficient	$\Psi$ – Transformující matice
$r$ – Vzdálenost detektoru	$\Phi$ – Kompresní matice
$S$ – Zaznamenávaná matice scény	
BP – algoritmus Basis Pursuit	OMP – Orthogonal Matching Pursuit
CCD – Zařízení pro záznam obrazu	RGB – Systém barev červená, modrá, zelená
CMOS – Zařízení pro záznam obrazu	RIP – Vlastnost zeslabené izometrie
CS – Komprimované snímání	SNR – Poměr signálu vůči šumu
DLP – Digitální zpracování světla	SPC – Jednopixelová kamera
DMD – Pole mikrometrových zrcátek	TVAL3 – Rekonstrukční algoritmus
IR – Infračervená oblast spektra	UV – Ultrafialová oblast spektra
IRLS – Iteratively Reweighted Least Squares	VIS – Viditelná oblast spektra
NIR – Blízká infračervená oblast spektra	

## Úvod

---

Obvyklý postup záznamu obrazu se neobejde bez složitých optických soustav, u kterých je vždy požadována vysoká kvalita zobrazování. Totéž platí pro kamerové čipy, což jsou často velmi nákladná zařízení, u kterých je obvykle vyžadována vysoká rozlišovací schopnost na úkor dostupnosti. V některých aplikacích ale bývá složité pracovat rychle a přesně s poli pixelů vysokých rozlišení, která produkují enormní objemy dat. Takto vyprodukovaná data jsou pak ve většině případů příliš objemná a vyvstává nutnost jejich redukce. Za účelem snížení objemu dat pro usnadnění práce s nimi je potřeba využít určitých výhodných vlastností, které u daného typu záznamu pozorujeme. Řadu běžných dat je možné zredukovat na malý zlomek původního objemu, přičemž se zachová prakticky kompletní informace. Objem dat se tak razantně snižuje, ale informace se zachovává. Tento proces se nazývá komprese dat. V historii bylo navrženo a vytvořeno mnoho přístupů, které komprese využívají, a vznikaly tak formáty, které umožňují velkou úsporu úložného prostoru, jenž musí být datům vyhrazen. Typickým příkladem je obrazový formát JPEG.

Odtud se zrodila myšlenka vytvořit matematické prostředky, které by umožnily komprimovat nejen již zaznamenaná data, ale přímo celý zaznamenávací proces. Byla tak vybudována poměrně rozsáhlá teorie komprimovaného snímání, která umožňuje velmi zjednodušit záznamové procesy, ale také využít obvyklých záznamových procesů pro získávání informace „navíc“. Komprimované snímání dnes nachází řadu nezastupitelných uplatnění například v lékařství (magnetická rezonance a tomografie [1]), transmisní elektronové mikroskopii [2], slouží pro rozpoznávání tváří [3] a umožňuje také například seismologům nahlížet do nitra Země [4].

Tato práce se zabývá konkrétní aplikací teorie komprimovaného snímání pro záznam obrazu, tzv. jednopixelovou kamerou (angl. single pixel camera). Tento přístup k měření obrazu využívá jediného statického detektoru pro záznam celého obrazu.

První část práce dává do souvislosti myšlenky komprimovaného snímání s klasickými přístupy k záznamu dat. Dále jsou zde uvedeny základní myšlenky, na kterých je teorie vystavěna. Z nich je vyvozeno několik vlastností, které umožňují praktické aplikační využití v podobě výpočetních algoritmů umožňujících obnovu ucelených výchozích informací zaznamenaných v komprimované formě. V závěru kapitoly je také poukázáno na přímou návaznost jednopixelové kamery na teorii komprimovaného snímání.

Další část práce se zabývá simulacemi jednotlivých měřicích a rekonstrukčních postupů, kdy jsou na umělých datech prezentovány základní návrhy pro konstrukci měřicích zařízení, jsou navrhovány konkrétní měřicí postupy a je zkoumána spolehlivost rekonstrukčního algoritmu a odolnost vůči různým úrovním šumu.

Závěrečné tři sekce se pak zabývají přímo aplikacemi jednopixelové kamery v konkrétních měřicích aparaturách. Je zde uvedeno hned několik přístupů, kterými byly myšlenky jednopixelové kamery převedeny v reálné experimenty, a je diskutována účinnost jednotlivých metod, vhodnost jejich využití pro dané aplikace a také omezení, která jsou s metodami spjata.

## **1. Argumenty pro využití komprimovaného snímání**

---

Chceme-li obecně docílit přesného záznamu daného signálu, je třeba vycházet z Nyquistova-Shannonova teorému definovaného v [5]. Tato podmínka stanovuje minimální vzorkovací frekvenci v obecné doméně, které je nutno dosáhnout pro účely kompletního záznamu informace s danou šířkou frekvenčního rozsahu. Jinými slovy tento teorém udává minimální frekvenci vzorkování, které je nutné dosáhnout za účelem zaznamenání ucelené informace z daného frekvenčního pásma, která je tak kompletně reprezentována diskrétními daty bez rizika aliasingu. Tento teorém umožnil přechod z analogového k digitálnímu záznamu dat, což v kombinaci s rozvojem počítačových technologií umožnilo tvorbu robustnějších a jednodušších měřicích zařízení.

Dnes však pozorujeme, že důsledkem velmi snadné dostupnosti měřicích zařízení, nízkých pořizovacích nákladů a snadného datového záznamu je nutnost zaznamenávat stále větší toky dat. Problém pak nastává v případě, kdy přísun dat začne přesahovat možnosti přenosových či záznamových zařízení, což dnes v mnohých aplikacích pozorujeme. Může také nastat situace, kdy je dokonce fyzikálně nemožné sestavit zařízení, jež by bylo schopné zaznamenávat signály s nezbytnou vzorkovací frekvencí.

Právě vysoké datové průtoky pak kladou značné nároky na objemy datových úložišť. Za účelem snížení nároků na úložné kapacity proto dochází k dodatečné kompresi informace (např. pro obraz formáty JPEG, pro zvuk WAV atd.). K tomu se však přistupuje vždy až po absolvování celého procesu získávání dat. Postup komprimace se pak běžně opírá o nalezení reprezentace signálu v jeho tzv. „řídké“ doméně, do které je daný signál transformovatelný [6]. Řídkost signálu tak spočívá v převedení původního signálu pomocí vhodné transformace na odlišnou maticovou reprezentaci, ve které je většina informace uložena pouze v malém zlomku prvků matice. Například pro obrazovou informaci je takovou vhodnou reprezentací Fourierova transformace nebo tzv. vlnková (angl. wavelet) transformace.

Ukazuje se, že i přes zachování jen malého zlomku prvků s nejvyššími hodnotami je pak u těchto řídkých reprezentací možné za využití zpětné transformace původní informaci velmi přesně obnovit. Řídkost se vyskytuje u velké většiny „přirozených“ signálů a konkrétněji při snímání obrazu scény je vždy možné signál s využitím výše zmíněných technik komprimovat [7].

Klíčová otázka tedy zní: Je nutné procházet si časově a na objem dat náročným procesem snímání celého záznamu daného signálu, když jeho podstatná část je následně nenávratně zapomenuta z důvodu snazší manipulace s informacemi v záznamu obsaženými?

Odpověď na tuto otázku nabízí tzv. komprimované snímání (Compressed Sensing, CS), které vychází z myšlenky, že záznam signálu nebo obrazu pomocí malého souboru neadaptivních lineárních měření nese dostatečnou informační hodnotu pro rekonstrukci a zpracování signálu [8], [9]. Protože je signál ve volené reprezentaci řídký, CS umožňuje obejít Nyquistův-Shannonův vzorkovací teorém a získává přímo zhuštěnou reprezentaci signálu za využití jen poměrně malého souboru měření. To nám dovoluje předpokládat, že těmito metodami budeme schopni efektivnějšího záznamu než za využití klasických metod. CS tedy usnadňuje práci se signálem tak, že místo záznamu dat při vysokých vzorkovacích frekvencích a následné kompresi umožňuje přímo snímat data v komprimované formě.

Obecně tedy lze o daném měření využívajícím CS říci, že máme set požadovaných dat o velikosti  $N$ , který zaznamenáváme pomocí vhodně navržené sady  $M$  lineárních měření, jež vždy obsahují lineární kombinaci měřících kanálů, přičemž takto získávaná data jsou v určité doméně řídká.

### ***Komprese signálu jako cesta ke snížení objemu dat***

Jak se uvádí v [10], klasický záznam signálu  $x$  délky  $N$  je při kompresi převáděn koeficienty  $\{\alpha_i\}$ ,  $i \in 1, \dots, N$ , získanými pomocí ortonormální báze s bázeovými vektory  $\{\psi_i\}$  velikosti  $N \times 1$  tak, že  $x = \sum_{i=1}^N \alpha_i \psi_i$ . Pokud tedy teď vytvoříme matici  $N \times N$  tím způsobem, že vektory  $\{\psi_i\}$  umístíme do sloupců vedle sebe a této matici přiřadíme příslušící vektor  $\alpha$ , získáme novou reprezentaci signálu  $x$  ve formě  $x = \Psi \alpha$ . Výhoda tohoto postupu tkví mimo jiné v tom, že pro daný typ signálu konkrétní délky je vybraná ortonormální báze pro transformaci vždy totožná. Vzniklý vektor  $\alpha$  však není řídký v pravém slova smyslu, popsaná transformace přiřadí každému prvku vektoru reálnou hodnotu, jen zřídka rovnou nule. Protože však velmi velký počet prvků nese zanedbatelně nízkou informační hodnotu (energií; většina prvků je velikostně zanedbatelná v porovnání s několika výraznými prvky s vysokými koeficienty), není třeba tyto prvky dále zachovávat. O takovém typu signálu, který má většinu informační hodnoty jen v několika málo prvcích, ale ostatní prvky přesto nejsou rovny 0, říkáme, že je komprimovatelný. Samotná komprese probíhá tak, že se zachová pouze  $K$  ( $K \ll N$ ) nejvyšších koeficientů, které i nadále velmi přesně reprezentují výchozí signál  $x$ . O signálu, který touto cestou vzniká a který má ve vhodné transformaci  $K$  nenulových koeficientů a všech zbylých  $N - K$  koeficientů rovných 0 říkáme, že je  $K$  – řídký (angl.  $K$  – sparse).



Zdaleka nejpoužívanější transformací tohoto typu je vlnková transformace, které je využito např. u obrazových datových typů .JPEG 2000 [11].

Jak bylo uvedeno výše, tento postup zisku komprimovaných dat trpí hned několika neodmyslitelnými nedostatky v efektivitě. Nejenže je nutné snímat poměrně velkou sadu dat o velikosti  $N$  i přesto, že konečný požadovaný počet nenulových prvků vektoru po transformaci je  $K$ , a tedy znatelná část informací je zmařena kompresí, transformační výpočet také musí proběhnout pro všech  $N$  koeficientů transformace, i když dojde k zachování pouze  $K$  nejvyšších prvků, což klade zbytečně vysoké nároky na výpočetní techniku.

### 1.1. Matematické základy komprimovaného snímání

---

Na tomto místě tak vstupuje do hry komprimované snímání, které obchází celý proces vzorkování signálu a přímo snímá  $M < N$  lineárních kombinací měření ve tvaru  $\mathbf{y}_m$  na zaznamenávaném signálu  $\mathbf{x}$  při současném uchování testovacích funkcí  $\{\boldsymbol{\phi}_m\}_{m=1}^M$  tak, že platí:

$$\mathbf{y}_m = \langle \mathbf{x}, \boldsymbol{\phi}_m \rangle \quad (1)$$

Pokud nyní vytvoříme  $M \times N$  matici  $\mathbf{A}$  z měřicích vektorů  $\mathbf{A}_m$ , vznikne jí příslušící vektor záznamu  $\mathbf{y}$  a můžeme nyní celý systém popsat základní rovnicí komprimovaného snímání:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{A}\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\alpha} = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\alpha} \quad (2)$$

Součin měřicí matice  $\mathbf{A}$  a transformující matice  $\boldsymbol{\Psi}$  je reprezentován kompresní maticí  $\boldsymbol{\Phi}$  velikosti  $M \times N$  sestavenou z  $M$  testovacích funkcí. Pro tvorbu měřicí matice  $\mathbf{A}$  tedy vycházíme ze znalosti domény řídké reprezentace systému. Jak ale navrhnout měřicí matici  $\mathbf{A}$  tak, aby její využití zaručovalo záznam signálu vhodný pro rekonstrukci? Ukazuje se, že klíčovým předpokladem u měřicí matice ve většině využívaných aplikací je její náhodnost [12].

Měření je neadaptivní, sloupce měřicí matice tedy obecně nijak nesouvisí s tvarem měřeného signálu  $\mathbf{x}$ , jelikož vycházejí z náhodného návrhu. O úspěšnosti využití komprimovaného snímání pro záznam rozhoduje pouze stupeň komprimovatelnosti signálu ve vybrané řídké reprezentaci a tvar testovacích funkcí [13].

Z matematické analýzy pak vyplývá, že při vhodném zvolení vlastností měřicí matice je vždy možné daný signál zpětně zrekonstruovat. Takto vytvořený systém je ale nedourčený, protože transformací z  $\mathbf{x}$  na  $\mathbf{y}$  přicházíme vlivem snížení dimenzionality měřeného vektoru o  $N$

–  $M$  informací o systému. Pro měřené  $\mathbf{y}$  (za podmínky  $M < N$ ) existuje nekonečné množství řešení systému  $\mathbf{x}$  takových, že  $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ , a je tak potřeba využít dalších omezujících faktorů, které jsou vždy vhodně navrženy pro danou konkrétní aplikaci. Základním cílem CS je pak hlavně navrhování měřicí matice  $\mathbf{A}$  tak, aby řídký nebo komprimovatelný signál  $\mathbf{x}$  mohl být velmi přesně nalezen jen ze znalosti měřeného  $\mathbf{y}$  [14]. Tento problém je řešením značně nedourčeného systému rovnic a je u něj tedy nutné využít speciálních regularizačních kritérií.

### *Ekvivalence $l_1$ - a $l_0$ -minimalizace*

Velikost signálu  $\mathbf{x}$  můžeme popsat pomocí  $l_p$ -normy. Tu definujeme jako:

$$\left( \sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad \text{pro } p \in (1; \infty) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n |x_i| \quad \text{pro } p \in (0; 1) \quad (4)$$

Zatímco klasická eukleidovská, tzv.  $l_2$ -minimalizace funguje na principu hledání nejnižší energie systému (např. metoda nejmenších čtverců), lze ukázat, že tento postup využívající  $l_2$ -normy s velkou pravděpodobností selhává při obnovování řídkých signálů získávaných za využití komprimovaného snímání. Pro účely CS by bylo nejvhodnější použít tzv.  $l_0$ -minimalizaci, která velmi výhodně popisuje řídkost transformovaného signálu, jelikož výsledná  $l_0$ -norma vektoru přímo odpovídá počtu nenulových koeficientů, což je nejvhodnější ukazatel při hledání řídké reprezentace. Problémem v případě  $l_0$ -minimalizace je však její implementace. Při hledání nejmenšího počtu nenulových maticových prvků neexistuje algoritmická metoda, která by v obecném případě konvergovala k výsledku. Funkce popisující  $l_0$ -normu je totiž z podstaty nespojitá a nelze u ní tedy určit tendenční gradient, který by sloužil jako prostředek k iterativnímu řešení minimalizace.

Intuice však napovídá, že bude existovat normalizační metoda schopná daný systém správně korigovat a umožní konvergenci řešení. Pro algoritmickou implementaci je vhodná libovolná minimalizace, kde  $p \in (1; \infty)$  [15].

Ukazuje se, že pro dostatečně velké počty vzorků je stejně vhodnou normalizací pro hledání řešení  $l_1$ -minimalizace. O vhodnosti využití  $l_1$ -minimalizace pro rekonstrukci bylo napsáno velké množství prací (např. [16], [17]). Tyto práce stanovují kritéria, za kterých je možné  $l_0$ - a  $l_1$ -minimalizace považovat za ekvivalentní přístupy. Podmínkami ekvivalence  $l_1$ - a  $l_0$ -minimalizace jsou:

1) Vlastnost zeslabené izometrie (Restricted Isometry Property, RIP) [18] – vychází z vlastnosti nulového prostoru, na rozdíl od ní však nabízí jistotu konvergence řešení. Jak název napovídá, podmínka využívá izometrie, tedy zobrazení, které zachovává délku vektoru.

Nejmenší číslo  $\delta_K \in (0,1)$ , pro které platí:

$$(\mathbf{1} - \delta_K) * \|z\|_2^2 \leq \|A_T z\|_2^2 \leq (\mathbf{1} + \delta_K) * \|z\|_2^2, \quad (5)$$

kde  $z$  je libovolný vektor  $z \in \{\in \mathbb{R}^N \mid \|\alpha\|_0 \leq k\}$  a  $T \leq K$ , je nazýváno konstantou zeslabené izometrie. Požadujeme tedy navržení měřicí matice  $A$  tak, aby byla každá podmnožina měřících vektorů  $A_T$  o velikosti maximálně  $K$  jejích sloupců navzájem přibližně ortogonální. Přibližná ortogonalita je zapříčiněna podmíněnou velikostí konstanty  $\delta_K \in (0,1)$ .

Interpretace podmínky je taková, že pokud je měřicí matice správně navržena a splňuje tak RIP, je zajištěno, že žádné 2 výchozí  $K$ -řádké vektory  $\alpha$  nemohou být zaznamenány jako stejný naměřený vektor  $y$ .

Tato podmínka je s pravděpodobností hraničící s jistotou splněna pro náhodné gaussovské a náhodné Bernoulliho matice [19] při současně velmi nízkých hodnotách konstanty zeslabené izometrie.

2) Vzájemná koherence vektorů měřicí matice – jako vzájemnou koherenci vektorů měřicí matice označujeme maximální hodnotu kros-korelace mezi sloupci v  $A$ :

$$\mu(A) = \max_{i \neq j} \frac{|A_i^T A_j|}{\|A_i\|_2 \|A_j\|_2} \quad (6)$$

Protože je koherence blízce spjata s RIP, ale je mnohem snazší ji určit, je toto kritérium velmi často využíváno pro určování míry spolehlivosti rekonstrukce za využití  $A$ . Matice, která splňuje RIP, mívá velmi nízké hodnoty koherence nebo není koherentní vůbec. Také většinou platí, že vysoce koherentní matice nesplňuje RIP.

Jak popisuje [20], vztah mezi RIP a vzájemnou koherencí měřících vektorů je:

$$\delta_K \leq (K - 1) * \mu(A) \quad (7)$$

Díky tomu může být horní hranice RIP ustanovena přímo z vypočtení vzájemné koherence  $O(N^2)$ , což představuje značnou časovou úsporu oproti kombinatorické náročnosti získání konstanty zeslabené izometrie.

Pro vzájemnou koherenci dvou náhodných matic jsou pak určeny limity, které uvádí literatura [21]:

$$\sqrt{\frac{N-M}{M(N-1)}} \leq \mu(A) \leq 1 \quad (8)$$

Pokud je tedy  $N \gg M$ , platí pro koherenci  $\mu(A) \geq \sqrt{\frac{1}{M}}$ .

Pokud navržená matice splňuje vlastnost zeslabené izometrie z rovnice (5) a je tedy vhodná pro měření pomocí CS, pak platí, že pro rekonstrukci stačí  $M$  měření a náročnost měření je:

$$M = O(K \log N) \quad (9)$$

Vlastnost zeslabené izometrie spolu s koherencí definují měřicí matici  $A$ , která za využití CS zdárně zaznamenává výchozí obraz signálu  $\mathbf{x}$ .

## 1.2. Algoritmy rekonstrukce dat za využití $l_1$ -minimalizace

---

Existuje hned několik algoritmických metod v rámci CS, které jsou využívány za účelem rekonstrukce hledaného signálu  $\mathbf{x}$ . Níže je ve stručnosti uveden krátký přehled nejvyužívanějších přístupů pro obnovení signálu délky  $N$  ze sníženého počtu  $M$  záznamů.

### *Relaxační algoritmus*

Tento postup hledání výchozího signálu probíhá na principu klasické minimalizace funkce [22], tedy minimalizace za využití gradientu funkce. Funkce musí být tedy nutně diferencovatelná, což opět poukazuje na nevhodnost využití  $l_0$ -minimalizace. Algoritmus tak provede diferenciaci  $l_1$ -minimalizace a při každé iteraci se vydá směrem nejvyššího gradientu.

Minimalizace vektoru tedy probíhá přímo v řídkém vektorovém prostoru dle předpisu:

$$\hat{\alpha} = \mathit{arg\ min} \|\alpha\|_1, \quad \text{kdy platí} \quad \|A\Psi\alpha - \mathbf{y}\|_2 \leq \epsilon_n \quad (10)$$

Příkladem těchto algoritmů, které se běžně používají v CS, jsou Basis Pursuit (BP) [22] nebo Iteratively Reweighted Least Squares (IRLS) [23].

### *Hladový algoritmus [24]*

Tyto algoritmy vybírají jednotlivě prvky vektoru  $\alpha$  dle toho, jaký mají vliv na výsledný zaznamenaný signál. Jde o iterační metodu, která v každé iteraci přidává novou komponentu,

příčemž simultánně optimalizuje hladiny již započítávaných prvků. Tímto přístupem lze vhodné řešení nalézt v poměrně krátkém čase. Cílem metody je udržet co největší počet prvků na nulové hodnotě, tak aby řešením byl co nejřidší vektor. Pro výpočet se tak testovací funkce opět musejí řídit vlastností zeslabené izometrie (RIP, rovnice (5)) jako v předcházejícím případě. Hledání optimálního řešení tak opět probíhá v řídkém vektorovém prostoru a jako omezující podmínka je volena míra chyby řídké aproximace:

$$\varepsilon_g \geq \|A\Psi\alpha - \mathbf{y}\|_2 \quad (11)$$

Tento přístup tak je velmi jednoduchou, ale elegantní alternativou relaxace  $l_1$ -minimalizace, která umožňuje zpracovávat velké objemy dat při zachování nižší časové náročnosti. Dá se také říci, že díky tendenci zachovávat velký počet prvků nulových jde o jednu z mála přímo použitelných aplikací  $l_0$ -minimalizace, i když nejde o  $l_0$ -minimalizaci jako takovou. Nevýhodami těchto algoritmů je ale nejistota v nalézání optimálního řešení, protože toto iterační hledání nezaručuje dosažení globálního minima.

Příkladem hladového (angl. greedy) algoritmu je Orthogonal Matching Pursuit (OMP) [25].

### ***Minimalizace totální variace [26]***

Myšlenka stojící za touto rekonstrukční metodou je velmi jednoduchá. Pokud se zaměříme na snímání obrazu, tedy dvojrozměrné informace, reálné scény v sobě ve velké většině případů obsahují úseky, na nichž je jen velmi malý gradient v hodnotě intenzity pixelu. Jak se tedy ukazuje, scéna se jeví jako velmi řídká, pokud je vyjádřena v gradientní doméně. Transformující funkcí způsobující komprimovatelnost zaznamenaného obrazu tedy je funkce vyjadřující diferenci hodnot sousedních pixelů obrazu neboli totální variace. Přitom minimalizace vyhodnocující totální variaci může využívat libovolnou normu  $p \in \{1; \infty\}$ .

Optimalizační rovnice pak má předpis:

$$\min\|\mathbf{x}\|_{TV} = \|\nabla\mathbf{x}\|_p, \quad \text{kdy platí} \quad \|\mathbf{y} - A\mathbf{x}\|_2 \leq \varepsilon, \quad (12)$$

kde  $\nabla\mathbf{x}$  je rozdíl sousedících prvků vektoru.

Například pro 2D obrazovou informaci vypočteme  $\nabla\mathbf{x}$ :

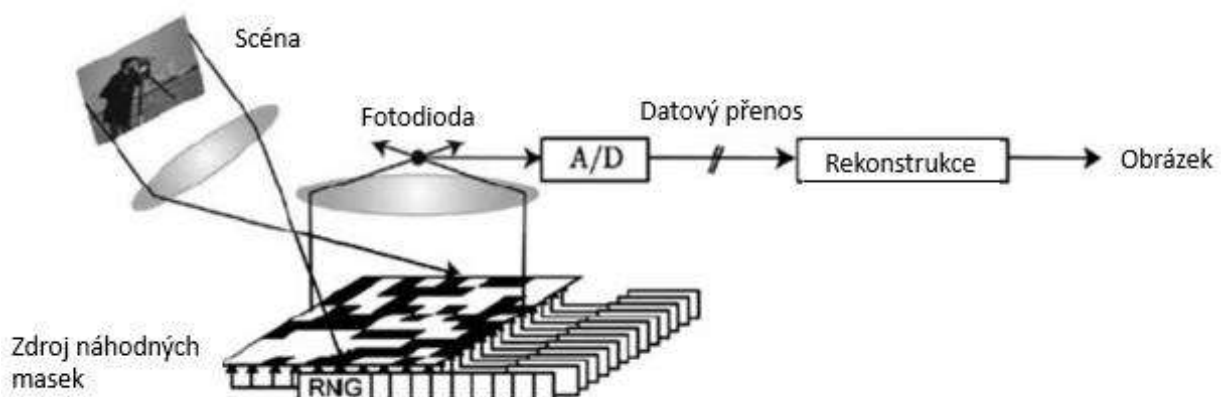
$$\nabla\mathbf{x}_{i,j} = (\mathbf{x}_{i,j} - \mathbf{x}_{i,j+1}) + (\mathbf{x}_{i,j} - \mathbf{x}_{i+1,j}) \quad (13)$$

Jak navíc uvádí studie rekonstrukčních algoritmů v [27], je metoda minimalizace totální variace nejrobustnější, nabízí velkou stabilitu a zároveň je nejspolehlivější metodou, co se týče kvality rekonstrukce obrazu.

### 1.3. Implementace komprimovaného snímání pomocí jednopixelové kamery

Zatímco klasická kamera pro záznam využívá početného pole detektorů fotonového toku, kdy každý detektor odpovídá jednomu pixelu obrazu, jednopixelová kamera (angl. Single pixel camera, SPC) založená na CS umožňuje scénu zachytit jen za využití jediného fotocitlivého detektoru – např. fotodiody nebo fotonásobiče. V běžné zobrazovací soustavě by použití jednopixelového detektoru vedlo k nutnosti skenovat zobrazovanou scénu „pixel po pixelu“. Avšak využití komprimovaného snímání jednopixelovou kamerou osvobozuje od nutnosti zaznamenávání hodnoty každého pixelu samostatně. Místo toho se zaznamenává celková intenzita z náhodně vybraných množin pixelů obrazu, jak ukazuje schéma jednopixelové kamery vyobrazené na obrázku 1.

V našem konkrétním případě jsme se zabývali aplikací komprimovaného snímání pro záznam obrazové informace v exotických částech spektra. Zatímco snímání obrazu ve viditelné oblasti spektra je už dlouhou dobu velmi propracované a systémy pro pořizování snímků jsou dostupné, snímání obrazu v méně přístupných spektrálních oblastech (hluboká ultrafialová (UV), střední a vzdálená infračervená (IR), terahertzová) je často zatíženo vysokou cenou a komplexností obrazového snímače a zobrazovací optiky.



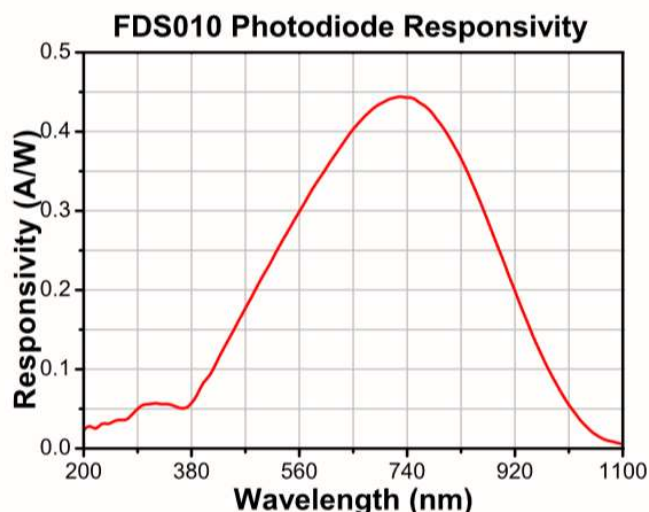
**Obrázek 1: Základní schéma jednopixelové kamery. Reálná scéna (v levé části) je modulována náhodnou maskou a výsledná intenzita je zaznamenána pro následnou zpětnou rekonstrukci obrázku [28].**

Běžně dostupná 2D digitální záznamová zařízení jsou totiž ve většině případů založena na bázi křemíku a řídí se tak jeho absorpční křivkou, viz příklad grafu odezvy fotodiody na obrázku 2. Jak je z grafu patrné, kromě oblasti viditelného světla je běžná kamera slepá vůči příchozímu světlu.

Velmi dobrou alternativu pro měření v těchto exotických oblastech spektra je použití výše zmíněné jednopixelové kamery na bázi CS. V praktické části diplomové práce budeme demonstrovat použití jednoduchého uspořádání na bázi jednopixelové kamery ve viditelné a následně i v infračervené oblasti. Rozhodli jsme se vycházet z práce skupiny prof. M. F. Duarte, pracující na Rice University, jež tuto metodu vyvinula [10].

Záznam vhodnou měřicí maticí  $\mathbf{A}$  navrženou v kapitole 1.2. probíhá následovně: Náhodný měřicí vektor  $\mathbf{A}_m$  je rozložen do náhodné matice. Obraz je touto maticí světelně modulován, dochází tak v podstatě k přenásobení obrazu měřicím vektorem. Pro každý měřicí vektor dostaneme 1 hodnotu intenzity  $\mathbf{y}_m$ . Výstupní vektor měření  $\mathbf{y}$  je tedy postupně konstruován po jednotlivých složkách  $\mathbf{y}_m$ . Protože nepředpokládáme a priori znalost snímané scény, lze o každém měření testovací funkcí hovořit jako o nezávislém měření, které v sobě nese informace o celé scéně. Tato vlastnost testovacích funkcí je velmi výhodná, protože v případě aplikování určitých kontrolních podmínek na měření je možné nevhodná měření přímo vyřadit bez nutnosti jejich opakování nebo nahrazování. Jde o obdobný jev, jakého se využívá u holografie, kdy záznamem je fourierovsky transformovaný obraz a každý bod záznamu v sobě obsahuje část informace ze všech bodů scény. V případě znehodnocení dané oblasti hologramu tak i nadále po zpětném zobrazování získáváme vzhled celé scény, pouze snižujeme celkovou kvalitu obrazu.

Je však nutné si uvědomit, že CS se zaobírá komprimovatelností záznamu a měřením již přímo komprimovaných signálů. Z toho důvodu nelze pokládat za cíl komprimovaného snímání obraz zaznamenat naprosto přesně, protože i klasický přístup ke kompresi signálu po jeho úplném a bezztrátovém záznamu způsobuje jistou ztrátu informace z důvodu zachování jen omezeného počtu nejvýraznějších prvků v řídké doméně. I když tak metoda není naprosto přesná, přináší velmi uspokojující možnosti záznamu za současného plného využití výhod komprimovaného snímání, jako jsou úspora snímacího času a snížení datových toků nebo snížení potřebných výpočetních kapacit.



**Obrázek 2: Závislost citlivosti křemíkové fotodiody na vlnové délce světla [29].**

### *Fotodioda*

Nejjednodušším prostředkem pro kvantitativní záznam příchozí energie světla je fotodioda, která je schopna zaznamenávat nejzákladnější informaci o obrazu, tedy celkovou sumu příchozí intenzity. Jde tak v podstatě o integrování celkového světelného toku rozptýleného nebo vyzářeného od povrchu objektu směrem k fotodiodě. Dostáváme tak základní informaci, kolik světla je od povrchu objektu odraženo v závislosti na pozici, výkonu a spektrálním složení osvětlujícího zdroje – jde však o jediný intenzitní údaj a fotodioda je tedy jednopixelový, spektrálně integrující detektor.

Existuje celá řada jednopixelových detektorů intenzity světla, např. fotodioda, fotonásobič nebo bolometr. V této diplomové práci však byly pro spektrálně nerozlišená měření používány výhradně fotodiody. Proto budeme v textu odkazovat výhradně na fotodiody, ačkoli lze analogicky stejná tvrzení aplikovat i na další typy jednopixelových detektorů.

Při měření celkové intenzity světla je třeba brát v úvahu závislost intenzity rozptýleného světla na vzdálenosti  $r$ . Tato závislost je pro vyzářující plochu tělesa popsána následující rovnicí:

$$I_{det} = \int \frac{I_0 * dS}{4\pi r^2}, \quad (14)$$

kde  $I_0 * dS$  je výkon světla vyzářovaný inkrementem plochy tělesa,  $r$  je vzdálenost detektoru od plochy a  $I_{det}$  je celková detekovaná intenzita světla. Je důležité si uvědomit, že vzdálenost



detektoru  $r$  je pro různé body scény různá, proto bude detektor vnímat intenzitu z těchto bodů odlišně.

Měření fotodiodou samo o sobě nelze klasicky použít v případě, kdy je cílem získat informaci o celkovém vzezření scény. Při běžných postupech je třeba pro jednopixelové systémy navrhnout zobrazovací systém, který scénu skenuje a umožňuje tak zaznamenat intenzitu přicházející z určité omezené podoblasti obrazu [30]. To je v řadě spektrálních oblastí (hluboká ultrafialová oblast, terahertzové vlny, atd.) velmi komplikovaný úkol. Takto měřená intenzita přitom nese informaci jen o velmi omezené podoblasti scény a jakákoliv odchylka způsobená šumem tak vnáší hrubou chybu do výsledné zaznamenávané hodnoty pixelu. Tato vlastnost je velmi nepříjemná například v oblasti střední IR, kdy se již velmi znatelně projevuje tepelný šum detektoru, který je proto potřeba redukovat pomocí chlazení detektoru. Klasické 2D metody záznamu obrazu v těchto spektrálních oblastech využívají kompletní znalosti rozložení přichodící intenzity záření z každého místa scény (každý bod scény se přezobrazuje na určitou část záznamového zařízení), to ale vyžaduje tvorbu komplexních 2D snímačů, jako jsou pole bolometrů, CCD nebo CMOS pole [31] jejichž výroba z exotických polovodičů je nákladná.

Výše zmiňované komplikace s tvorbou záznamových zařízení je možné vyřešit pomocí měřicí metody, která využívá pouze jediného fotodetektoru pro měření intenzity z celého obrazu scény naráz, navíc bez nutnosti zapojení komplexní zobrazovací optiky. Nejjednodušší možností je detekovat pomocí fotodiody světlo rozptýlené z měřené scény. Protože na objektu dochází za běžných okolností ke světelné difuzi a každý osvětlený bod na objektu se tak stává novým zdrojem světelného vlnění, je možné celou scénu snímat pouze fotodiodou. Jednopixelová kamera v pojetí s fotodiodou tak je schopna zaznamenávat celkový integrál světla ze všech bodů scény, jak je popsáno rovnicí (14), bez užití jakékoliv zobrazovací optiky. Takováto měřicí sestava nemá definováno clonové číslo a rozměry scény jsou dány čistě velikostí plochy, jejíž světelná intenzita je modulována měřicím vektorem. Sestava využívající tohoto jednoduchého přístupu je popsána v kapitole 3. Díky využití komprimovaného snímání navíc dochází k výrazné úspoře měřicího času oproti skenování obrazu zobrazovací optikou. V případě nízké hladiny šumu měření totiž stačí malý počet měření (odpovídající jen asi 5–10 % počtu pixelů obrazu) k rekonstrukci ucelené obrazové informace.

## **2. Testování možností metody jednopixelové kamery pomocí simulovaných dat**

---

Před samotnou realizací SPC jsme testovali schopnosti rekonstrukce výpočetního algoritmu na vzorku umělých dat. Bylo zapotřebí navrhnout vhodný přístup k záznamu, který bude poskytovat rychlou kontrolu správnosti dat a který zároveň umožní kvalitní rekonstrukci.

### ***Volba rekonstrukčního algoritmu***

Pro rekonstrukci obrazu jsme se rozhodli využívat algoritmu TVAL3 (TV minimization by Augmented Lagrangian and ALternating direction Algorithm) [32], který, jak název napovídá, využívá totální variaci jako regularizační člen pro rekonstrukci obrazu. Nejprve jsme potřebovali určit, nakolik je tento algoritmus při rekonstrukci efektivní, pokud je snímaná celková zaznamenaná intenzita zatížena určitou měrou náhodného bílého šumu, jenž se dá u běžného měření detektorem typu fotodiody předpokládat. Za tímto účelem jsme provedli několik jednoduchých simulací, kdy jsme generovali matice obsahující náhodně hodnoty 0 a 1 (dále také náhodné binární matice nebo náhodné masky). Tyto matice jsou v literatuře označovány také jako náhodné Bernoulliho matice. Takto vytvořené matice jsou v [19] označovány za velmi vhodné pro metodu SPC.

Každá tato matice byla následně po prvcích přenásobena vybraným vzorem (patrné z obrázku 3), čímž je simulována modulace skutečné scény za pomoci náhodných masek. Celková intenzita snímku pak byla vždy určena jako součet všech prvků nově obdržené matice. Protože pro námi vybraný algoritmus není rozhodující celková hodnota intenzity, ale pouze její relativní hodnota v závislosti na míře osvětlení vzoru, byl vzniklý vektor intenzit  $I_0$  normalizován tak, aby průměrná naměřená intenzita byla rovna 1. Tento přístup nám v pozdějších aplikacích umožňoval přímou kontrolu nad měřenými daty v reálném čase. Měřený vektor intenzit pak byl přiřazen „datakrychli“ (angl. datacube) vygenerovaných matic. V tomto kroku jsme tak přímo ověřovali rekonstrukční schopnosti TVAL3 algoritmu na ideálních datech. Protože však dle rovnice (12) je možné provádět rekonstrukci i u signálu obsahujícího určitou úroveň šumu  $\varepsilon$ , rozhodli jsme se uměle jej do měření přidat. Šum s gaussovským rozložením byl tedy obdobně jako v [27] přidán ke každému prvku spočteného vektoru intenzit dle vztahu:

$$I_{n,i} = I_{0,i} + \frac{\sigma * |I_{0,i} - \bar{I}_0|}{M} * \varphi, \quad (15)$$

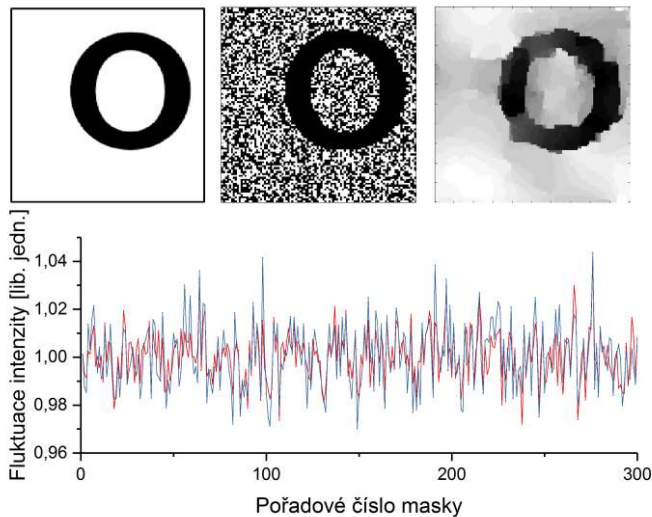
kde  $I_{0,i}$  je  $i$ -tý prvek výchozího vektoru intenzit,  $I_{n,i}$  je  $i$ -tý prvek vektoru intenzit obsahující šum,  $\sigma$  je relativní velikost šumu,  $M$  je počet měření a  $\varphi$  je normální distribuce se směrodatnou odchylkou rovnou 1.

Volba relativní velikosti šumu probíhala tak, aby do značné míry odpovídala předpokládaným hladinám následných nepřesností ve skutečných měřených hodnotách. Hodnotu relativní velikosti šumu jsme stanovili na  $\sigma = 0,1$ .

Jak bylo popsáno výše, myšlenka komprimovaného snímání zde vystupuje v podobě měření nízkého počtu lineárních kombinací jednotlivých datových údajů, což v principu umožňuje získat ucelené informace o obrazu. Protože jsou masky generovány náhodně a počet vzorků intenzity může být značně nižší, než počet pixelů, není možné počítat rekonstrukci přímo ze soustavy lineárních rovnic např. Gaussovskou eliminací. Náhodnost masek navíc nezaručuje existenci lineárního řešení ani při počtu vzorků přesahujícím počet pixelů požadovaného rekonstruovaného obrazu. Nicméně pokud jsou aplikovány omezující podmínky (v našem případě regularizátor využívající minimalizace totální variace) a měřicí matice splňují omezení RIP (rovnice (5)), je možné nalézt jednoznačné řešení, které minimalizuje následující výraz [32], a které velmi přesně zachycuje zaznamenanou scénu:

$$f(\mathbf{S}) = \|\mathbf{I} - \mathbf{A}\mathbf{S}\|^2 + \lambda * \|\nabla\mathbf{S}\|_p \quad (16)$$

Snažíme se tedy najít takovou scénu  $\mathbf{S}$ , která po modulaci náhodnou sadou matic  $\mathbf{A}$  co nejlépe odpovídá zaznamenanému vektoru intenzity  $\mathbf{I}$  a která je zároveň co nejspojitéjší. Spojitost scény je pak reprezentována operátorem  $\|\nabla \cdot\|_p$ , který bere v potaz totální variaci scény a parametr  $\lambda$  jí pak přiřazuje požadovanou váhu. Je patrné, že tato rovnice vychází přímo z rovnice (12) pro rekonstrukci za využití minimalizace totální variací.



**Obrázek 3: Práce s umělými daty. Horní řada: Vlevo – původní vzhled scény; Uprostřed – scéna modulovaná maskou 100 x 100; Vpravo – příklad rekonstrukce z podvzorkovaného systému (m = 300). Dolní graf: záznam fluktuace intenzit pro 300 náhodných masek (skutečný záznam – červeně, s přidaným šumem – modře).**

Tato analýza rekonstrukčního algoritmu dokázala poměrně přesně kvantifikovat kvalitu rekonstrukce, díky čemuž jsme byli následně schopni stanovit ideální počet měření, jenž je třeba provést pro dostatečně přesnou rekonstrukci. Pokud budeme vycházet z rovnice (9), pak přibližný počet měření pro obraz s rozlišením 100 x 100, tedy  $N = 100 * 100$  a mírou řídkosti  $\frac{k}{n} = 0,01$  odpovídá  $M = 400$  a tedy snímacímu podílu 4 %. Snímacím podílem budeme dále nazývat poměr mezi počtem měření a počtem pixelů obrazu.

Jak se ukázalo, při takovém návrhu záznamu je spolehlivost rekonstrukce poměrně nízká z důvodů, které budou diskutovány v následující kapitole. Snímací podíl byl pro takto získávaná data stanoven na  $\geq 10$  %. Komprimované snímání tedy přesto umožnilo ušetřit 90 % záznamového času oproti případu, kdy by byl obraz skenován. Celý tento fenomén je pro scénu s rozlišením 100 x 100 zdokumentován na obrázku 3. Při počítání rekonstrukce scény bylo třeba dbát na vhodnou volbu rekonstrukčních parametrů, jejichž vlastnosti jsou popsány v [33].

### *Symetričnost signálu*

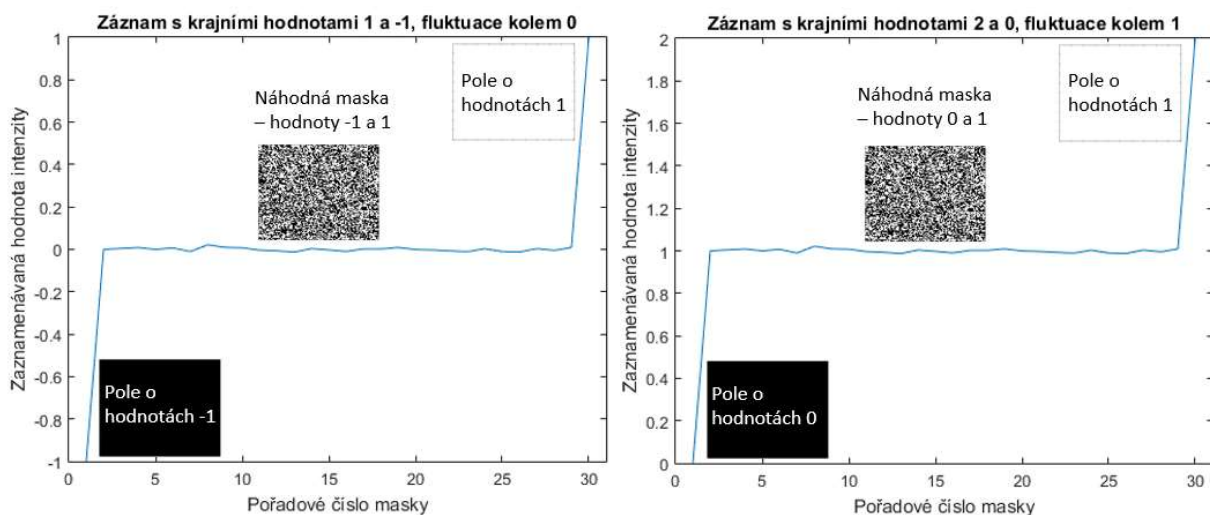
Zaznamenávané normalizované hodnoty intenzit jsou teoreticky v rozmezí mezi hodnotami 0 a 2. Toto tvrzení je opodstatněno úvahou, že intenzita každé masky byla zvolena jako suma všech prvků, přičemž přibližně 50 % zastoupení prvků s hodnotou 1 odpovídá intenzitě o hodnotě 1, což je důsledek námi zavedené normalizace. Přitom však 0 % zastoupení

prvků s hodnotou 1 odpovídá intenzitě hodnoty 0, a tudíž, kvůli symetrii, 100 % zastoupení prvků s hodnotou 1 nutně odpovídá intenzitě o hodnotě 2.

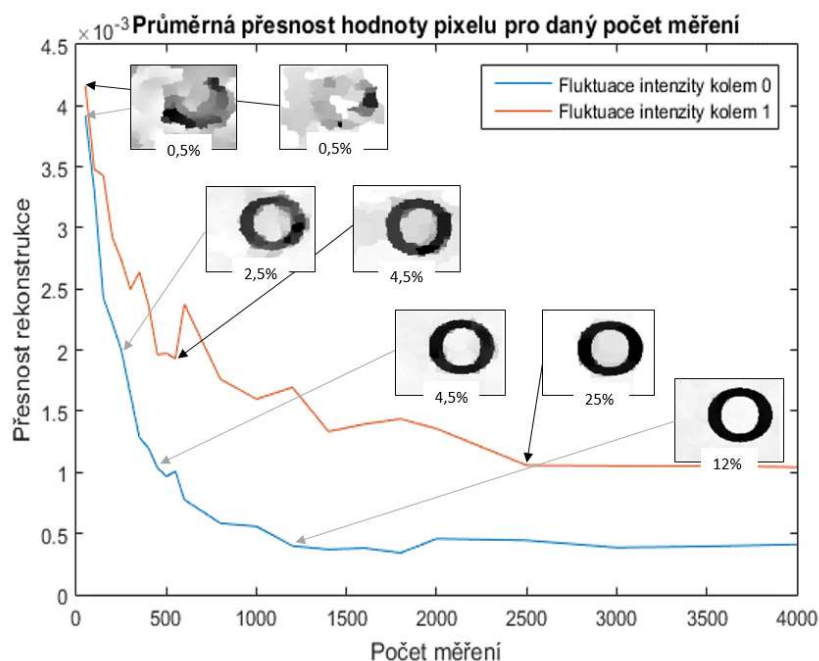
V pozdějších aplikacích bylo empiricky prokázáno, že rekonstrukční algoritmus může mít problémy s prvky uvnitř masek o hodnotě 0. Jednoduchá úvaha napovídá, že pokud je korelací hledána celková intenzita obrazu modulovaného maskou, což je rozhodujícím prvkem rekonstrukčního algoritmu, při pixelu masky hodnoty 0 algoritmus nedokáže pro danou masku ověřit, je-li navržená hodnota pixelu odhadována správně, či nikoliv.

To nás tedy vedlo k úpravě vstupních dat pro rekonstrukční algoritmus. Nově jsme generovali masky, které obsahovaly prvky o hodnotách 1 a -1, a zaznamenávané hodnoty intenzit tentokrát fluktovaly kolem 0 s minimální dosažitelnou hodnotou intenzity -1 a maximální dosažitelnou hodnotou 1. Podrobněji je to ilustrováno na obrázku 4.

Do umělých dat byl opět přidán šum o hodnotě relativní velikosti  $\sigma = 0,1$ . Jak se ukazuje, takto vytvořená data již splňují kritérium pro volbu počtu měření. Snímací podíl 4 % tedy již umožňuje dosahovat spolehlivé rekonstrukce. Tento nový přístup se ukázal jako velmi vhodný a proto jsme se k němu v pozdějších aplikacích bez výjimek uchýlili. Pro srovnání graf na obrázku 5 dokumentuje spolehlivost rekonstrukce za stejných podmínek při měření binárními maskami s hodnotami  $\{0,1\}$  a binárními maskami s hodnotami  $\{-1,1\}$ . Obrázek 5 navíc dobře dokumentuje závislost kvality rekonstrukce obou metod na počtu měření.



**Obrázek 4: Rozdílně škálované záznamy intenzity se stejnou informační hodnotou. Škálování má zásadní vliv na rekonstrukci.**



**Obrázek 5: Průměrná odchylka pixelu rekonstruované scény 100 x 100 od ideální hodnoty v závislosti na počtu vzorků. Vložené obrázky jsou příklady rekonstrukce při daném snímacím podílu.**

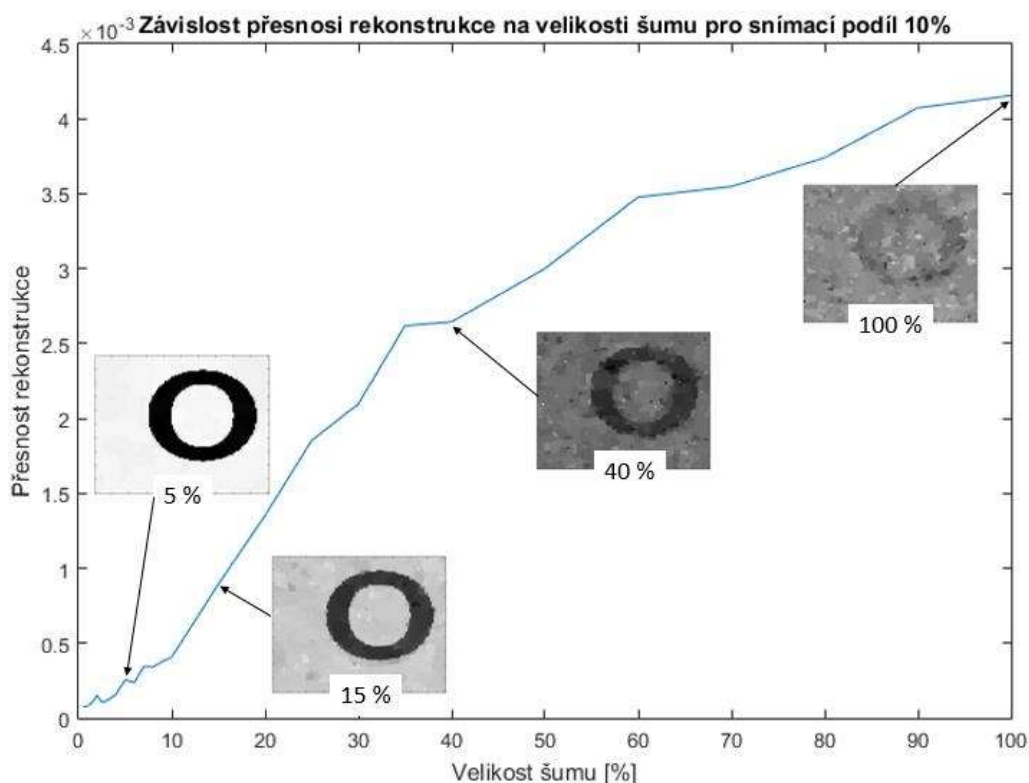
V závěrečném kroku práce s umělými daty jsme se rozhodli srovnat schopnosti rekonstrukčního algoritmu pro odlišné hladiny relativní velikosti šumu  $\sigma$ , jak je definována rovnicí (15), při zachování konstantní hodnoty snímacího podílu 10 %. Výsledná spolehlivost rekonstrukce je prezentována na obrázku 6. Jak je z obrázku zřejmé, je možné rekonstrukci provádět i při hladinách šumu převyšujících velikost využitelného signálu, ale významně se tím snižuje kvalita rekonstrukce. Vliv šumu lze také samozřejmě do značné míry ovlivnit velikostí snímacího podílu.

Byla tedy vyhodnocena funkčnost rekonstrukčního algoritmu a nyní bylo možné přejít ke konkrétnímu využití jednopixelové kamery pro reálnou scénu. Dá se říci, že každý z přístupů, jejichž výčet bude následovat, umožňuje aplikovat metodu jednopixelové kamery v lehce odlišné formě a za odlišným účelem. Každý z postupů také obsahuje některá pozitiva, ale i určité nedostatky, a i když se ve značném počtu detailů liší, základní princip fungování, jakožto i výchozí předpoklady definované výše pro ně platí bez výjimky.

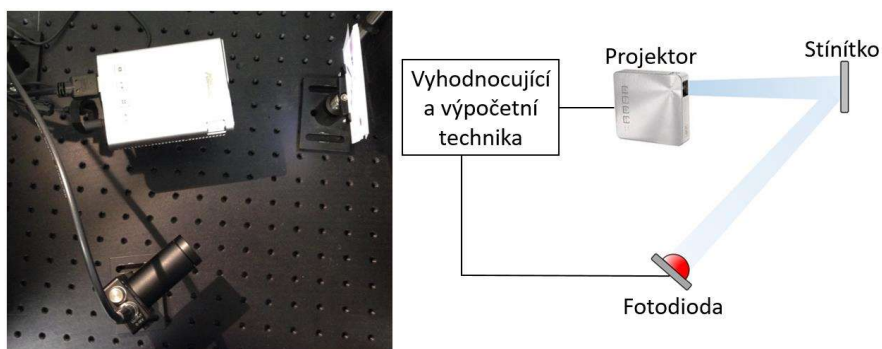
### 3. Snímání obrazu za využití dataprojektoru

#### Experimentální uspořádání

Pro jednoduchost a demonstraci robustnosti principů jednopixelové kamery byla nejprve navržená scéna osvětlována přímo náhodnými maskami. Ty byly promítány přímo na scénu dataprojektorem ASUS ZenBeam E1, se kterým probíhala komunikace prostřednictvím HDMI portu. Výsledná rozptýlená intenzita byla snímána na odraz přímo fotodiodou bez jakékoliv zobrazovací optiky. První aplikace tak přímo reflektuje jednoduchost měřicí metody. Jelikož každý bod scény funguje jako difuzor a dochází tak k rozptylu světla popsanému rovnicí (14), množství rozptýleného světla je velmi směrově závislé, a dochází k mírnému zkreslení při rekonstrukci obrazu, kdy světlo z okrajů scény je díky větší vzdálenosti od fotodiody více rozptýleno. To je ale možné jednoduše kompenzovat vytvořením a započítáním kalibračního snímku, kdy pro kalibraci je nejprve nasnímáno bílé pozadí scény. Snímek a schéma sestavy je na obrázku 7.



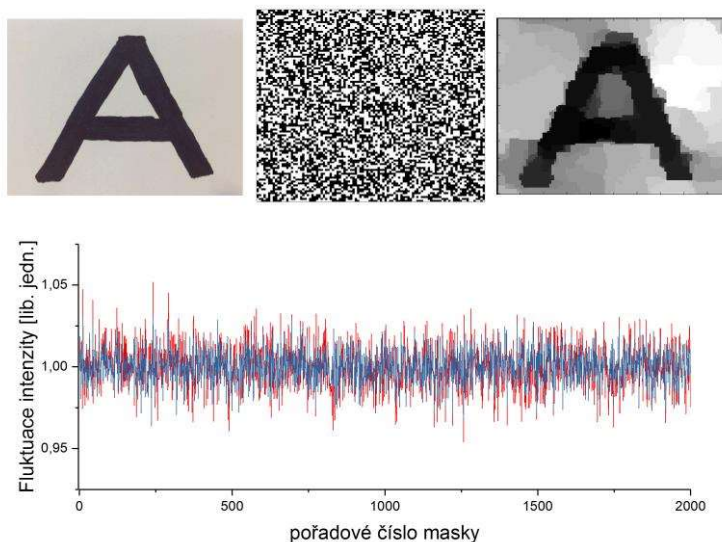
**Obrázek 6: Spolehlivost rekonstrukce v závislosti na hladině šumu s vloženými příklady rekonstrukcí (procenta značí relativní velikost šumu).**



**Obrázek 7: Snímek a schéma měřicí sestavy s dataprojektorem.**

### *Postup při záznamu*

Bylo zapotřebí celé měření zautomatizovat, tak aby projektor promítal sekvenčně náhodné masky do oblasti scény, ze které byla následně v rámci každé sekvence fotodiódou po dobu cca 1 sekundy snímána intenzita. Toto měření bylo třeba provádět cyklicky pro získání dostatečně obsáhlého datového vzorku. Protože rozsah měření byl řádově tisíce záznamů, rozhodli jsme se proto kontrolovat celý proces promítání masek a získávání intenzit prostřednictvím prostředí Matlab, které umožňuje velmi efektivně pracovat s maticemi a vektory, a je proto velmi vhodné pro implementaci jak CS algoritmu TVAL3, tak pro samotné definování náhodných masek a práci s nimi.



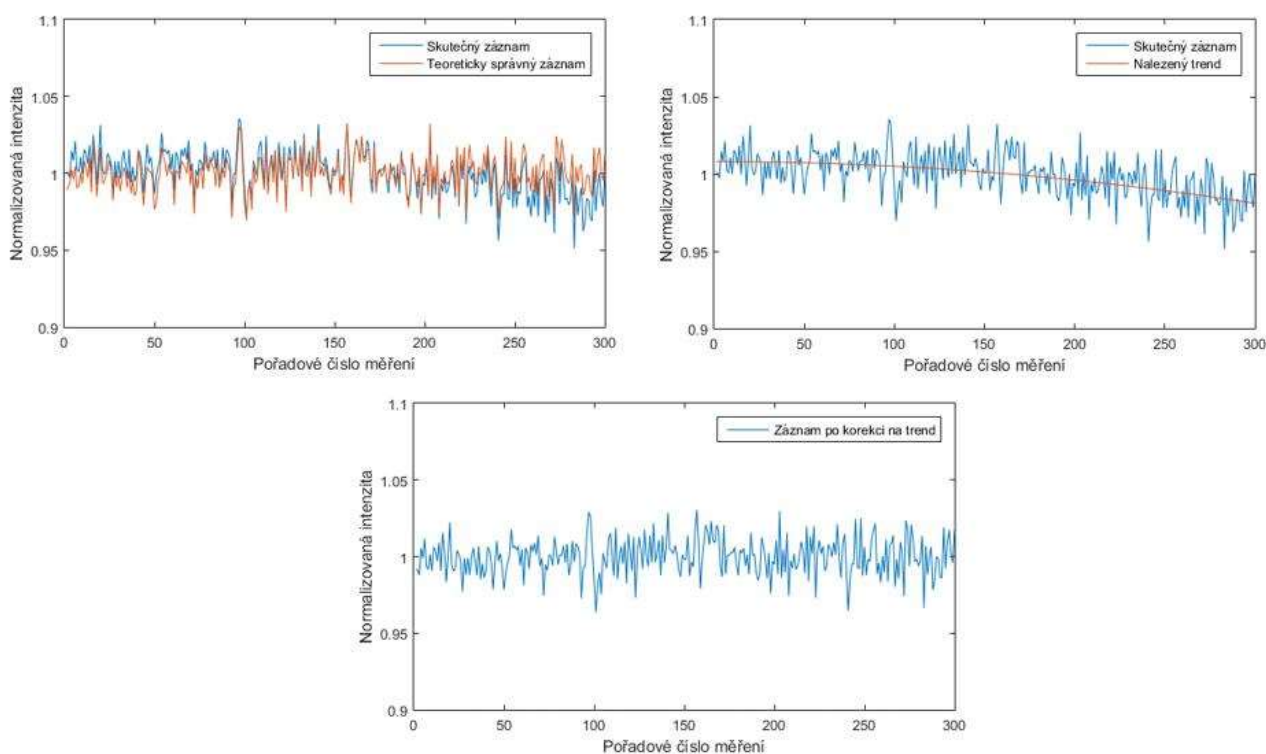
**Obrázek 8: Záznam skutečné scény. Horní řada: Vlevo – skutečná scéna; Uprostřed – náhodná maska promítaná do prostoru scény; Vpravo – příklad rekonstrukce skutečného obrazu. Dolní graf: záznam fluktuace intenzit, měřený signál – červeně, celková intenzita masky (bez započítání scény) – modře.**



Pro záznam hodnoty intenzity byl zprvu k fotodiodě připojen osciloskop Rigol DS-1022 CD. Protože projektor promítá do oblasti scény sekvence RGB obrazů, osciloskop zaznamenává velmi ostré intenzitní píky. Pro získání intenzitního údaje proto musel osciloskop zaznamenávat data po dobu mnoha promítnutých framů ( $\sim 1s$ ) z toho důvodu, aby se omezil vliv případné nerovnoměrnosti počtu zaznamenaných píků. Komunikace s měřicí kartou osciloskopu byla velmi pomalá a celkový postup získávání dat tak byl poměrně časově neefektivní.

To se změnilo zapojením karty pro záznam dat NI USB-6211 od firmy National Instruments. V tomto případě se napěťový signál odečítal z karty v reálném čase. Následně byl z důvodu urychlení záznamu přidán softwarový trigger, který umožňoval zkrátit měřicí dobu až na pouhý dvojnásobek periody framu dataprojektoru, tedy cca 60 ms.

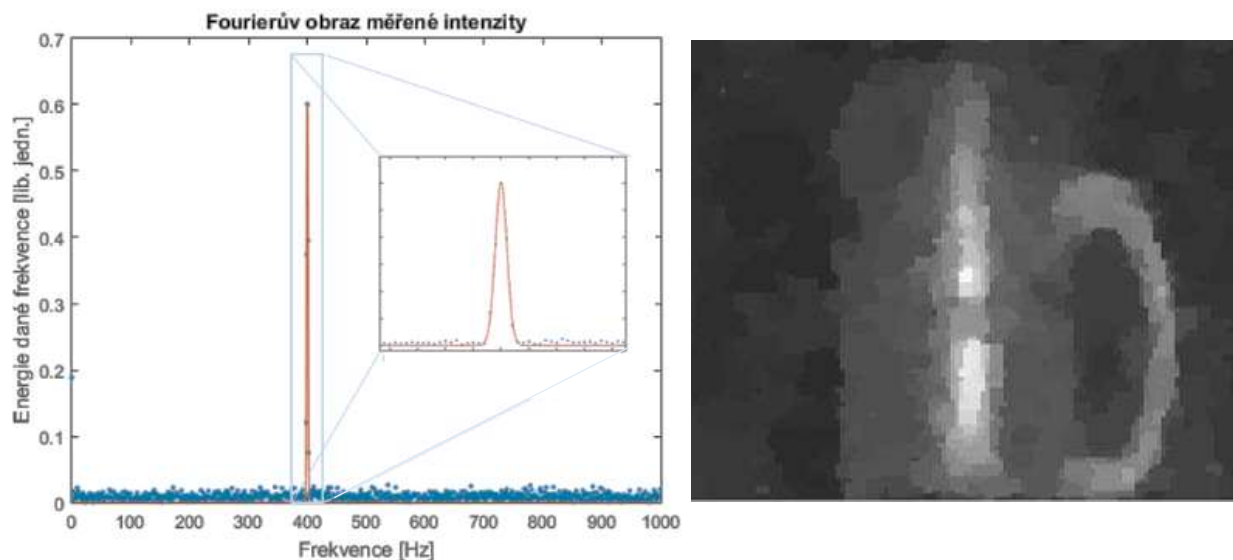
Zaznamenaný vektor intenzity a odhad spočtený jako suma všech světlých pixelů jsou spolu s rekonstrukcí reálné scény uvedeny na obrázku 8. Tento způsob kontroly odhadem počtu světlých pixelů byl zvolen pro přibližné ověření správnosti měřených dat v reálném čase.



**Obrázek 9: Měření fluktuací intenzity a jejich korekce. Nahoře vlevo – modře je zobrazen skutečný záznam fotodiodou, červeně je normalizovaná suma světlých pixelů masky. Nahoře vpravo – rozpoznání trendu (červeně) v měřených datech. Dole – data po korekci trendu.**

Různými vlivy, ať už vnějšího prostředí, nebo vlastním zahříváním fotodiody, docházelo k tomu, že průběh měřené intenzity neodpovídal průběhu odhadovanému. V takovém případě bylo třeba měření buďto lépe světelně izolovat, nebo se pokusit docílit co nejlepší korelace s teoretickým odhadem průběhu intenzit odečtením trendu. K tomu sloužilo proložení měřeného průběhu polynomem vhodného řádu, což následně umožnilo hodnoty intenzit dostatečně korigovat, zbavit se tak trendu signálu a velmi se přiblížit teoretickým hodnotám intenzity. Postup je znázorněn na obrázku 9.

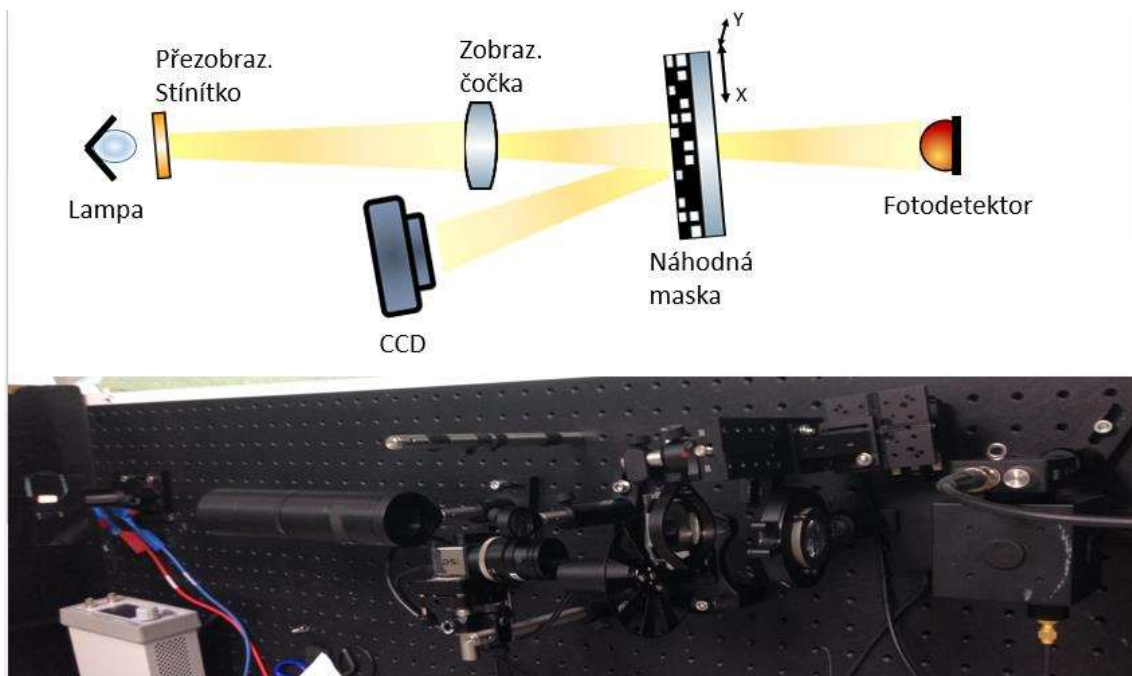
Postup s měřením pomocí dataprojektoru měl i další úskalí, a to hlavně v tom, že při vyšších snímacích rozlišení (masky s 80 x 80 pixely nebo více) docházelo u projektoru ke kolísání promítacího výkonu při měření, což způsobovalo velké skoky v zaznamenaných intenzitách. Tento jev přičítáme vnitřnímu chladiči projektoru, který se pro déle trvající měření samovolně spouštěl a vypínal. Toto kolísání bylo z hlediska intenzity pro lidské oko nepozorovatelné, avšak způsobovalo odchýlení dat až o 5 % měřicího rozsahu, což vylučovalo možnost provádění kvalitního měření, protože takto vzniklý offset v intenzitních datech nebylo možné jednoduše odstranit. Relativní posunutí části signálu pak znemožňovalo rekonstrukčnímu algoritmu správně přiřazovat intenzity měřicím maskám. Jedna z nejpovedenějších rekonstrukcí, které bylo za pomoci uspořádání dosaženo, je tak vyobrazena na obrázku 8.



**Obrázek 10: Využití Fourierovy transformace do frekvenční domény. Vlevo – fourierovský obraz scény modulované optickým přerušovačem + detail píku. Vpravo – záznam reálné scény hrnku v prostředí s přirozeným osvětlením.**

Intenzitní měření fotodiodou je velmi náchylné na výkyvy světelného pozadí pocházející z okolního prostředí. Za účelem odstranění takto vzniklých tendencí v signálu byl do soustavy zařazen optický přerušovač, zařízení, které s přesně danou frekvencí časově moduluje světelný signál. Signál z fotodiody tak může být přiveden na synchronní detektor, který signál převádí pomocí Fourierovy transformace do frekvenční domény. Měření  $y_m$  je pak přímo úměrné energii dominantního píku ve frekvenční doméně.

Takto provedený záznam se ukazuje jako mnohem robustnější měřicí metoda, která je schopna zaznamenávat velmi přesně i v prostředí s měnícím se světelným pozadím. Záznam reálné scény hrnku, jako příklad tohoto postupu, je na obrázku 10.



**Obrázek 11: Měřicí sestava s posuvnou maskou. Nahoře – schéma měřicí sestavy. Dole – skutečný snímek měřicí sestavy.**

#### **4. Sestava pro měření viditelného a blízkého infračerveného spektra s pevnou náhodnou maskou**

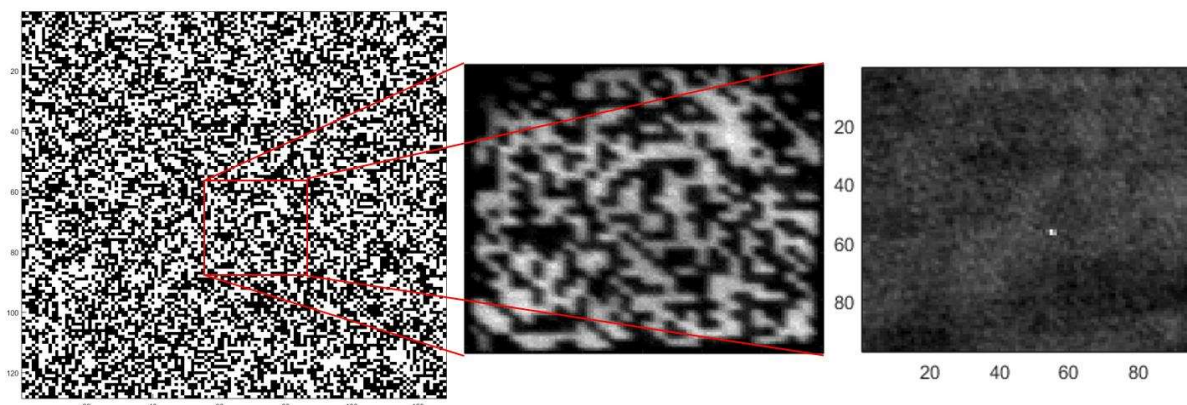
---

Následující experiment využíval servopohony jako prostředky pro definování subsetů náhodných masek vybíraných v rámci jedné větší masky. Toto nové uspořádání bylo navrženo za účelem snímání obrazu pomocí fotodetektorů s různými spektrálními rozsahy.

##### ***Experimentální uspořádání***

Nejprve byla zkonstruována zobrazovací sestava, která přezobrazovala scénu osvětlovanou lampou na povrch velké náhodné masky, která byla fotolitograficky vyleptána do vrstvy chromu na substrátu BK-7. Cílem bylo navrhnout sestavu tak, aby došlo k několikanásobnému zmenšení zobrazované scény, zatímco mělo být osvětleno  $n \times n$  pixelů litografické masky, jejíž celková velikost byla 12,7 x 12,7 mm a jejíž rozlišení bylo  $N \times N = 128 \times 128$  pixelů. Tento postup osvětlování podmnožiny  $n \times n$  pixelů velké masky dále nazýváme vybírání submasek. Rozlišení submasek bylo zvoleno 32 x 32 pixelů. V dalším kroku bylo potřeba jak masku, tak scénu zlehka vychýlit pod malým úhlem, aby bylo možné zaznamenat inverzní odražený vzhled submasky (negativ submasky), kterou je scéna modulována na kameru. Díky tomuto postupu pak bylo možné pozičně charakterizovat data rychlí submasek v rámci velké masky pro předložení výpočetnímu algoritmu. Pomocí fotodiody s integrační koulí pak byla zaznamenána intenzita obrazu prošlého maskou, díky čemuž jsme získali vektor měřené intenzity, který mohl být přiřazen k získané data rychlí submasek. Celá litografická maska pak byla připevněna na dvou servopohonech s poziční zpětnou vazbou. To nám umožňovalo velmi přesně kontrolovat pozici litografické masky a vymezovat tak přesně osvětlovanou část jejího povrchu. Foto a schéma této sestavy jsou zobrazeny na obrázku 11.

Část scény byla po odrazu zachycena na kameře, jež byla zaostřena na povrch masky a bylo tak možné zaznamenat negativ prošlé submasky. Pomocí prostředí Matlab jsme pak konkrétní submasku, na kterou byla scéna přezobrazena, určili korelací. Korelace za účelem získání pozice  $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  probíhala na základě znalosti topologie masky a snímku odraženého negativu osvětlené submasky dle vztahu:



**Obrázek 12: Hledání pozice submasky. Vlevo – celá maska o 128 x 128 pixelech. Uprostřed – záznam submasky kamerou a jeho identifikace v masce pomocí korelace. Vpravo – mapa vzájemné korelace submasky s celou maskou.**

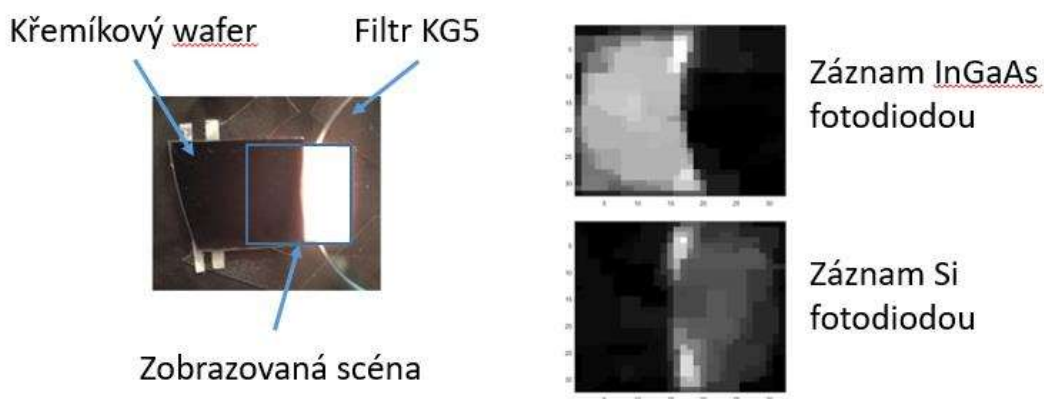
$$f(x, y) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} L(x + i, y + j) * S(i, j), \quad (17)$$

kde  $S$  je malá maska rozměru  $n \times n$  a  $L$  je velká maska rozměru  $N \times N$ . Nalezením maxima funkce  $f(x, y)$  byla přímo určena pozice submasky. Vzhled osvětlené submasky a její hledání s využitím korelace je popsáno na obrázku 12.

V každém kroku byla upravena pozice masky dvojicí servopohonů o danou vzdálenost tak, aby kamerový záznam negativu co nejpřesněji kopíroval hrany pixelů velké masky. Nejprve tak musela být provedena kalibrace velikosti posuvu servopohonu. Korelace vybrané podmnožiny pixelů s celou maskou byla velmi účinným prostředkem k určení osvětlované části chromované masky.

### ***Demonstrace zobrazení ve více spektrálních oblastech***

Díky použití jednopixelových detektorů (fotodiod) bylo možné provádět měření scény zároveň v několika spektrálních oblastech. Konkrétně jsme použili měření standardní Si diodou (citlivá ve viditelné, VIS oblasti spektra) a InGaAs fotodiodou (citlivá v infračervené, IR oblasti spektra). Pro demonstraci možností aparatury byla scéna tvořena dvěma komplementárními materiály, konkrétně křemíkovým waferem (IR propustné, VIS nepropustné) a KG5 filtrem (IR



**Obrázek 13: Odlišnost scény v závislosti na spektrální oblasti. Vlevo – Vyfotografovaná scéna. Vpravo – rekonstrukce v IR oblasti (nahore) a VIS oblasti (dole).**

nepropustné, VIS propustné). Vyfotografovaná scéna v porovnání s naší rekonstrukcí ve viditelné i infračervené oblasti je vyobrazena na obrázku 13.

Jelikož jsme vždy danou masku fotili za účelem následného hledání korelace, bylo v oblasti viditelného spektra možné pro kontrolu přímo porovnat rekonstruovanou scénu se zprůměrovaným snímkem masek, který v podstatě znázorňuje originální scénu. Spolehlivost rekonstrukce je tak možné porovnat na obrázku 14. Můžeme také pozorovat, že se zvětšujícím se počtem vzorků kvalita rekonstrukce dle očekávání stále stoupá.

### ***Omezující faktory měření pomocí pevné masky***

Protože platí, že náhodná měřicí maska má velmi nízkou hodnotu koherence sloupců a řádků (rovnice (6)), můžeme tvrdit, že pro získání jedinečné informace o obrazu stačí maskou pohnout o rozměr jednoho pixelu v jednom ze dvou transverzálních směrů. V takovém případě se bude vzájemná koherence nově vytvořené masky s některou z předchozích blížit hodnotě  $\frac{1}{M}$ .

Abychom dodrželi námi stanovené minimum počtu měření ( $m \sim 10\%$  počtu pixelů), bylo nutně zapotřebí maskou pohybovat ve směru obou os. To nám teoreticky umožňuje nabrat až  $m$  vzorků, kdy:

$$\begin{aligned}
 m &= (N_x - n_x + 1) * (N_y - n_y + 1) = (128 - 32 + 1)^2 \\
 &= 9409
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

kde  $N_x, N_y$  jsou rozměry celé masky a  $n_x, n_y$  jsou rozměry submasek.

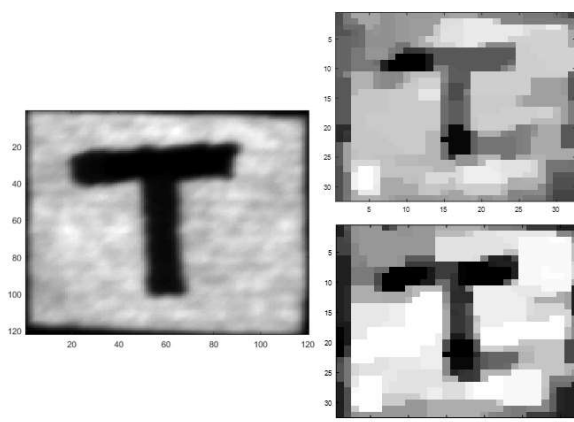
Jelikož je ale zvolený počet pixelů 1024, stačí nám pro dostatečně dlouhý záznam dosahující snímacího podílu více než  $p = 10\%$  měření využít pouze 2 řádky nebo sloupce masky. Navržený vzorec pro výpočet maximálního zaznamenanatelného rozlišení  $n_{max} \times n_{max}$  ze znalosti rozlišení litografické masky je:

$$n_{max} = \frac{(N_x + 1) - \sqrt{p * (N_x + 1)^2}}{(1 - p)} \quad (19)$$

V našem případě tedy  $n_{max} \cong 98$ . Takové měření by však vyžadovalo přestavení zobrazovací soustavy.

Jelikož měření probíhalo na integrační kouli, což je optický element, který pomocí optické difuze zpracovává světlo přicházející z jakéhokoliv směru, bylo zapotřebí sestavu velmi dobře světelně odizolovat. I sebemenší narušení vlivem vnějšího zdroje způsobovalo selhání celého měření. Vzhledem k požadovanému rozlišení se zaznamenávací doba 150 snímků pohybovala kolem cca 5–7 minut, což je velmi dlouhá doba na udržení konstantních podmínek. Proto bylo často potřeba nevhodná měření identifikovat a vyřadit. Při aplikaci těchto korekcí pak rekonstrukce vycházela poměrně spolehlivě, viz obrázek 14.

Dalšími rozšiřujícími kroky využívajícími tohoto měření by mohlo být zapojení spektroskopu na výstup z integrační koule, což by nám umožnilo rekonstruovat obraz pomocí naší sestavy pouze ve vybraném užším pásmu optické spektrální oblasti. Toho je využito v rámci následujícího experimentu, který na tento volně navazuje.

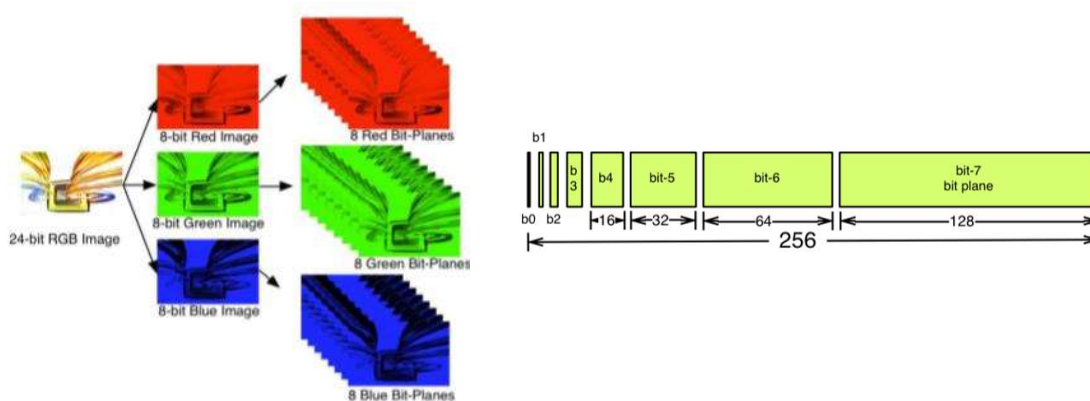


**Obrázek 14: Porovnání kvality záznamu fotodiodou: Vlevo – skutečný průměrovaný obraz na masce. Vpravo – rekonstruovaný záznam při 22 % snímacího podílu (nahore) a 31 % snímacího podílu (dole).**

## 5. Využití digitálního zpracování světla pro pokročilé experimenty

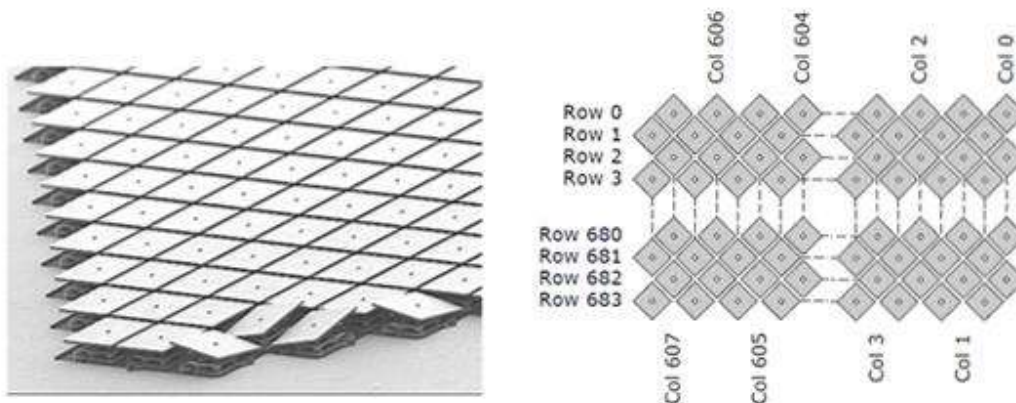
Vzhledem k omezením, která byla neodlučitelně spojena s předchozími návrhy měřicích aparatur, jsme se pro další experimenty rozhodli zapojit do měřicí aparatury Digital Light Processing® (digitální zpracování světla, DLP) LightCrafter™ Evaluation Module od Texas Instruments s myšlenkou, že bude vytvořena sestava obdobná té ze sekce 3, kdy byl k zobrazování využit dataprojektor. DLP LightCrafter funguje na principu dvourozměrného pole zrcátek, jejichž rozměry jsou řádově mikrometry (Digital Micromirror Device, DMD) s rozlišením 684 x 608 pixelů. Tato zrcátka mohou být nastavena do dvou poloh a vychylovat tak kolmý příchozí obraz o  $+12^\circ$  (ON stav, následuje zpracování pomocí Light Engine, neboli výstupní optiky za účelem promítání) a  $-12^\circ$  (OFF stav, výstup světla je blokován). Při běžném uživatelském provozu pak DLP spouští v rámci Light Enginu (optický systém zařízení DLP) zabudované RGB diody s frekvencí 60 Hz a zrcátka jsou v poloze ON po daný časový úsek úměrný integrální intenzitě každé z barev reprezentující hodnotu pixelu (rozlišení až 256 úrovní). Ilustrační schémata jsou na obrázku 15.

Zrcátka jsou na DMD uchycena v kosočtverečné síti, jak ukazuje obrázek 16, a zobrazení požadovaných vzorů tak není zcela přesné. Důvodem pro toto uložení může být snížení momentu setrvačnosti zrcátka při současném zachování jeho plochy, což zlepšuje ovladatelnost. Pro účely SPC však tento detail nepředstavuje nijak závažný problém. Dále bude tento fenomén diskutován v podkapitole Příčiny zvyšování hladiny šumu.

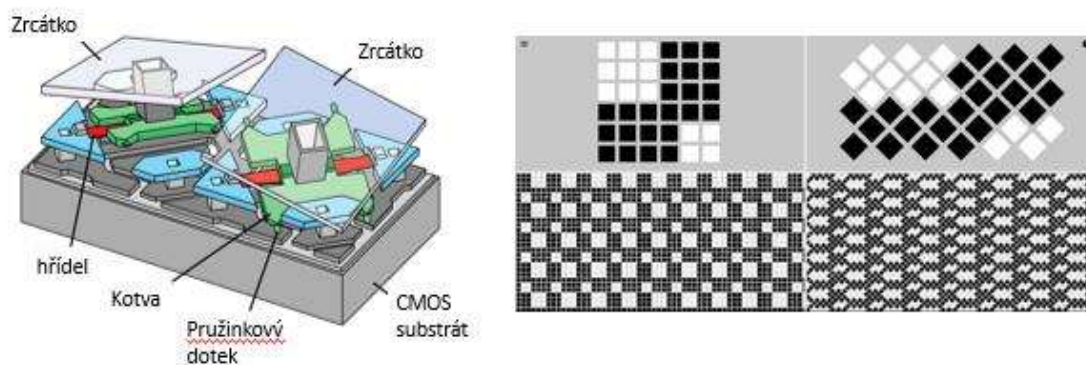


**Obrázek 15: Promítání obrazu pomocí DLP LightCrafteru a jeho časová závislost v bitové reprezentaci [34].**





**Obrázek 16: Princip fungování LightCrafteru 1. Vlevo – pole kosočtverců DMD pod elektronovým mikroskopem [35]. Vpravo – zobrazování obrazu pomocí DMD (úprava originálu z [36]).**



**Obrázek 17: Princip fungování LightCrafteru 2. Vlevo – schematický popis zařízení pro ovládání zrcátka [37]. Vpravo – princip číslování řádků a sloupců a nepoměr mezi horizontálním a vertikálním rozlišením.**

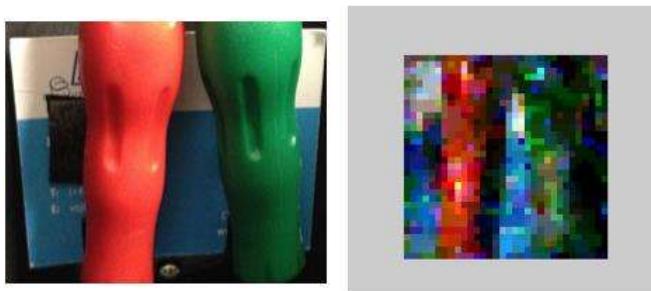
Jediná komplikace, která díky tomuto jevu nastává, je nesouměrnost horizontálního a vertikálního rozlišení. Zatímco v horizontálním směru je rozdíl v poloze sousedních pixelů rovný úhlopříčnému rozměru mikrozrcadla, ve vertikálním směru, z důvodu uložení zrcátek v tzv. zig-zag uspořádání (podobně jako např. u návrhu kamery v [38]), připadá na každý pixel pouze polovina úhlopříčky zrcátka. Dobře to ilustruje obrázek 17 v pravé části, kdy jsou čtvercové množiny pixelů promítaného obrazu zobrazovány jako útvary vodorovně podélného tvaru tvořeného kosočtverci DMD pixelů.

## 5.1. Barevný záznam s originálním DLP Light Engine

---

První experiment zahrnoval shodné uspořádání, jako v kapitole 3. Pro promítání náhodných masek byl ale tentokrát využit DLP LightCrafter a scéna byla opět snímána jednopixelovým detektorem ve formě fotodiody. Pro komunikaci se zařízením byla využita nadstavba skriptu pro prostředí Matlab popsaného v referenci [39], který původně obsahoval jen omezený systém příkazů. Nadstavba pak byla vytvořena podle návodu uváděného výrobcem [40]. Komunikace prostřednictvím USB portu pak probíhala přes protokol TCP/IP4. Komunikace však byla velmi pomalá a museli jsme volit značně dlouhé čekací doby, řádově sekundy. Problém s komunikací spočíval v nejistotě prodlevy mezi odesláním vzoru na DLP a jeho zobrazením na DMD, která se vždy lišila. Výhodou u DLP Evaluation Module oproti dataprojektoru představovala možnost přímo korigovat proud protékající diodami, kdy do určité hladiny stačí zařízení chladit vzduchem a nedochází tak ke kolísání osvětlovacího výkonu zařízení vlivem chlazení (viz kap. 3).

Díky dlouhodobé stabilitě a snadné konfiguraci promítané masky tak bylo možné provádět měření odděleně pro červenou, modrou a zelenou barvu, kdy byly masky dané barvy na scénu promítány vždy odděleně. Po sesazení odpovídajících barevných pixelů dohromady pak vznikl poměrně věrný obraz barevné scény. Pro porovnání s klasickou fotografií viz obrázek 18. Bez povšimnutí by také nemělo zůstat vystínování rekonstruovaného obrazu, kdy pozice snímací diody z boku způsobila, že z části osvětlované kompozice přicházelo na diodu méně světla, a tudíž se zrekonstruovala tmavě.



**Obrázek 18: Srovnání záznamu barevné scény: Vlevo – barevná fotografie. Vpravo – barevná rekonstrukce pomocí DLP.**

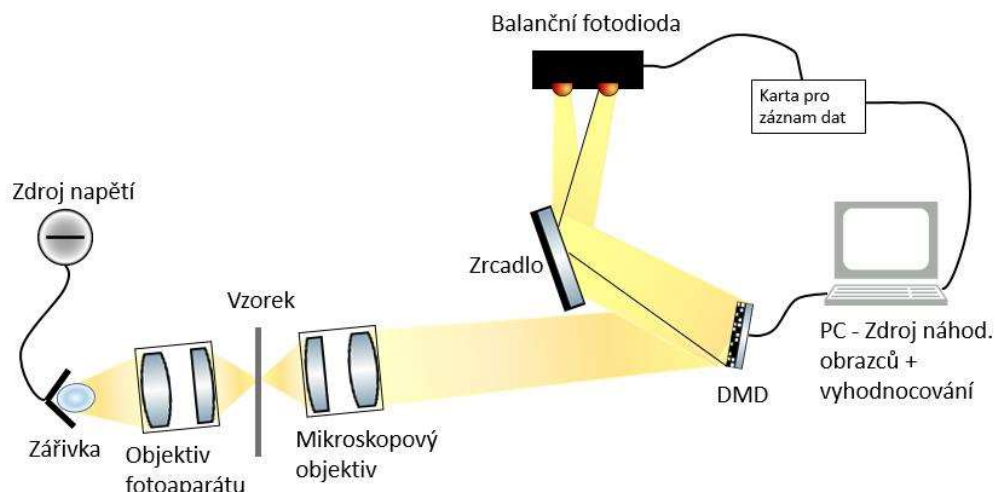
## 5.2. Měření pomocí balanční NIR fotodiody, využití vlastního zdroje světla

---

Pro další aplikace jsme se rozhodli využívat externích zdrojů světla nezávislých na DLP zařízení. Jelikož DLP využívá pole zrcátek DMD a promítací optiku Light Engine jako dvě oddělené jednotky, bylo možné Light Engine ze zařízení odmontovat a používat pouze pole DMD, které nám i nadále sloužilo jako zdroj náhodných masek. To nám tedy nakonec umožnilo využít vlastní optiky a vlastních zdrojů světla, což otevíralo pole novým aplikacím postaveným na tomto zařízení.

### *Experimentální uspořádání*

Jak již bylo popsáno v sekci 2, fotodiody nabízí vhodný prostředek pro záznam obrazu s využitím CS. Pro rozšířenou aplikaci metody jednopixelové kamery jsme se rozhodli využít balanční fotodiody operující v blízké infračervené oblasti (model 2317, germanium, 800–1750 nm) od firmy Newport™. K osvětlení scény byla využita klasická halogenová zářivka, která nabízí poměrně značný světelný výkon. Zářivka byla napájena klasickým laditelným zdrojem stejnosměrného napětí v rozmezí 8–14 V dle potřeby. Vzhledem k tomu, že LightCrafter jednoduše odklání světelné signály od normály dopadu o  $\pm 12^\circ$ , rozhodli jsme se, že bude vhodné snímat obě takto vzniklé světelné dráhy. Za tímto účelem byla využita balanční fotodiody, která snímá naráz signál z obou oblastí. Signály obou diod jsou pak analogově odečteny, což umožňuje velmi razantně zvýšit odstup signálu od šumu. Tento postup měření je pak nadále označován jako dvoupixelová kamera (double pixel camera). Předpokladem je, že venkovní osvětlení ovlivňuje shodně obě fotodiody dvoupixelové kamery a jeho vliv je pak v důsledku analogového odečítání vyrušen. Pokud tedy dochází ke změnám vnějších podmínek, využití balanční fotodiody umožňuje i přesto velmi stabilní a spolehlivé měření. Vytvoření měřicí sestavy byl poměrně náročný úkol a postupně docházelo k jejím velkým změnám. Konkrétní návod na tvorbu sestavy je diskutován v kapitole 5.4. Schéma finální sestavy je představeno na obrázku 19.



**Obrázek 19: Schéma finální sestavy s balanční fotodiódou. Svazek je na DMD rozdělen na dvě části a každá je sbírána jednou diódou.**

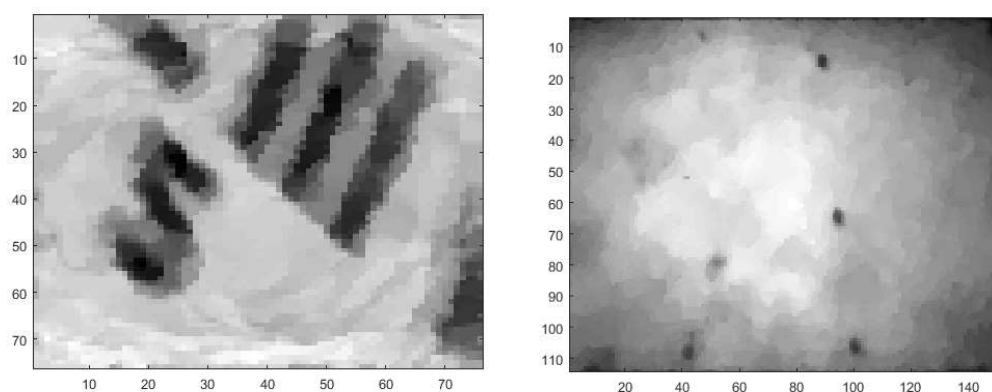
Zprvu probíhalo měření na stejném principu jako při využití dataprojektoru. Stejně jako v minulé aplikaci však bylo potřeba vyčkat po konkrétní časový úsek z toho důvodu, že mikroprocesoru u LightCrafteru trvalo značnou dobu zobrazení požadovaného vzoru. LightCrafter však obsahuje také mód sekvenčního zobrazování uložených vzorů, kdy je na ovládací čip nahrána sada masek a při vhodném nastavení je pak tato sada spuštěna jako sekvence s definovanými časovými intervaly pro promítané vzory. Sekvenční mód DLP LightCrafteru je probíráno podrobněji v kap. 5.4.

Změnu oproti sestavě s dataprojektorem představoval způsob modulace scény náhodnou maskou. Nově byl zobrazovaný předmět přezobrazován na pole DMD zrcátek pomocí mikroskopického objektivu RMS4X od firmy Thorlabs. Zobrazený předmět tak byl modulován maskou těsně před tím, než bylo světlo zaznamenáváno fotodiódou. Tento postup má nesrovnatelnou výhodu oproti tomu, kdy je světlem odraženým od DMD teprve osvětlována scéna, a to hlavně v tom, že se zde na krátké vzdálenosti minimalizuje projev disperze. Rozměry zrcátek jsou totiž tak malé ( $< 10\mu m$ ), že fungují jako reflexní difrakční mřížka a rozmítají tak světlo, jehož barevné složky tak získávají velkou směrovou závislost. Tento projev se dá minimalizovat právě vložením záznamového zařízení dvoupixelové kamery těsně za disperzní prvek.

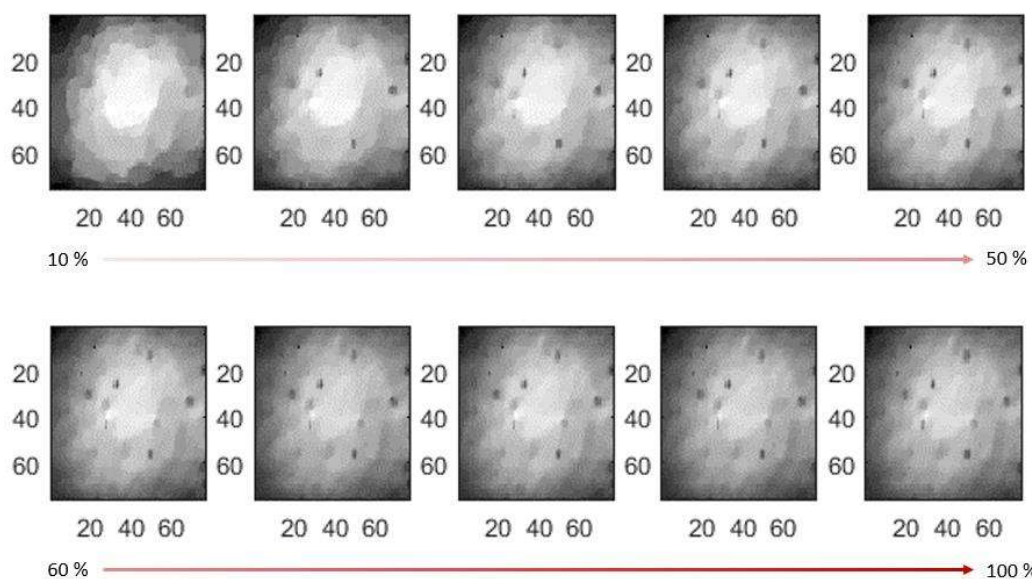
Zajímavou aplikaci by představovalo zobrazování za využití DMD právě jako disperzního členu pro záznam hyperspektrální informace. Tento postup snímání spektrálně rozloženého obrazu je další speciální aplikací komprimovaného snímání, viz [41].

## Záznamy

S takto upravenou sestavou jsme již byli schopni provádět velmi kvalitní měření v blízké infračervené oblasti světla. Na obrázcích níže můžeme vidět jak záznam univerzálního kalibračního štítku USAF, tak například záznam trámečku popsaného v [42], který je vytvořen z CdTe a CdZnTe a obsahuje krystalické nečistoty. Tento trámeček se ve viditelné oblasti jeví jako neprůhledný, zatímco právě v blízké infračervené oblasti, kde operuje balanční fotodioda, jsou neprůhledné pouze zaznamenané krystalické vady, tzv. inkluze. Rekonstruované snímky jsou vyobrazeny na obrázku 20.



**Obrázek 21: Záznamy balanční fotodiódou. Vlevo – zobrazování kalibračního štítku USAF. Vpravo – snímek inkluzí uvnitř pro VIS neprůhledného trámečku.**



**Obrázek 20: Zlepšování kvality rekonstrukce se stoupajícím snímacím podílem (zvyšování po 10 %).**

Je také možné pozorovat, že s přibývajícím počtem měření jsme schopni zaznamenávat stále jemnější detaily scény. Velmi dobře to ilustruje např. obrázek 21.

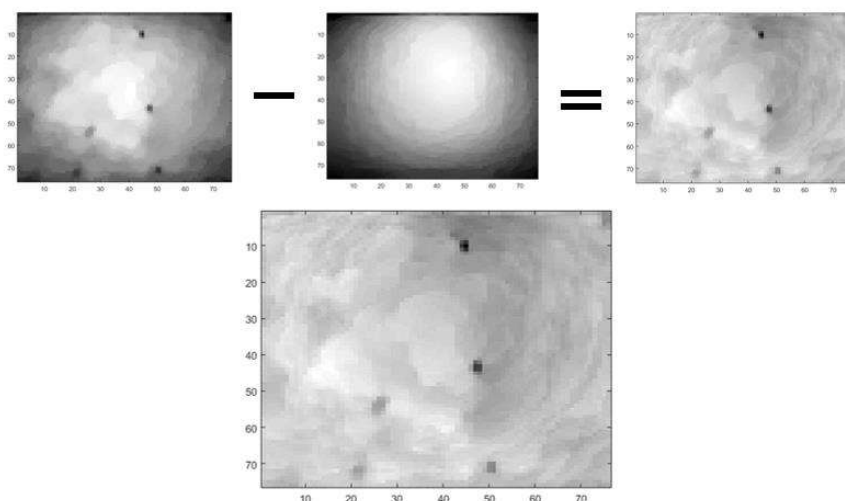
### *Zkreslení intenzit okrajů scény*

Pro záznam, který obsahuje zkreslení při okrajích scény (jako je tomu např. na obrázku 19 vlevo), je nutné využít korekce na pozadí. Před nebo po měření je nutné vyjmout vzorek, a měření je provedeno naprázdno za použití stejných rekonstrukčních podmínek. Následně je možné snímky odečíst a zbavit se tak zkreslení u krajů scény. Tento postup je prezentován na obrázku 22.

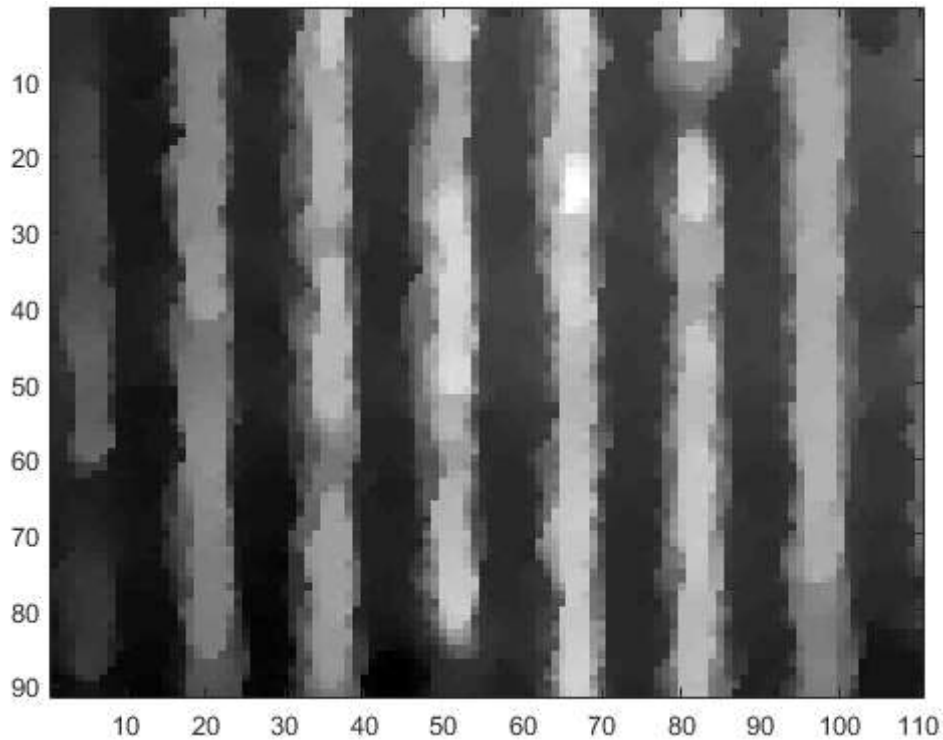
### *Prostorové rozlišení*

Abychom zjistili, jak velkého rozlišení je naše sestava schopna, byla jako vzorek využita mřížka prostorovou periodou  $d = 60 \mu m$ . Výsledný rekonstruovaný obraz mřížky můžeme vidět na obrázku 23.

Obrázek 23 ukazuje 7 pruhů mřížky na 110 pixelech rozlišení. Přimo z obrázku jsou jasně rozeznatelné detaily velikosti  $30 \mu m$  (šířka pruhu) i přesto, že rekonstrukční algoritmus může mít problémy se scénou s vysokou totální variací, kterou snímek mřížky je (viz lineární závislost náročnosti měření na  $K$  v rovnici (9)). Ze zkušenosti víme, že rekonstrukční algoritmus je schopen rozlišit objekty zaujímající 3 pixely, což v tomto případě lze přepočíst na rozlišovací schopnost cca  $12 \mu m$ .



**Obrázek 22: Postup při korekci na pozadí. Od originálního obrazu je odečteno pozadí. Výsledek je ve větším detailu zobrazen dole.**



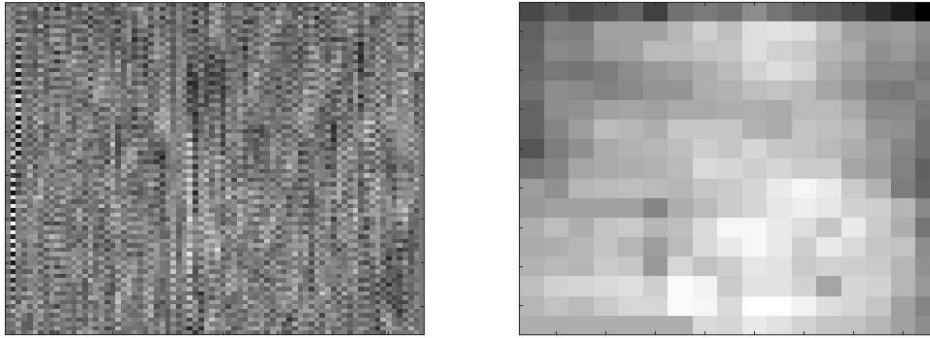
**Obrázek 23: Výřez záznamu mřížky s prostorovou periodou  $d = 60 \mu\text{m}$ .**

### *Srovnání s rastrovací metodou*

Jak bylo uvedeno v kap. 1, komprimované snímání zahrnuje nezanedbatelnou škálu výhod, které mohou v mnohých aplikacích vyvážit určitou míru ztráty informace. Úvodní teorie však vychází z předpokladu ideálního signálu. Pokud ale neuvažujeme o měřeném signálu jako o ideálním, ale připustíme existenci nezanedbatelné hladiny šumu, poskytuje CS další, v našich očích velmi zásadní výhodu.

Uvažujme elektronický šum o hodnotě  $\varepsilon$ . Pokud nyní chceme provádět měření, která mají velmi malý SNR, bude záznam velmi zkreslený hodnotami šumu, pokud navíc  $SNR \approx 1$ , nebude mít měření takřka žádnou vypovídající hodnotu.

Pokud teď provedeme měření za využití CS (v našem případě SPC), obdržíme jako výsledek lineární kombinaci jednotlivých diskrétních měření. Pokud je tedy měřený signál nebo obraz velmi komplexní, hladina CS měření bude velmi vysoká a poměr mezi signálem a šumem se razantně zlepší, protože snímáme intenzitu hned cca poloviny scény, na rozdíl od jediného pixelu v případě skenování. Takto prováděná měření tedy dokáží eliminovat vliv šumu na měření.



**Obrázek 24: Skenování obrazu. Vlevo – snímek s rozlišením 76 x 76, SNR je velmi nízký. Vpravo – snímek s rozlišením 17 x 17, skenovaná oblast už je dostatečně velká pro získání vypovídajícího signálu.**

Tento poznatek je velmi dobře ilustrován provedeným měřením, kdy jsme se snažili scénu 76 x 76 pixelů snímat postupně po jednotlivých pixelech. Na DMD byly nahrávány masky obsahující vždy jeden konkrétní světlý pixel, zbytek DMD byl ponechán tmavý. Cílem bylo nasnímat pro každý pixel zvlášť hodnotu intenzity a celou scénu tak zobrazit pomocí klasického skenování obrazu. Měřená hodnota intenzity ale byla zcela znehodnocena elektronickým šumem a náhodnými fluktuacemi záznamového zařízení. Protože jsme používali časovou periodu promítání sekvenčního snímku  $T = 0,01$  s, dostává navíc rekonstruovaný signál vzhled šachovnice, protože se do měření napětí promítá frekvence rozvodné sítě  $f = 50$  Hz. Výsledný snímek je vyobrazen na obr. 31 vlevo. Postupně jsme pak zvětšovali rozměry pixelu až do doby, kdy měření začalo vykazovat hodnoty alespoň přibližně odpovídající očekávání. Pro záznam obrázku 24 vpravo bylo použito 17 x 17 pixelů oproti původní požadované hodnotě rozlišení 76 x 76 a muselo tak dojít k cca 20násobnému zvětšení měřícího signálu.

### ***Příčiny zvyšování hladiny šumu***

Šum při měření je jedním z hlavních důvodů ke zvyšování snímacího podílu, který chceme udržet naopak co možná nejnižší, z důvodu co nejmenší datové náročnosti měření. Pravdou také je, že je-li SNR příliš nízké, bude se snižovat spolehlivost rekonstrukčního algoritmu. K tomu dochází právě z důvodu zvyšování nutného počtu měření, což má za následek zvyšování vzájemné koherence testovacích funkcí a zhoršování RIP měřících matic (rovnice (5), (6), (7)). Je tedy velmi důležité snažit se udržet hladiny šumu co možná nejnižší.

Jedním ze zdrojů šumu je elektronický bílý šum balanční fotodiody. Jednou z možností, jak s takto vzniklým bílým šumem bojovat, je zvyšování počtu měření dané



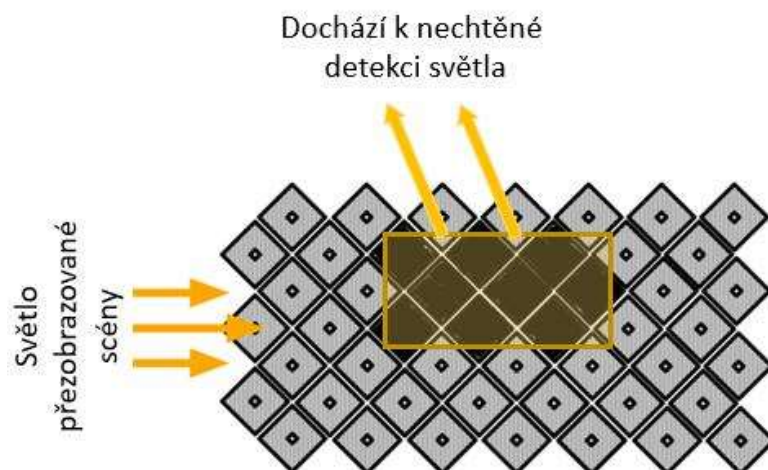
intenzitní úrovně. Abychom tedy minimalizovali vliv bílého šumu, bylo při každém snímání hladiny intenzity dané masky získáno cca 100 hodnot napětí. Podařilo se nám tak snížit předpokládanou chybu přibližně 10x, protože pro závislost nejistoty měření na počtu měření platí:

$$\sigma \approx \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Tímto přístupem se nám podařilo dosáhnout cílové hodnoty relativní velikosti šumu  $\sigma \leq 0,02$ .

Dalším faktorem ovlivňujícím poměr signálu a šumu je rozlišovací schopnost senzoru. Od fotodiody vyžadujeme, aby byla schopna měřit intenzitu celé tmavé masky (všechny pixely hodnoty -1), zároveň musí její rozsah zahrnovat měření celé světlé masky (všechny pixely hodnoty 1) a přitom požadujeme, aby byla co nejcitlivější na fluktuace hodnoty několika málo pixelů masky. Balanční germaniová fotodioda od firmy Newport™ však poskytuje dostatečný dynamický rozsah měření, a proto můžeme takto vzniklou chybu zanedbat.

Posledním diskutovaným zdrojem pro chyby měření je kosočtverečné uspořádání zrcátek v poli DMD. Vliv této chyby se zvyšuje úměrně s rozlišením, protože stoupá poměr krajních zrcátek zobrazovaného pixelu masky k zrcátkům vnitřním. Toto je dobře ilustrované na obrázku 25, kde osvětlující obdélník má stejnou plochu jako zobrazovací tmavý pixel masky. Naším požadavkem je, aby obdélník scény zobrazený na tmavý pixel masky neprodukoval žádný odražený signál, ale plochy okolních světlých pixelů masky část signálu detekují.



**Obrázek 25: Chyba měření způsobená kosočtverečnou sítí DMD, kraje pixelu částečně světlo odrážejí. Pixel masky zabírá 3 x 3 pixelu na DMD (úprava originálu z [43]).**

V případě nejmenějšího námi využitého rozlišení  $114 \times 152$  má jeden zobrazovaný pixel masky rozlišení  $6 \times 4$  pixelu DMD. V takovém případě odhadujeme maximální odchylku měřeného signálu pixelu na  $\delta p = 8 \%$  a takto způsobenou odchylku signálu na  $\sigma \leq 2 \%$ .

### 5.3. Použití spektrometru jako jednopixelového detektoru

---

V předchozích aplikacích jsme jako jednopixelovou kameru využívali výhradně fotodiodu. Jako jednopixelový senzor ale může stejně dobře sloužit jakýkoliv detektor typu sondy. Rozhodli jsme se proto využít jako senzoru optického vlákna, které může být přivedeno na různorodé typy měřicích zařízení. V následujícím experimentu využívajícím DMD LightCrafteru bylo optické vlákno použito pro přivedení signálu na spektroskop.

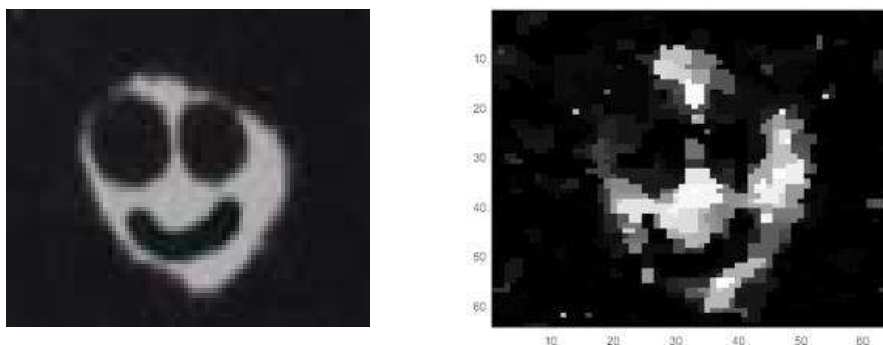
#### *Experimentální uspořádání*

Bylo zachováno osvětlení scény pomocí klasické halogenové zářivky. Na zářivku bylo opět laditelným zdrojem přivedeno napětí o vhodné velikosti (cca 14 V). Tentokrát byl odraz scény modulovaný DMD zachycen na bílý papír fungující jako rozptylující difuzor. Výsledný obraz byl snímán optickým vláknem, ze kterého byl signál následně přiváděn na spektroskop Flame (FLAME-T-XR1-ES, rozsah 200–1025 nm) od firmy Ocean Optics. Díky tomuto přístupu jsme nyní byli schopni dané masce přiřadit namísto skaláru intenzity vektor odražených intenzit v závislosti na vlnové délce. To je velmi výhodné, protože nám to umožňuje rekonstruovat obraz jen v daném rozmezí vybraných vlnových délek. Navíc při uložení záznamu z celého rozsahu spektrometru je možné zpětně měnit požadovaný rozsah vlnových délek pro rekonstrukci při využití shodných, již zaznamenaných dat. Při hledání vhodné šířky rozsahu vlnových délek bylo potřeba brát v potaz hladinu šumu. Empiricky jsme stanovili minimální rozsah vlnových délek pro spolehlivou rekonstrukci na  $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$ .

#### *Rekonstruované scény ve viditelné oblasti*

Příklad rekonstrukce jednoho spektrálního obrazu je na obrázku 26. Tímto měřením je ale získána kompletní hyperspektrální datakrychle. V každém bodě obrazu tedy máme dostupné i spektrum zaznamenaného světla.

Z měřených dat jsme zjistili, že při vhodné volbě expozičního času spektrometru lze využít zpoždění nahrávání vzoru na DMD, a spektrometrem tak snímat vždy intenzitu odrazu předcházející masky. To nám umožnilo značně urychlit čas záznamu a práce se zařízením se tak velmi zefektivnila.

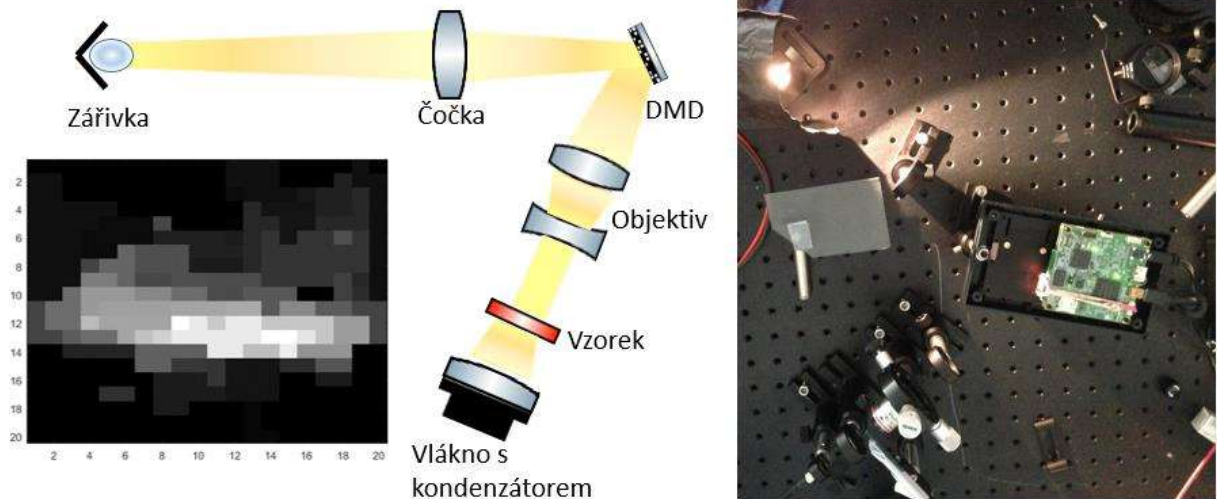


**Obrázek 26: Porovnání kvality záznamu spektroskopem. Vlevo – originální scéna. Vpravo – záznam spektroskopem Flame (700–720 nm).**

### *Rekonstruované scény v blízké IR oblasti*

Dalším krokem v oblasti aplikace DMD pro spektroskopii bylo využít spektroskopu pro měření vnitřních struktur vzorku propustného v blízké infračervené oblasti, podobně jako v kap. 5.2. Za tímto účelem jsme použili spektrometr NIRQuest256-2.5 taktéž od firmy Ocean Optics.

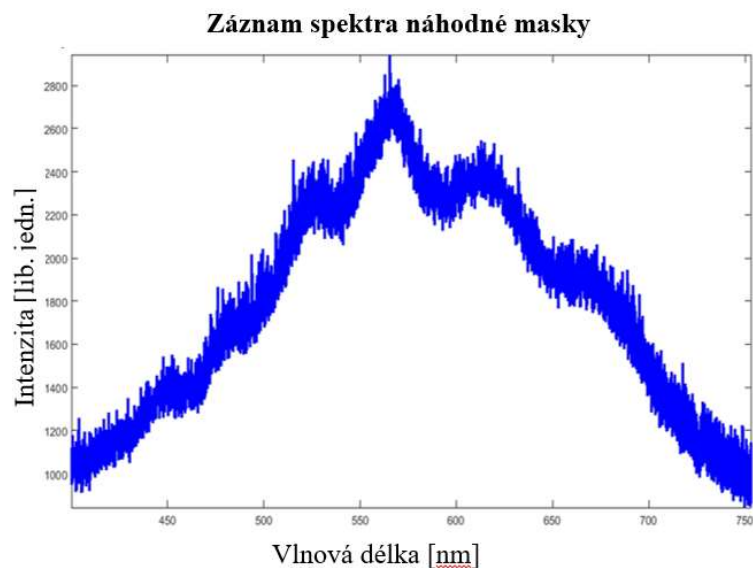
Tento návrh sestavy je velmi podobný sestavě předchozí, ale proces záznamu se mírně liší. V blízké infračervené oblasti se již značně projevuje tepelný šum na měřicích diodách spektroskopu, a bylo proto nutné změnit aparaturu a měřit intenzitu přímo bez využití odrazu od difuzního papírku kvůli zvýšení odstupu signálu od šumu. Foto a schéma konfigurace je na obrázku 26. Nová konfigurace ale skýtá zásadní problém. V tomto případě se totiž začíná projevovat silná barevná disperze. Ta je způsobena nízkými rozměry jednotlivých zrcátek ( $< 10 \mu m$ ), kvůli nimž pak pole zrcátek funguje částečně jako disperzní mřížka. To má za následek silnou směrovost barevných složek světla, které se tak nadále nešíří rovnoběžně. Optické vlákno, které sbírá světlo pro infračervený spektroskop, je zakončeno kondenzátorem, který je navržen tak, aby rovinné vlnoplochy směřoval do sběrného optického vlákna. V našem případě ale nejsme schopni snímat celé rozbíhavé spektrum masky. To má za následek, že do vlákna správně vstupoval jen výsek scény, který byl správně polohován vzhledem k natočení hlavice kondenzátoru. Při natáčení hlavice s kondenzátorem navíc docházelo k selekci daných vlnových délek, které bude celé zařízení snímat, jako důsledek změny délky optické dráhy. Vhodný signál tak pocházel pouze ze středu scény, kdy rozbíhavost barev byla nejnižší, zatímco krajní části scény se do vlákna nezobrazily. Rekonstrukce pak byla spolehlivá právě jen pro centrální část obrazu a zbytek se jevil, jako by byl v zákrytu. Neždařilá rekonstrukce na obrázku 27 je provedena pro  $\Delta\lambda = 150 \text{ nm}$ .



**Obrázek 27: Experiment se spektroskopem v IR. Vlevo – schéma měřicí soustavy a příklad nezdařené rekonstrukce. Vpravo – foto měřicí soustavy.**

Další návrh se spoléhal na využití difuzoru na průchod, který rozmazává každý bod dopadajícího světla. V dostatečné vzdálenosti za difuzorem pak dojde k promísení všech bodů scény, což umožňuje rovnoměrnější záznam bez nutnosti využití kondenzátoru. Protože vlákno je však velmi směrově citlivé, stále zůstává zachována vlastnost, kdy signál pro rekonstrukci pochází vždy jen z dané úzké části světelného spektra.

Nejmarkantnějším zdrojem šumu u měření se spektroskopem byl šum CCD detektoru uvnitř spektroskopu. Tento šum se projevoval velmi výrazně a takřka znemožňoval dosáhnout spolehlivé rekonstrukce pro nízké intenzity světla. Pro ilustraci je příklad záznamu detektoru s vysokým šumem vyobrazen na obrázku 28.



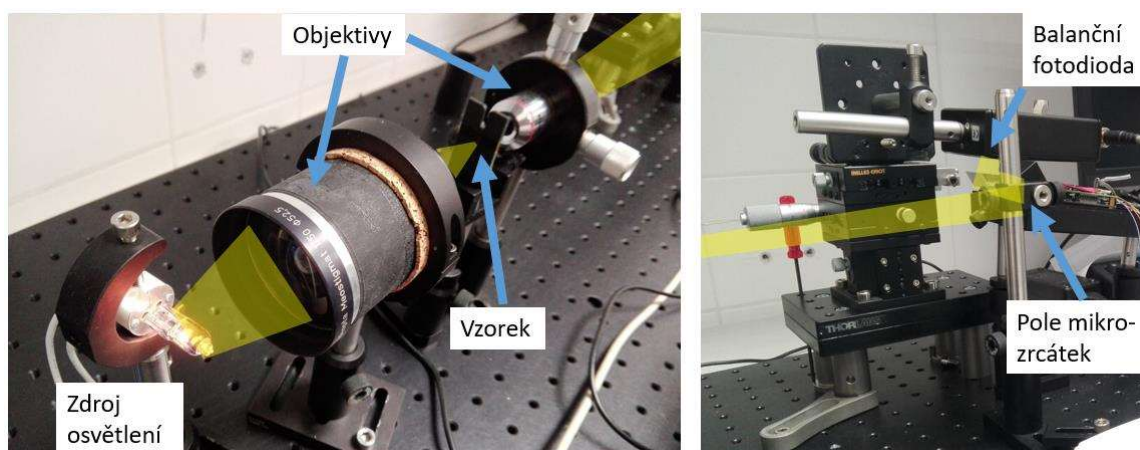
**Obrázek 28: Záznam spektra procházejícího difusorem. Vysoká hladina šumu znemožňuje přesnou rekonstrukci.**

## 5.4. Aspekty spojené s využitím DMD pro měření

### *Konfigurace pro měření*

Nejzásadnější věc, kterou bylo třeba se v této aplikaci zabývat, byla nutnost záznamu co nejvyššího množství odraženého světla. Jak bylo ukázáno v kap. 2, velikost náhodného šumu v porovnání s užitným signálem značně ovlivňuje nutný počet vzorků, kterého je potřeba dosáhnout v zájmu spolehlivé rekonstrukce. Naším cílem bylo dosáhnout hranice, kdy relativní velikost šumu nepřesahuje 10 % průměrné odchylky měřeného signálu, což umožňuje udržet snímací podíl na hodnotě  $< 10\%$ . V případě použití klasické fotodiody pro viditelnou část spektra nastává jen málokdy problém s udržením šumu pod touto hranicí. V konfiguraci s IR spektroskopem ale měření probíhalo v oblasti blízké infračervené části spektra, kde se již poměrně značně může projevovat tepelný šum, a proto byla sestava navržena tak, aby dokázala na pole DMD zrcátek nasměrovat co nejvíce světla.

Nejprve jsme zkoušeli přezobrazovat osvětlenou scénu soustavou objektiv – čočka, což mělo zajistit fungování soustavy na principu klasického mikroskopu. Tento přístup byl žádaný nejen z toho důvodu, že nabízí jednoduchou reprezentaci systému v základních zobrazovacích rovnicích, nýbrž i z důvodu možnosti snadného porovnání zobrazovacích vlastností sestavy s klasickými mikroskopy pracujícími v infračervené oblasti světla, které mají totožnou konfiguraci (objektiv – okulár).



**Obrázek 29: Foto finální sestavy s fotodiódou. Vlevo – zdroj osvětlení je fokusován na vzorek a světlo je kolimováno směrem na DMD. Vpravo – světlo je modulováno polem mikro-zrcátek (DMD) a snímáno balanční fotodiódou.**

Pro osvětlování vzorků byla použita klasická halogenová zářivka, která sloužila jako demonstrace robustnosti metody, kdy kromě dostatečné intenzity není na zdroj kladen žádný speciální požadavek. Protože je však zářivka všesměrová a její světlo nebylo nijak usměrňováno či kolimováno, pro osvětlování vzorku nebyl v tomto sestavení zachycován dostatečný světelný výkon, který by byl přebrazen na pole DMD zrcátek a následně předáván fotodiodě. Protože se pohybujeme v blízké infračervené oblasti, je tento nedostatek intenzity důvodem značného poklesu odstupu signálu od šumu (SNR), a proto vede ke značnému navyšování požadovaného množství zaznamenávaných dat.

Rozhodli jsme se proto sestavu koncipovat tak, že objektivem fotoaparátu Meostigmat 1/50 od firmy Meopta bude sbíráno co možná největší množství světla z halogenové zářivky, které bude tímto objektivem fokusováno do velmi malého bodu. Do tohoto bodu pak mohou být vloženy vzorky, na které se koncentruje velmi vysoká intenzita světla. Druhý mikroskopový objektiv RMS4X od firmy Thorlabs pak slouží pro přebrazení světla prošlého vzorkem na DMD. Světlo je druhým objektivem do velké míry kolimováno a dochází tak k poměrně nízké ztrátě světelného výkonu. Snímek sestavy s naznačením vedení světla sestavou je na obrázku 29, schéma sestavy je na obrázku 19.

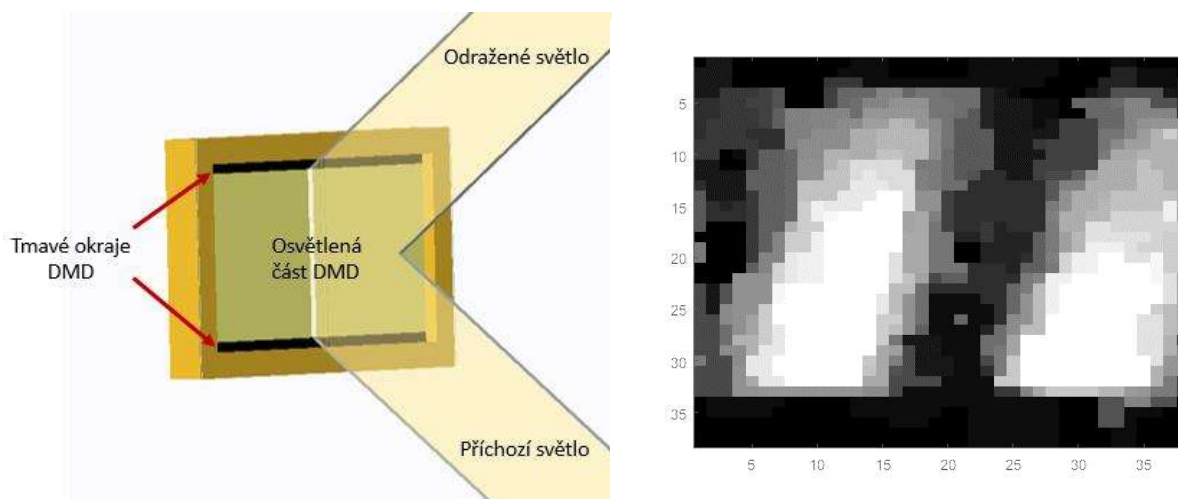
Tímto přístupem se nám podařilo snížit relativní velikost šumu záznamového zařízení na úroveň  $\epsilon < 0,1 \%$ , což je velmi dobrá úroveň umožňující záznam značně nižším počtem masek. Navíc je obraz sbírán z velmi malé oblasti, což umožňuje velmi vysoké zvětšení rekonstruovaného obrazu.

### ***Disperze***

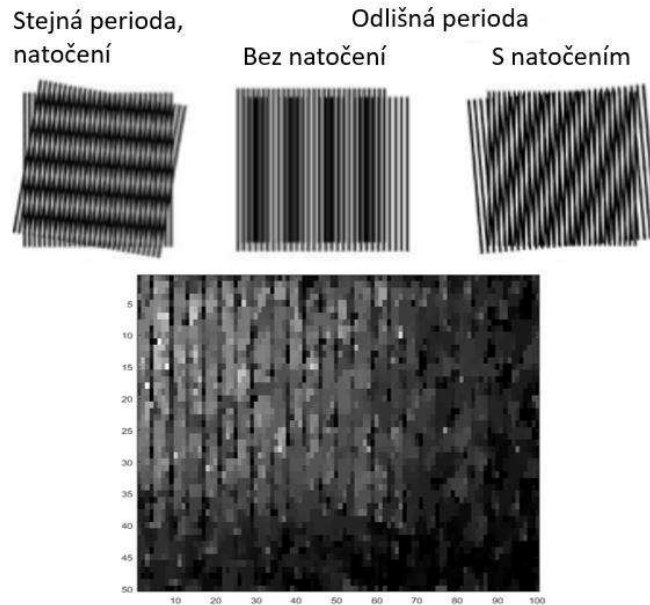
Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, hlavní výzvu při promítání masek pomocí DMD za využití vlastních zdrojů světla představovala kontrola nad směrovostí světelných složek. Vlivem disperze na vychýlených zrcátkách jako na mřížce docházelo ke spektrálnímu rozmývání, což představovalo problém při sběru světla záznamovým fotodetektorem. Existovala zde tedy pouze velmi omezená zóna, do které bylo potřeba umístit detektor, pokud mělo měření být zatíženo co nejnižší chybou. Z důvodu modulace zaznamenávaného obrazu náhodnou maskou pak bylo zapotřebí scénu na DMD vždy co nejlépe přebrazit. Následkem toho se rozbíhavost barevných složek modulovaného světla dále zvyšovala a bylo proto poměrně obtížné svazek nadále kontrolovat a zachovávat spektrum co možná nejvíce pohromadě.

Zejména z hlediska konstrukce aparatury s dvoupixelovou kamerou (využívající balanční fotodiody), kdy je snímán jak obraz maskou modulovaný, tak i obraz modulovaný maskou inverzní, vyvstal problém s uspořádáním komponent, tak aby bylo možné oba obrazy správně nasměřovat na čipy fotodiody. Zprvu byl odzkoušen přístup, kdy je DMD osvětlováno z boku pod úhlem cca 20°. V tomto případě byla ale disperze již tak silná, že nebylo možné se diodou dostatečně přiblížit, a byl tak snímán jen velmi úzký výřez dispergovaného světla.

V dalším postupu jsme se tak rozhodli osvětlovat DMD čip zdola. Tento přístup umožňoval snadné snímání celého odraženého signálu, avšak při prvních pokusech byl úhel osvětlování příliš velký. Pole mikrozrcátek je ještě překryto ochranným sklíčkem, které není na osvětlování zesponu pod úhlem uzpůsobeno, a jeho okraje tak částečně stínily světlu v přístupu k poli zrcátek. Tento jev je schematicky znázorněn na obrázku 30. Vertikální osvětlovací úhel tak musel být dostatečně malý, aby nedocházelo ke stínění čipu, a zároveň bylo potřeba fotodiodu umístit dostatečně blízko, aby obraz nebyl příliš dispergovaný. Pro závěrečný návrh sestavy komponent jsme se tedy rozhodli využít tenkého zrcátka, které oba rozbíhavé obrazy směřovalo na čipy balanční fotodiody umístěné ve vodorovné rovině nad celým zobrazovacím systémem.



**Obrázek 30: Osvětlení DMD „zesponu“. Vlevo – důvod vzniku pruhů u krajů rekonstrukce. Vpravo – měření se zaznamenanými pruhu na okrajích.**



**Obrázek 31: Moiré. Nahoře – příčiny vzniku moiré efektu [44]. Dole – Námí provedený záznam moiré vzoru.**

### *Moiré*

Jelikož je snímána pouze celková intenzita odražená od DMD, je velmi důležité, aby byly jednotlivé pixely náhodné masky stejně rozměrné. Každý takový pixel je tvořen určitou množinou zrcátek DMD. Protože chceme s daty zacházet co nejúsporněji a vytvářené masky proto mají pouze binární hodnoty 1/0, intenzita pixelu masky odpovídá přímo úměrně právě počtu zrcátek, kterými je tento pixel zobrazován. Pokud vycházíme z tohoto předpokladu, je nezbytné docílit toho, aby všechny pixely masky byly reprezentovány vždy stejným počtem zrcátek DMD čipu.

Protože dochází k binárnímu převzorkování rozlišení masky na rozlišení DMD čipu, lze o výsledném vzhledu maskou modulované scény uvažovat jako o dvakrát vzorkovaném obrazu se vždy odlišným konstantním rozestupem vzorků. Na tomto typu záznamu pak běžně dochází k tzv. moiré efektu (příklad na obrázku 31) [44], kdy se v signálu projevuje superpozice obou vzorkovacích frekvencí.

Vznikají pak tzv. záznejové signály, jejichž charakteristická prostorová frekvence pro rovnoběžné směry vzorů s prostorovou frekvencí  $f_1$  a  $f_2$  se řídí vztahem:

$$f_{beat} = |f_1 - f_2| \quad (20)$$

Tento předpoklad se ukázal jako správný. Pro obrázek 31 dole vychází záznejová frekvence  $f_{beat} = 100 - 76 = 24$  a skutečně na obrázku pozorujeme 24 proužků. Pokud tedy



rozlišení masek nebylo zvoleno vhodně, docházelo ke vzniku velmi intenzivních tmavších či světlejších proužků, které kvalitu rekonstruovaného obrazu velmi výrazně ovlivňovaly. Tyto proužky tak byly projevem právě moiré efektu.

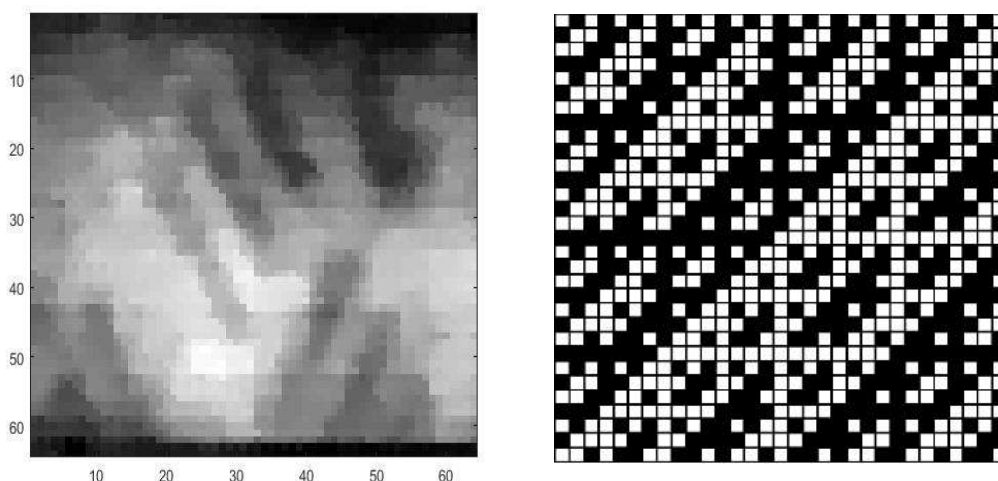
Za účelem nalezení vhodného rozlišení masek jsme tedy vycházeli z nativního rozlišení čipu DMD, které je 684 x 608 zrcátek. Je vhodné provést rozklad těchto čísel na prvočinitele:

$$684 = 19 * 2^2 * 3^2, \quad 608 = 19 * 2^5$$

Protože číslo 19 v prvočíselném rozkladu značně omezuje množinu možných kombinací, jen málo rozměrů rozlišení masky zamezuje vzniku moiré efektu, přičemž zároveň umožňuje snímat obraz v přiměřené kvalitě rozlišení.

Jako nejvhodnější se jeví využít rozlišení masky  $76 \times 76 = 19 * 2^2 \times 19 * 2^2$ . Pro volbu tohoto rozlišení jako základního máme hned několik důvodů: 1) je splněna podmínka zamezující vzniku moiré proužků v rámci obrazu, 2) doba záznamu je přiměřeně dlouhá (10 % snímacího podílu odpovídá cca 600 záznamům), 3) rozlišení je dostatečné pro základní orientaci ve snímku.

Dalšími využívanými rozlišeními byly:  $38 \times 38$  pixelů v případech, kdy bylo zapotřebí vytvoření kontrolního záznamu a  $114 \times 152$  pixelů pro tvorbu velmi kvalitních snímků.



**Obrázek 32: Měření S-maticemi. Vpravo – příklad měřicí S-matice 32 x 32. Vlevo – rekonstrukce získaná z měření se snímacím podílem 70 %.**

## Využití S-matic

Protože jedním z obecných požadavků na měřicí matice je jejich nízká koherence, pokoušeli jsme se pro měření využít tzv. S-matic. Tyto matice vznikají z Hadamardových matic vynecháním prvního řádku a sloupce (prezentovány na obrázku 32). Hadamardovy matice rozměru  $2^n$  mohou být vygenerovány za využití následujícího rekurzivního předpisu:

$$H_1 = [1], \quad H_{2^k} = \begin{bmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{bmatrix} \quad \text{pro } k \in \mathbb{N} \quad (21)$$

U Hadamardových matic platí, že libovolné dva sloupce či řádky mají mezi sebou minimální dosažitelnou hodnotu koherence, tedy vzájemná koherence definovaná rovnicí (8) dosahuje minimální hodnoty  $\mu(A) = \sqrt{\frac{N-M}{M(N-1)}}$ . Takto vytvořené S-matice tedy teoreticky tvoří ideální testovací funkce. Snímání náhodnými binárními maticemi sice přináší poměrně přesný záznam, předpokládali jsme ale, že při využití S-matic, které nabízejí lepší měřicí vlastnosti (viz kap. 1), by mělo dojít k dalšímu zpřesnění rekonstrukce. Jak je ale patrné na obrázku 31, tento postup zlepšení výsledků nepřinesl. Důvodem může být to, že S-matice nejsou vhodným prostředkem pro snímání v případě, kdy je k rekonstrukci využita minimalizace totální variace.

## 5.5. Řešení technických problémů spojených s použitím DLP

---

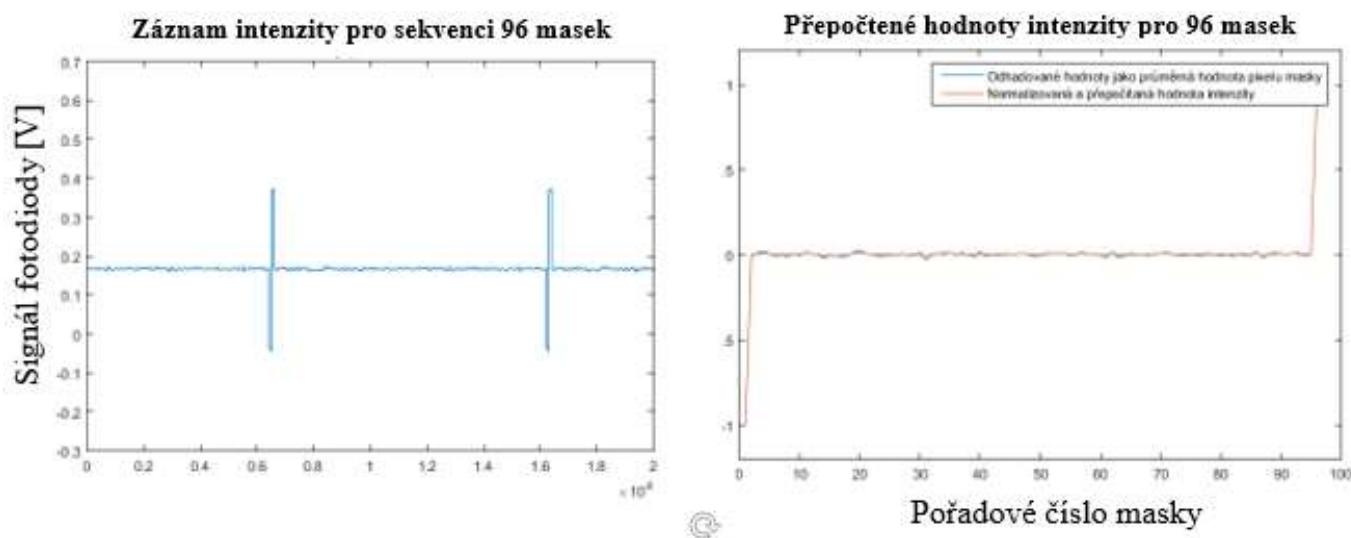
### *Mód sekvenčního zobrazování uložených vzorů*

LightCrafter v klasickém 8bitovém režimu umožňuje do paměti sekvenčního režimu nahrát až 12 uživatelem definovaných vzorů. K přenosu dat na LightCrafter slouží protokol TCP/IP4, jehož přenosová rychlost ale není příliš vysoká. LightCrafter sice nabízí možnost definovat vlastní rozlišení odesílaného obrazu, přičemž mikročip je schopen zvolené rozlišení vhodně přepočítat, tato možnost je však dostupná pouze v obrazovém, nikoli sekvenčním módu. V důsledku toho představuje 12 vytvořených masek poměrně velké množství dat, které je odesíláno po dobu cca 7 sekund, což neumožňuje dostatečně rychlý záznam.

Modul LightCrafter ale v módu sekvenčního zobrazování uložených vzorů umožňuje nahrávat 1bitové verze vzorů, přičemž takto jich může být do paměti uloženo až 96. Tento přístup tak poskytuje prostor pro zvýšení rychlosti záznamu až o řád v porovnání s promítáním jednotlivých vzorů.

Jako obvykle však i tento přístup zahrnuje určitá úskalí, která je nutno rozpoznat a vzít v potaz. Prvním nedostatkem je reprezentace masek v 1bitovém rozsahu, což může vést ke zvýšení moiré efektu. Dalším nedostatkem je opět časově špatně definovatelná prodleva při komunikaci. Příkaz pro spuštění sekvence totiž opět přichází na mikročip s nedefinovaným zpožděním, což nám znemožňuje přesně kontrolovat časový sled promítaných vzorů. Mód sekvenčního promítání poskytuje možnost cyklicky opakovat promítané vzory, avšak ze zaznamenaných intenzitních dat není přímo možné určit, které masce přísluší vybraná hodnota intenzity.

Tomuto problému jsme se rozhodli čelit začleněním značících vzorů mezi promítané masky. Jako první vzor tak byla na DMD zobrazena temná obrazovka a posledním vzorem byla plně rozsvícená obrazovka. Po odeslání příkazu pro spuštění sekvence byl tedy spuštěn záznam intenzity světla pomocí balanční diody po určitý časový úsek, který byl dostatečně dlouhý, aby zaručeně zahrnoval celou sekvenci 96 promítaných vzorů. Ze získaných dat pak bylo nutné vhodným algoritmem vybrat úsek, který odpovídá právě 96 záznamům intenzity, tak aby první hodnota byla ta nejmenší naměřená (odpovídá temné obrazovce) a poslední hodnota ta největší naměřená (odpovídá plně rozsvícené obrazovce). Pro záznam se pak uchovávala pouze data mezi těmito značkami a jim odpovídající množina 94 masek. Postup je znázorněn na obrázku 33.

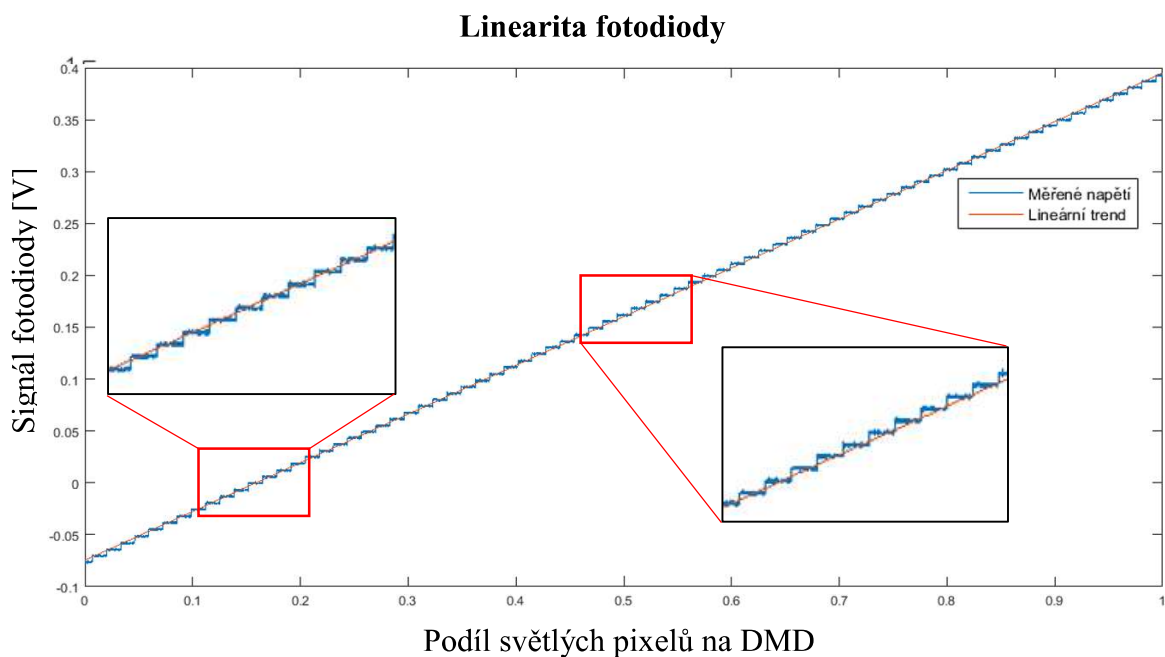


**Obrázek 33: rozpoznávání sekvence. Vlevo - příklad záznamu napětí na balanční fotodiodě obsahující zaručeně celou sekvenci. Vpravo - výběr sekvence a rozdělení na 96 hodnot odpovídajícím 96 maskám (odhad – modře, měřená data – červeně).**

Celý záznam tedy probíhal tak, že z diody byl vyčítán signál frekvencí odpovídající cca stonásobku frekvence změny masky. V zaznamenaných datech dané sekvence byly nalezeny vysoce nadprůměrné a podprůměrné hodnoty. Tím byla definována perioda měřené sekvence, počátek a konec sekvence. Ohraničená sekvence pak byla rozdělena na 96 dílů a na každém dílu bylo zprůměrováno několik bodů záznamu napětí z fotodiody. Navržený přístup nám tedy umožnil značně urychlit záznam a tím pádem zpřístupnil zobrazování ve značně vyšších rozlišeních při současném zachování přijatelné časové náročnosti.

### ***Lineární odezva balanční fotodiody***

Další výhodou zapojení dvou referenčních vzorů na začátku a na konci každé sekvence 96 vzorů byla možnost určit škálu měřeného užitečného signálu, kdy vzoru s minimální intenzitou byla přiřazena hodnota -1 a vzoru s maximální intenzitou hodnota 1. Zbylý signál pak byl rozložen kolem hodnoty 0, přičemž však toto rozložení nebylo rovnoměrné s průměrem 0, jak by se dalo očekávat. Domnívali jsme se proto, že odezva balanční diody není lineární v závislosti na příchozí intenzitě. Provedli jsme tedy měření, kdy byly na DMD promítány vzory s rovnoměrně se zvyšující hladinou intenzity, a jak se ukázalo, odezva diody skutečně lineární není. Záznam odezvy balanční fotodiody a její odchylka od lineární funkce jsou patrné na obrázku 34.



**Obrázek 34: Kontrola linearity balanční fotodiody. Ve výřezech detailů je vidět, že dioda se odchyľuje od lineárního trendu (zobrazen červeně).**

Zprvu jsme zkoušeli od záznamu každé sady masek odečíst její průměr. Tím jsme chtěli dosáhnout kompenzace vady způsobené nelineárností diody. Tento přístup ale nebyl zcela vhodný z toho důvodu, že náhodná sada 94 měření v našem novém uspořádání ani zdaleka nezaručuje, že průměrná hodnota přeškálovaných intenzit bude 0. My však každou takovou sadu odečítáním průměru uměle upravujeme, tak aby právě toto platilo. Pokud si nyní představíme, že takovýchto sad měříme větší množství a že každá taková sada získává díky našemu odečtu průměru uměle posun oproti všem ostatním, je patrné, že to bude mít zásadní vliv na schopnost rekonstruovat zaznamenávanou scénu.

Tento problém jsme se tedy rozhodli řešit tak, že jako třetí vzor z každé sady bude zobrazen vzor inverzní ke vzoru druhému. Pokud dané hodnoty sečteme, obdržíme dvojnásobek konstantního „offsetu“ dané sady. Polovina této hodnoty je tedy následně od intenzitního vektoru sady odečtena a my tím máme zajištěno jak to, že prvky vektoru intenzit jsou správně korigovány na nelinearitu odezvy fotodiody, tak i to, že na sebe jednotlivé sady velmi dobře navazují a nejsou vůči sobě posunuty.

### ***Algoritmus sloužící pro komunikaci s DLP LightCrafterem***

Zásadním úkolem umožňujícím práci s DLP LightCrafterem bylo vytvořit knihovnu funkcí, kterými by bylo možné chování LightCrafteru kontrolovat z prostředí Matlab a které by umožňovaly co nejlépe využít všech dostupných možností zobrazení. Při tvorbě těchto funkcí jsme vycházeli z knihovny vytvořené [39] a z návodu na tvorbu ovládacích funkcí publikovaného výrobcem LightCrafteru [40]. Povedlo se nám vytvořit funkce pro kontrolu LightCrafteru v sekvenčním módu, k čemuž jsme využili odposlechu TCP-IP komunikace se zařízením prostřednictvím freeware Wireshark. Funkce pro ovládání LightCrafteru jsou k dispozici na CD, jež je přiloženo k této práci.

## Závěr

---

V rámci diplomové práce se nám podařilo popsat některé základní principy teorie komprimovaného snímání. V úvodu je komprimované snímání navrženo jako vhodnější alternativa klasického záznamu objemných datových celků. Přitom je naznačeno, jak komprimované snímání vychází z klasické teorie záznamu signálu, a proč je přechod k měření s využitím CS logickým krokem vedoucím ke zlepšení výkonnosti měřicích prostředků. Dále je uveden přístup, jak metody komprimovaného snímání převést do praxe za využití vybraných algoritmů umožňujících znovuobnovení původních datových celků z komprimovaných dat.

V další části práce je pak těchto myšlenek využito pro zavedení měřicí metody jednopixelové kamery. Zprvu jsme se zabírali rozborem rekonstrukčního algoritmu, kdy jsme zkoušeli jeho spolehlivost a robustnost. Je zde také zmiňována fotodioda jako ideální detektor využitelný pro metodu SPC a jsou stanoveny podmínky kvality signálu, kterých je potřeba dosáhnout s ohledem na funkčnost celé metody.

První experimentální úloha se zabývá tou nejjednodušší možnou měřicí soustavou, která velmi dobře demonstruje robustnost metody SPC a zároveň přináší první praktické poznatky o reálných měřeních tímto nástrojem. Jsou zde diskutovány nedostatky této jednoduché měřicí metody a v závěru je prezentován alternativní přístup k získávání dat za využití optického přerušovače, který nedostatky částečně kompenzuje.

Další experiment se pak zabývá aplikací SPC v blízké infračervené oblasti, kdy je využito vlastnosti nízké koherence sloupců náhodné matice. Pro záznam je tentokrát využita pevná náhodná maska, po které je postupně skenováno osvětlovací aparaturou. Výhody této sestavy tkví především ve volnosti při výběru zdroje osvětlení, což dovoluje tento typ sestavy aplikovat v široké škále spektrálních oblastí a ve vysoké variabilitě možných rozměrů náhodné masky.

Závěrečný a nejrozsáhlejší experiment využívá DLP LightCrafter jako zdroj náhodných masek pro měření. V rámci kapitoly je velmi dopodrobna popsána aplikace LightCrafteru s balanční fotodiódou. Toto uspořádání je nazváno dvoupixelová kamera. Kapitola obsahuje několik speciálních návodů pro zvýšení kvality záznamu a doporučení, jež se týkají technické stránky tvorby sestav s LightCrafterem. Kapitola dále obsahuje měření za využití spektroskopu, které však nepřineslo výsledky porovnatelné s měřením fotodiódou.

V závěru kapitoly jsou popsány nedostatky měření s využitím LightCrafteru, jako jsou silná disperze DMD zrcátek nebo problémy v komunikaci se zařízením, a je uveden základní postup, který vedl k tvorbě ovládacích algoritmů pro kontrolu DMD čipu.

Nově navržené metody jsou velmi dobře uplatnitelné v případech, kdy tvorba klasického záznamového zařízení je velmi nákladná či dokonce fyzikálně neproveditelná. Naším záměrem bylo postupovat od principiálně nejjednoduššího možného záznamového systému až po značně komplikovanější zobrazovací přístupy, které slibují mnoho zajímavých aplikačních možností. Návrhy měřicích aparatur byly vždy detailně konzultovány s vedoucím práce, avšak jejich tvorba, jakožto i algoritmy ovládající celou aparaturu a zprostředkovávající záznam, je dílem autora práce.

## REFERENCE

---

- [1] K. T. Block, M. Uecker, a J. Frahm, „Undersampled radial MRI with multiple coils. Iterative image reconstruction using a total variation constraint", *Magnetic Resonance in Medicine*, roč. 57, č. 6, s. 1086–1098, čer. 2007.
- [2] P. Binev, W. Dahmen, R. DeVore, P. Lamby, D. Savu, a R. Sharpley, „Compressed sensing and electron microscopy", in *Modeling Nanoscale Imaging in Electron Microscopy*, Springer, 2012, s. 73–126.
- [3] J. Wright, A. Y. Yang, A. Ganesh, S. S. Sastry, a Y. Ma, „Robust Face Recognition via Sparse Representation", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, roč. 31, č. 2, s. 210–227, úno. 2009.
- [4] F. J. Herrmann, „Seismology meets compressive sampling", 2007.
- [5] A. J. Jerri, „The Shannon sampling theorem #8212;Its various extensions and applications: A tutorial review", *Proceedings of the IEEE*, roč. 65, č. 11, s. 1565–1596, lis. 1977.
- [6] J. K. Hawkins, „Image Processing Principles and Techniques", in *Advances in Information Systems Science*, Springer, Boston, MA, 1970, s. 113–214.
- [7] *Academic Press Library in Signal Processing: Image, Video Processing and Analysis, Hardware, Audio, Acoustic and Speech Processing*. Academic Press, 2013.
- [8] D. L. Donoho, „Compressed sensing", *IEEE Transactions on Information Theory*, roč. 52, č. 4, s. 1289–1306, dub. 2006.
- [9] R. G. Baraniuk, „Compressive Sensing [Lecture Notes]", *IEEE Signal Processing Magazine*, roč. 24, č. 4, s. 118–121, čvc. 2007.
- [10] M. F. Duarte *et al.*, „Single-pixel imaging via compressive sampling", *IEEE Signal Processing Magazine*, roč. 25, č. 2, s. 83–91, bře. 2008.
- [11] B. E. Usevitch, „A tutorial on modern lossy wavelet image compression: foundations of JPEG 2000", *IEEE Signal Processing Magazine*, roč. 18, č. 5, s. 22–35, zář. 2001.
- [12] M. Fornasier, *Theoretical Foundations and Numerical Methods for Sparse Recovery*. Walter de Gruyter, 2010.
- [13] E. J. Candes a M. B. Wakin, „An Introduction To Compressive Sampling", *IEEE Signal Processing Magazine*, roč. 25, č. 2, s. 21–30, bře. 2008.
- [14] A. Stern, *Optical Compressive Imaging*. CRC Press, 2016.
- [15] G. T. Herman, A. Lent, a P. H. Lutz, „Relaxation Methods for Image Reconstruction", *Commun. ACM*, roč. 21, č. 2, s. 152–158, úno. 1978.
- [16] S. Foucart a M.-J. Lai, „Sparsest solutions of underdetermined linear systems via  $\ell_q$ -minimization for  $0 < q \leq 1$ ", *Applied and Computational Harmonic Analysis*, roč. 26, č. 3, s. 395–407, 2009.



- [17] E. J. Candès a Y. Plan, „Near-ideal model selection by  $\ell_1$  minimization", *The Annals of Statistics*, roč. 37, č. 5A, s. 2145–2177, 2009.
- [18] R. Obermeier a J. A. Martinez-Lorenzo, „Sensing Matrix Design via Mutual Coherence Minimization for Electromagnetic Compressive Imaging Applications", *IEEE Transactions on Computational Imaging*, roč. 3, č. 2, s. 217–229, čer. 2017.
- [19] T. T. Cai a T. Jiang, „Limiting laws of coherence of random matrices with applications to testing covariance structure and construction of compressed sensing matrices", *Ann. Statist.*, roč. 39, č. 3, s. 1496–1525, čer. 2011.
- [20] T. L. N. Nguyen a Y. Shin, „Deterministic Sensing Matrices in Compressive Sensing: A Survey", *ScientificWorldJournal*, roč. 2013, lis. 2013.
- [21] „cam14-01.pdf". .
- [22] S. Chen, D. Donoho, a M. Saunders, „Atomic Decomposition by Basis Pursuit", *SIAM Rev.*, roč. 43, č. 1, s. 129–159, led. 2001.
- [23] I. Daubechies, R. DeVore, M. Fornasier, a C. S. Güntürk, „Iteratively reweighted least squares minimization for sparse recovery", *Communications on Pure and Applied Mathematics*, roč. 63, č. 1, s. 1–38, led. 2010.
- [24] Y. Li a S. Osher, „Coordinate descent optimization for  $\ell_1$  minimization with application to compressed sensing; a greedy algorithm", *Inverse Problems and Imaging*, roč. 3, č. 3, s. 487–503, 2009.
- [25] J. A. Tropp a A. C. Gilbert, „Signal Recovery From Random Measurements Via Orthogonal Matching Pursuit", *IEEE Transactions on Information Theory*, roč. 53, č. 12, s. 4655–4666, pro. 2007.
- [26] F. Kraher, C. Kruschel, a M. Sandbichler, „Total Variation Minimization in Compressed Sensing", *arXiv:1704.02105 [cs, math]*, dub. 2017.
- [27] C. Li, W. Yin, H. Jiang, a Y. Zhang, „An efficient augmented Lagrangian method with applications to total variation minimization", *Comput Optim Appl*, roč. 56, č. 3, s. 507–530, pro. 2013.
- [28] O. Dobrucalı a B. Barshan, „Novel Compression Algorithm Based on Sparse Sampling of 3-D Laser Range Scans", *Computer Journal*, roč. 56, s. 852–870, čvc. 2013.
- [29] „FDS010-SpecSheet.pdf". .
- [30] „Light scanning device for scanning with a laser beam and an image forming apparatus for forming an image with a laser beam", 11-dub-1986.
- [31] „Thermal Imaging Cameras", *Infrared Camera Warehouse*. .
- [32] „An efficient algorithm for total variation regularization with applications to the single pixel camera and compressive sensing - ProQuest". [Online]. Dostupné z:

- <https://search.proquest.com/openview/8e121222c7242892ae1766ae72ce4dbd/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>. [Viděno: 07-kvě-2018].
- [33] C. Li, W. Yin, a Y. Zhang, „User's guide for TVAL3: TV minimization by augmented lagrangian and alternating direction algorithms", *CAAM report*, roč. 20, s. 46–47, 2009.
- [34] „dlpu006e.pdf". .
- [35] „Digital Light Processing Technology: DLP". [Online]. Dostupné z: [http://www.opli.net/Opli-old/magazine/eo/2011/news/dlp\\_tech.aspx](http://www.opli.net/Opli-old/magazine/eo/2011/news/dlp_tech.aspx). [Viděno: 07-kvě-2018].
- [36] „DLP4500: Which is the corresponding mirror on the DMD? - DLP LightCrafter 4500 Development Platform Forum - Advanced Light Control - TI E2E Community". [Online]. Dostupné z: [https://e2e.ti.com/support/dlp\\_\\_mems\\_micro-electro-mechanical\\_systems/advanced\\_light\\_control/f/924/p/672113/2475665](https://e2e.ti.com/support/dlp__mems_micro-electro-mechanical_systems/advanced_light_control/f/924/p/672113/2475665). [Viděno: 07-kvě-2018].
- [37] M. R. Douglass, „Lifetime Estimates and Unique Failure Mechanisms of the Digital Micromirror Device (DMD)", in *Annual Proc. IEEE Reliability Phys*, 1998, s. 9–16.
- [38] S. M. Lee, „CCD image sensor with photodiodes in a zig-zag pattern and particular transfer gate electrodes formed over channel stop regions and VCCD regions", pro-1993.
- [39] F. Lichttechnik, *TI-DLP-LightCrafter: MATLAB Framework for talking to TexasInstruments DLP LightCrafter*. 2018.
- [40] „dlpu007d.pdf". .
- [41] K. Žídek, O. Denk, J. Hlubuček, a J. Václavík, „Compact and robust hyperspectral camera based on compressed sensing", in *Optics and Measurement International Conference 2016*, 2016, roč. 10151, s. 101510N.
- [42] A. Musienko *et al.*, „Deep levels in high resistive CdTe and CdZnTe explored by photo-Hall effect and photoluminescence spectroscopy", *Semicond. Sci. Technol.*, roč. 32, č. 1, s. 015002, 2017.
- [43] „[Resolved] aspect ratio - DLP LightCrafter Development Platform Forum - Advanced Light Control - TI E2E Community". [Online]. Dostupné z: [https://e2e.ti.com/support/dlp\\_\\_mems\\_micro-electro-mechanical\\_systems/advanced\\_light\\_control/f/850/t/170877](https://e2e.ti.com/support/dlp__mems_micro-electro-mechanical_systems/advanced_light_control/f/850/t/170877). [Viděno: 07-kvě-2018].
- [44] D. Malacara, *Optical shop testing*, roč. 59. John Wiley & Sons, 2007.

## Obsah příloženého CD

---

- Text diplomové práce
  - Diplomová práce Ondřej Denk.pdf
  - zadani\_DP\_Ondrej\_Denk.doc
- Manuál k používání měřicích algoritmů.docx
- Měřicí algoritmy pro prostředí Matlab
  - A\_SPC\_Projector+DAQ.m
  - A\_acquireDAQcard.m
  - A\_deviate.m
  - A\_hlavička01.mat
  - A\_initDAQcard.m
  - B\_LightCrafter.m
  - B\_SPC\_DAQ\_INTVECTseq.m
  - B\_SPC\_DLPFlameControl.m
  - B\_SPC\_DLPSeqDAQControl.m
  - B\_SPC\_FlameRECON.m
  - B\_SPC\_Flame\_INTVECTseq.m
  - B\_SPC\_RECONONLYscript.m
  - B\_SPC\_RECONONLYseq.m
  - C\_O.bmp
  - C\_SPC\_ArtifDataMean.m
  - TVAL3
    - TVAL3.m
    - ftvcs\_al\_TVL2p.m
    - ftvcs\_al\_TVL2p\_old.m
    - ftvcs\_al\_opts.m
    - ftvcs\_alp.m
    - ftvcs\_alp\_old.m
    - readme.txt
- Data pro vzorové rekonstrukce
  - SPC\_Int\_BG(19.,20.3.)\_twoD, 152x114, 75x93, 20k.mat
  - SPC\_Int\_Grid60\_twoD, 152x114, 149x93, 20k.mat
  - SPC\_Int\_Includes\_twoD, 76x76, 42x93, 20k.mat
  - SPC\_Ptrn\_BG(19.,20.3.)\_twoD, 152x114, 75x93, 20k.mat
  - SPC\_Ptrn\_Grid60\_twoD, 152x114, 149x93, 20k.mat
  - SPC\_Ptrn\_Includes\_twoD, 76x76, 42x93, 20k.mat