



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra radioelektroniky

**Standardizované metody pro hodnocení obrazové kvality digitálních  
fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech**

**Standardized Methods for Image Quality Assessment of Digital  
Cameras Built into Mobile Phones**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. Karel Fliegel, Ph.D

**Adam Zizien**

---

**Praha 2017**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zizien** Jméno: **Adam** Osobní číslo: **434855**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**  
Studijní obor: **Multimediální technika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Standardizované metody pro hodnocení obrazové kvality digitálních fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech**

Název bakalářské práce anglicky:

**Standardized Methods for Image Quality Assessment of Digital Cameras Built into Mobile Phones**

Pokyny pro vypracování:

Popište standardizované metody pro měření obrazové kvality miniaturních digitálních fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech. Připravte a ověřte vybrané postupy formou laboratorních úloh. Ve vhodném prostředí implementujte výpočetní nástroje pro vyhodnocení těchto měření. Na vzorku přístrojů změřte vybrané charakteristiky fotoaparátů a navrhnete postup pro objektivní porovnání obrazové kvality měřených přístrojů a výsledky vyhodnoťte.

Seznam doporučené literatury:

- [1] IEEE Approved Draft Standard for Camera Phone Image Quality (CPIQ), P1858/D2, 2016.
- [2] Boreman, G. D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems, SPIE PRESS, 2001.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Karel Fliegel Ph.D., katedra radioelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **07.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.08.2018**

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 15. 5. 2017

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Karlu Fliegelovi, Ph.D za to, že byl vždy nápomocen k řešení problémů, které se při vypracování této práce objevovaly, i přes to, že měl velmi nabitý rozvrh. Dále bych chtěl poděkovat panu Xunyou Ge, Ph.D za to, že se mi snažil tolik pomoci při hledání testovacích obrazců. Nakonec děkuji přátelům a hlavně rodině za to, že mě po celou dobu studia podporovali, i když to se mnou určitě nebylo vždy lehké.

## **Abstrakt**

Cílem této bakalářské práce bylo vyhledat a nastudovat techniky použitelné k měření parametrů digitálních fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech, navrhnout a implementovat softwarové nástroje k jejich měření a na vybraném vzorku přístrojů metody ověřit. Tato práce se zejména zaměřuje na popis metod použitých ve standardu IEEE 1858-2016 (IEEE Standard for Camera Image Quality (CPIQ)), konkrétně v jeho druhém draftu.

## **Klíčová slova**

Hodnocení obrazové kvality, digitální fotoaparáty, mobilní telefony, CPIQ, Matlab

## **Abstract**

The goal of the project was to find and study techniques used for measuring parameters of digital integrated cameras in mobile phones, design and implement software tools for measuring above mentioned parameters and verify those methods on a selected number of samples. This work mainly focuses on the description of the methods used in IEEE Standard 1858-2016 (IEEE Standard for Camera Phone Image Quality (CPIQ)), specifically in its second draft.

## **Keywords**

Image quality assessment, digital cameras, mobile phones, CPIQ, Matlab

## Seznam zkratek

IEEE	-	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CPIQ	-	Camera Phone Image Quality
SFR	-	Spatial Frequency Response (Prostorová frekvenční charakteristika)
R	-	Red, červená barva
G	-	Green, zelená barva
B	-	Blue, modrá barva
MTF	-	Modulation Transfer Function (Modulační přenosová funkce)
CSF	-	Contrast Sensitivity Function (Funkce kontrastní citlivosti)
sRGB	-	Standardní barevný prostor RGB
CIE	-	Commission Internationale de l'Éclairage
XYZ	-	Jeden z barevných prostorů
VGA	-	Video Graphics Array
JND	-	Just Noticeable Difference (Právě pozorovatelný rozdíl)
LCD	-	Lateral Chromatic Displacement (Laterální barevná vada)
Lab	-	Jeden z barevných prostorů
LGD	-	Local Geometric Distortion (Geometrické zkreslení)
OECF	-	Opto-Electric Conversion Function
NPS	-	Noise Power Spectrum (Spektrum šumu)
QL	-	Quality loss (Ztráta kvality)

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. Standard CPIQ.....	10
3. Zkušební podmínky a použité přístroje.....	11
3.1. Místnost.....	11
3.2. Obrazce.....	11
3.3. Osvětlení.....	12
3.4. Nastavení fotoaparátu.....	12
4. Prostorová frekvenční charakteristika.....	13
4.1. Ostrost.....	13
4.2. Měření a výpočet.....	13
4.3. Nastavení fotoaparátu.....	14
4.4. Výpočty a výsledky měření.....	14
5. Barevná vada.....	17
5.1. Obrazec.....	17
5.2. Výpočty a výsledky měření.....	17
6. Barevná sytost.....	20
6.1. Rozdíl mezi <i>saturation</i> a <i>chroma</i> .....	20
6.2. Obrazec.....	20
6.3. CIELab.....	21
6.4. Nastavení fotoaparátu.....	21
6.5. Výpočty.....	21
6.6. Výsledky měření.....	22
7. Barevná uniformita.....	23
7.1. Obrazec a osvětlení.....	23
7.2. Nastavení fotoaparátu a analýza obrazu.....	23
7.3. Výpočet.....	23
8. Geometrické zkreslení.....	25
8.1. Typy deformací.....	25
8.2. Obrazec a nastavení fotoaparátu.....	25
8.3. Měření a výpočty.....	25
9. Viditelný šum.....	27
9.1. Osvětlení.....	27
9.2. Obrazec.....	27

9.3. Nastavení fotoaparátu .....	27
9.4. Výpočty a výsledky měření .....	27
10. Rozostření textury .....	30
10.1. Obrazec a osvětlení .....	30
10.2. Nastavení fotoaparátu .....	31
10.3. Výpočty a výsledky měření .....	31
11. Softwarové nástroje .....	33
11.1. Imatest .....	33
11.2. IMAGING GAUGE .....	33
11.3. Quick MTF .....	33
11.4. DxO Analyzer .....	33
11.5. Image Processing Toolbox – Matlab .....	33
11.6. iQ-Analyzer .....	34
12. Měření prostorové frekvenční charakteristiky .....	35
12.1. Implementace výpočetního nástroje .....	35
12.2. Návrh testovacího obrazce .....	37
12.3. Ukázka měření SFR ověřující funkčnost algoritmů dle návodu v příloze B .....	38
13. Měření barevné uniformity .....	40
13.1. Implementace výpočetního nástroje .....	40
13.2. Otestování výpočetního nástroje .....	40
13.3. Ukázka měření barevné uniformity .....	40
14. Závěr .....	41
15. Použitá literatura .....	42
16. Seznam obrázků a tabulek .....	44
16.1. Seznam obrázků .....	44
16.2. Seznam tabulek .....	44
Příloha A. Tabulka standardů .....	45
Příloha B. Laboratorní úloha - měření SFR .....	46
Příloha C. Výstupní průběhy SFR .....	52
Příloha D. Obsah přiloženého DVD .....	53



# 1. Úvod

S narůstajícím počtem mobilních telefonů na trhu, které používají různé integrované digitální fotoaparáty, se objevila otázka, jak by se daly tyto fotoaparáty porovnat z hlediska kvality fotografií, které dokážou vyprodukovat. Odlišné konstrukce i algoritmy použité pro zachycení a následné zpracování fotografií se výrazně liší výrobce od výrobce. Mnohdy je upřednostněn lepší celkový dojem ze snímku před korektním, věrným zobrazením. Často tak dochází při zpracování i k určitým vylepšením, například z hlediska ostrosti či barevného podání. To vše společně s kompresí, která je na fotografie aplikována, ubírá na celkové kvalitě pořízených fotografií [1].

Průměrný spotřebitel v dnešní době z parametrů fotoaparátu příliš mnoho nezjistí. I proto se organizace IEEE rozhodla vydat standard pod názvem IEEE STANDARD 1858-2016 - IEEE Standard for Camera Phone Image Quality (CPIQ)<sup>1</sup>[2] (dále jen CPIQ), který by měl umožnit spotřebitelům jednoduše porovnat jednotlivé digitální fotoaparáty integrované v mobilních telefonech. Po změření sedmi metrik popsanych ve výše zmíněném standardu by měl být jejich výsledek zapsán jasně a srozumitelně. Spotřebitel by tak měl mít možnost jednoduchého výběru mezi několika mobilními telefony a případně možnost zjistit, jakou kvalitu snímků je schopen zachytit jím vlastněný model. Nemělo by tak již docházet k tomu, že si spotřebitelé vyberou bezhlavě mobilní telefon s nejvyšším počtem megapixelů, aniž by se podívali a vzali tak v úvahu i ostatní parametry použitého integrovaného digitálního fotoaparátu, jelikož i tyto parametry ovlivňují celkovou kvalitu snímků, jenž je mobilní telefon schopen zachytit [3].

Tato práce se zabývá popisem a implementací metrik použitých ve dříve zmíněném standardu. Každá kapitola se zaměřuje na jeden parametr, podle kterého lze hodnotit kvalitu fotografií. Po dvou úvodních kapitolách zaměřených na obecné informace a zkušební podmínky následují kapitoly věnované jednotlivým metrikám. Kapitola 4 (Prostorová frekvenční charakteristika) posuzuje kvalitu snímků z hlediska rozlišení a ostrosti. Kapitola 5 (Barevná vada) hodnotí barevné vady vzhledem k posunu jednotlivých barevných kanálů fotografie. Kapitola 6 (Barevná sytost) se zabývá korektností barevného podání fotografie. Kapitola 7 (Barevná uniformita) popisuje radiální změnu barvy snímku. V kapitole 8 (Geometrické zkreslení) se zaměřuji na zkreslení, deformaci obrazu. Následující kapitola (Viditelný šum) zkoumá výskyt šumu ve fotografii. Dopady automatického doostření snímku a odstranění šumu na kvalitu fotografií jsou popsány v kapitole 10 (Rozostření textury). V kapitole 11 jsou zmíněny komerční softwarové nástroje, jejichž pomocí lze výše zmíněné metriky naměřit. Kapitoly 12 a 13 jsou zaměřeny na praktickou část této práce. Obsahují popis návrhu testovacího obrazce pro měření SFR, návrh skriptu k výpočtu měření SFR a měření barevné uniformity, příklad návodu k laboratorní úloze měření SFR (příloha B) a samotné měření na několika vybraných vzorcích.

---

<sup>1</sup> vycházející z již existujících standardů ISO, viz tab. 6 (str. 45), <https://www.iso.org/home.html> [cit. 2017-05-18]

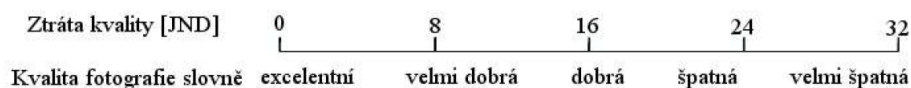
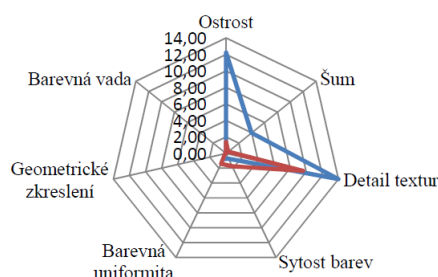
## 2. Standard CPIQ

Kvůli strmému nárůstu počtu mobilních telefonů s fotoaparáty na trhu byla v roce 2006 založena skupina [4], jež hodlala připravovat standardy zaměřující se na hodnocení kvality fotografií z digitálních fotoaparátů mobilních telefonů. V roce 2012 byla tato skupina začleněna do IEEE jako pracovní skupina P1858<sup>2</sup>. Ta v současnosti čítá více než 20 členů z Evropy, USA či Asie. Mezi ně patří například AT&T, Cisco Systems, Inc., DxO Labs, Huawei Device Company, Image Engineering Co. GmbH KG, Imatest LLC, Intel Corporation, LG Electronics, Microsoft a další. Cílem je zapojit firmy zabývající se telekomunikacemi, testováním produktů, vývojem hardwaru a softwaru a vzájemnou spoluprací vypracovat standard, případně standardy, zabývající se hodnocením kvality fotografií mobilních telefonů s ohledem na požadavky dnešní doby. V roce 2015 vznikl první draft standardu IEEE P1858, který se výše zmíněnou problematikou zabývá.

Metriky, jež tento standard obsahuje, čerpají z již vydaných standardů zabývajících se hodnocením kvality klasických fotoaparátů. Zkoumáním byly postupy v těchto standardech upraveny pro subjektivní hodnocení kvality fotografií.

Po změření všech metrik, jež standard CPIQ obsahuje (kapitoly 4. Prostorová frekvenční charakteristika až 10. Rozostření textury), by měly být výsledky uvedeny v jednotkách JND (Just Noticeable Difference), která odpovídá celkové subjektivní ztrátě kvality produkovaných fotografií mobilním telefonem. Na obr. 1 je vidět příklad porovnání dvou zařízení z hlediska kvality snímků, které jsou schopny produkovat.

CPIQ Metriky	Zařízení 1 [JND]	Zařízení 2 [JND]
Ostrost (kap. 4, str. 13)	12,20	1,37
Barevná vada (kap. 5, str. 17)	0,00	0,00
Sytost barev (kap. 6, str. 20)	0,73	1,74
Barevná uniformita (kap. 7, str. 23)	0,80	1,40
Geometrické zkreslení (kap. 8, str. 25)	0,10	0,10
Šum (kap. 9, str. 27)	3,97	0,33
Detail textur (kap. 10, str. 30)	14,00	9,60
<b>Celková ztráta kvality</b>	<b>17,86</b>	<b>9,93</b>



Obr. 1 - Porovnání kvality fotografií dvou přístrojů [4]

Uživatel by měl být schopen z takovéto tabulky rychle a jasně zjistit, které ze zařízení podává lepší výsledky v jednotlivých kategoriích i celkově.

<sup>2</sup> <http://grouper.ieee.org/groups/1858/> [cit. 2017-05-20]

### 3. Zkušební podmínky a použité přístroje

Standard CPIQ předem stanovuje podmínky, ve kterých by měla měření probíhat.

#### 3.1. Místnost

Teplota v místnosti, ve které budou měření probíhat, by měla odpovídat  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Vlhkost místnosti by měla být v rozsahu 20-80%.

#### 3.2. Obrazce

Obrazce používané v měřeních jsou u každého z měření uvedena. Pro měření SFR by měl být použit obrazec viditelný na obr. 2 (viz s. 13), který zatím není komerčně dostupný. Místo něj se doporučuje použít obrazec eSFR<sup>3</sup>, případně SFRplus<sup>4</sup>. Tzv. dot pattern test chart<sup>5</sup>, někdy též grid distortion target, viditelný na obr. 4 (viz s. 17) by měl být použit pro měření LCD a LGD. Další obrazec, použitý při měření barevné sytosti, je X-Rite Digital ColorChecker SG<sup>6</sup> (viz obr. 6, s. 20), případně podobnou variantu od jiného výrobce, například Colour Rendition Chart SG (BST12<sup>7</sup>). Pro měření barevné uniformity se doporučuje použít obrazec viditelný na obr. 9 (viz s. 23), komerčně dostupný například pod názvem TE182<sup>8</sup> od německé firmy Image Engineering, případně varianta obrazce GC18<sup>9</sup> od firmy Danes-Picta. Na obr. 11 (viz s. 27) je vidět OECF Test Chart (ISO 14524)<sup>10</sup>, jenž se používá pro měření viditelného šumu. Poslední obrazec (viz obr. 13, s. 30), tzv. dead leaves target, komerčně dostupný pod jménem Dead Leaves test chart, Black & White Imatest Spilled Coins<sup>11</sup> (v případě firmy Imatest) či TE265<sup>12</sup> (v případě firmy Image Engineering) se používá při měření rozostření textury.

Všechny obrazce by měly být dostatečně rovné, aby nedocházelo k nežádoucím artefaktům při měřeních. Hodnota maximálního ohybu je ve standardu stanovena pomocí planarity neboli rovnosti či stupně rovnosti na 3%. Nemělo by tak docházet k lokální geometrické deformaci vyšší než 0,045%.

Mobilní telefon by měl být též vůči každému obrazci ve správné pozici. Ke správnému zarovnání fotoaparátu vzhledem k obrazci lze použít zrcadlo. Přesná pozice je ve standardu podrobně popsána.

---

<sup>3</sup> možno koupit na: <http://store.imatest.com/test-charts/resolution-charts/configurable-charts/iso12233-2014.html> [cit. 2017-05-18]

<sup>4</sup> možno koupit na: <http://store.imatest.com/test-charts/resolution-charts/configurable-charts/sfrplus-chart-inkjet.html> [cit. 2017-05-18]

<sup>5</sup> možno koupit na: <http://store.imatest.com/test-charts/iso-cpiq-standard-test-charts/dot-pattern-test-chart.html> [cit. 2017-05-18]

<sup>6</sup> možno koupit na: <http://store.imatest.com/test-charts/color-charts/colorchecker-sg.html> [cit. 2017-05-18]

<sup>7</sup> možno koupit na: [http://www.danes-picta.com/txt\\_PhotoDigital.htm](http://www.danes-picta.com/txt_PhotoDigital.htm) [cit. 2017-05-18]

<sup>8</sup> možno koupit na: <https://www.image-engineering.de/products/charts/all/511-te182> [cit. 2017-05-18]

<sup>9</sup> možno koupit na: [http://www.danes-picta.com/txt\\_PhotoDigital.htm](http://www.danes-picta.com/txt_PhotoDigital.htm) [cit. 2017-05-18]

<sup>10</sup> možno koupit na: <https://www.image-engineering.de/products/charts/all/520-te197>, případně <http://store.imatest.com/iso-14524-digital-camera-contrast-chart.html> či [http://www.danes-picta.com/txt\\_PhotoDigital.htm](http://www.danes-picta.com/txt_PhotoDigital.htm) (DCG2) [cit. 2017-05-18]

<sup>11</sup> možno koupit na: <http://store.imatest.com/test-charts/iso-cpiq-standard-test-charts/imatest-spilled-coins-dead-leaves-test-chart.html> [cit. 2017-05-18]

<sup>12</sup> možno koupit na: <https://www.image-engineering.de/products/charts/all/582-te265> [cit. 2017-05-18]

### **3.3. Osvětlení**

Standard doporučuje použití:

- světelného zdroje D55, tedy zdroje o barevné teplotě v okolí 5503K
- žárovky s wolframovým vláknem o barevné teplotě v okolí 3050K
- zářivky TL84
- světelného zdroje o barevné teplotě  $5700\text{K} \pm 1000\text{K}$ .

Všechny světelné zdroje by měly dodávat stabilní osvětlení s barevnou uniformitou minimálně 80% pro odrazivé, reflexní obrazce a 90% pro propustné, transparentní obrazce, nestanovuje-li měření jinak. Světelné zdroje by měly být umístěny tak, aby se minimalizoval odlesk od obrazce. Zároveň by jejich umístění nemělo na obrazci vytvářet stín měřeného fotoaparátu. Standardy pro měření obrazové kvality fotoaparátu, mezi něž patří mimo jiné standardy CIPQ a ISO 12233 - Photography - Electronic still picture imaging - Resolution and spatial frequency responses (dále jen ISO 12233), přebírají parametry osvětlení ze standardu ISO 7589 - Photography - Illuminants for sensitometry - Specifications for daylight, incandescent tungsten and printer.

### **3.4. Nastavení fotoaparátu**

Fotoaparát by měl být nastaven do automatického režimu, není-li řečeno jinak. Výjimkou je expozice, která by měla být nastavena tak, aby nedocházelo k přeexponování či podexponování snímku.

## 4. Prostorová frekvenční charakteristika

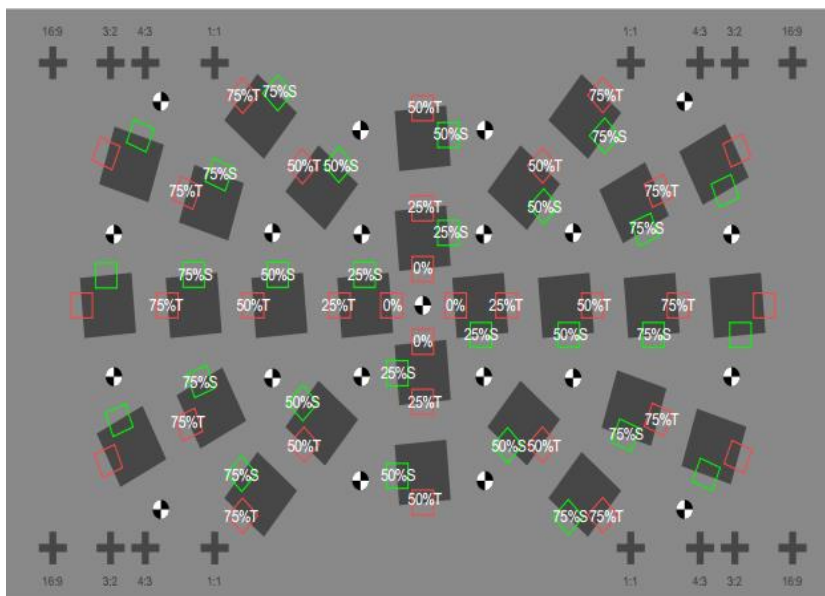
Prostorová frekvenční charakteristika neboli *spatial frequency response* (dále jen SFR) je měřítkem rozlišení a ostrosti fotografie. Je to jedna z důležitějších metrik hodnocení kvality fotografie.

### 4.1. Ostrost

Ostrost je subjektivní vjem, který lidské oko vyhodnocuje prostřednictvím kontrastu hran objektů zachycených na fotografii. Vyšší kontrast v kombinaci s vyšším rozlišením dodává dojem vyšší ostrosti obrazu. Při příliš velkém zvětšení kontrastu může dojít k přeostrění. Fotografie se pak jeví nepřirozeně. Při příliš malém kontrastu se může naopak snímek jevit rozmazaně [5].

### 4.2. Měření a výpočet

Pro měření SFR se dá i u mobilních telefonů použít (s korekcemi) standard ISO 12233. Úpravy zmiňované v standardu CPIQ se týkají zejména linearizace signálu reprezentující zachycený snímek. Měření SFR by mělo probíhat na jasovém signálu snímku. Jelikož většina mobilních telefonů ukládá fotografie ve formátu sRGB, je potřeba provést převod do formátu CIEXYZ. Tento převod je popsán ve standardu IEC 61966-2-1 Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB.



Obr. 2 - Obrázek pro měření SFR pro fotoaparáty s větším rozlišením než VGA [4]

Vzorec pro převod pak vypadá takto:

$$Y(i) = R(i) \cdot 0,2126 + G(i) \cdot 0,7152 + B(i) \cdot 0,0722 \quad (4.1)$$

kde

$Y$  značí jasovou složku barevného prostoru CIEXYZ,

$R$  značí červený kanál,

$G$  značí zelený kanál,

$B$  značí modrý kanál,

$i$  značí  $i$ -tý pixel obrazového pole.

Pro samotné měření se pak používá dvou obrazců. Jeden z nich je určen pro mobilní telefony obsahující fotoaparát s rozlišením VGA (640×480 pixelů) a menším, druhý pro fotoaparáty s větším rozlišením než VGA (obr. 2). Obrazce používají přechod barev šedá/šedá na rozdíl od obrazce ve standardu ISO 12233, který používá přechod černá/bílá. Černá a bílá barva reprezentují maximální a minimální hodnotu jasového signálu. Při přechodu mezi těmito hodnotami, při použití doostřovacích algoritmů, může dojít k překmitu signálu, což je z hlediska měření nežádoucí. Je-li však zvolena šedá barva, tedy barva s hodnotou mezi minimem a maximem, dojde k omezení nebo úplnému odstranění těchto překmitů.

### 4.3. Nastavení fotoaparátu

Mobilní telefon by měl být nastaven do automatického režimu, avšak komprese by měla být nastavena na minimální hodnotu, tedy maximální kvalitu fotografie, je-li to možné. Parametry komprese, ohniskové vzdálenosti objektivu a velikosti závěrky mají značný vliv na měření SFR. Proto by u výsledku měření měly být tyto parametry uvedeny.

### 4.4. Výpočty a výsledky měření

Pro aproximaci funkce kontrastní citlivosti CSF (Contrast Sensitivity Function) lze použít vzorec:

$$CSF(v) = av^c e^{-bv} \quad (4.2)$$

kde

$a$  je konstanta 1,

$b$  je konstanta 0,2,

$c$  je konstanta 0,8,

$v$  značí prostorovou frekvenci snímku v cyklech na stupeň [cy/degree].

Funkce kontrastní citlivosti udává, jak vnímá naše zrakové ústrojí kontrast v závislosti na prostorové frekvenci v cyklech na stupeň [cy/degree]. Maximální citlivosti dosahuje funkce v okolí 4 cyklů na stupeň, tedy lidské zrakové ústrojí je při této hodnotě nejvíce choulostivé na změny kontrastu [6].

Pro výpočet ostrosti lze poté použít vzorec:

$$Q = \frac{\int_0^{v_{cut}} SFR(v)M(v)CSF(v)dv}{\int_0^{\infty} CSF(v)dv} \quad (4.3)$$

respektive vzorec (4.4), použijeme-li vzorec (4.2)

$$Q = \frac{\int_0^{v_{cut}} SFR(v)M(v)CSF(v)dv}{16,88} \quad (4.4)$$

kde

$SFR(v)$  značí funkci SFR v závislosti na prostorové frekvenci  $v$ ,

$M(v)$  značí funkci MTF pozorovacího zařízení v závislosti na prostorové frekvenci  $v$ ,

$v_{cut}$  je konstanta závislá na velikosti použitého obrazce.

Pro aproximaci  $M(v)$  lze použít jeden ze vzorců:

$$M(v) = M_{disp}(v) = \left| \frac{\sin(\pi k_{disp}v)}{\pi k_{disp}v} \right| \quad (4.5)$$

$$M(v) = M_{print}(v) = \exp\left(-\frac{v}{k_{print}}\right) \quad (4.6)$$

kde

$k_{disp}$  je konstanta závislá na typu a velikosti zobrazovacího zařízení (tab. 1),

$k_{print}$  je konstanta závislá na typu a velikosti výtisku (tab. 1).

Tab. 1 - Volba konstant v závislosti na podmínkách prohlížení

	Podmínky prohlížení				
	Počítačový monitor (100% jas, 100 ppi)	4,5 palcový displej mobilního telefonu	30 palcový 4k displej	Výtisk o rozměrech 10×15 cm	Výtisk o rozměrech 40×60 cm
$k_{disp}$	0,0243	0,0176	0,02	×	×
$k_{print}$	×	×	×	21,8	65,4

Jaký vzorec se pro výpočet  $M(v)$  použije závisí na tom, zda posuzujeme kvalitu fotografie na výtisku či na displeji zařízení. Je-li fotografie zobrazena na displeji nějakého zařízení, použije se vzorec (4.5). Je-li měřený obrazec vytištěný, použije se vzorec (4.6).

Výsledky měření by měly být v jednotkách JND (Just Noticeable Difference - Právě pozorovatelná diference), které představují subjektivní hodnocení ztráty kvality fotografií. Přepočet na JND je proveden pomocí těchto vzorců:

$$B = \begin{cases} 0 & \text{pro } Q > 0,886 \\ 0,886 - Q & \text{pro } Q \leq 0,886 \end{cases} \quad (4.7)$$

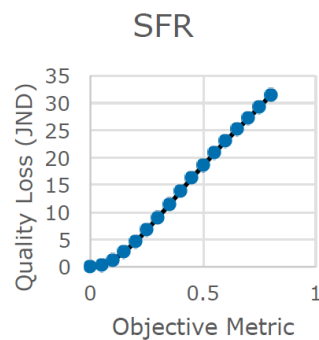
$$QL = \frac{0,00336 - 2,34 \cdot B + 164 \cdot B^2 - 192 \cdot B^3 + 16,3 \cdot B^4}{1 - 0,0866 \cdot B + 0,968 \cdot B^2 - 2,31 \cdot B^3} \quad (4.8)$$

kde

$B$  značí hodnotu rozmazání hrany,

$QL$  značí celkovou ztrátu kvality fotografie v JND.

Vzorce pro přepočet ztráty kvality fotografie do subjektivních jednotek JND byl odvozen ze standardu ISO 20462-3 - Photography - Psychophysical experimental methods for estimating image quality - Part 3: Quality ruler method [4] (dále jen ISO 20462-3) a z výsledku subjektivního testu na skupině pozorovatelů, kteří hodnotili ztrátu kvality fotografií vlivem rozmazání. Převod objektivních jednotek do subjektivních reprezentuje obr. 3.

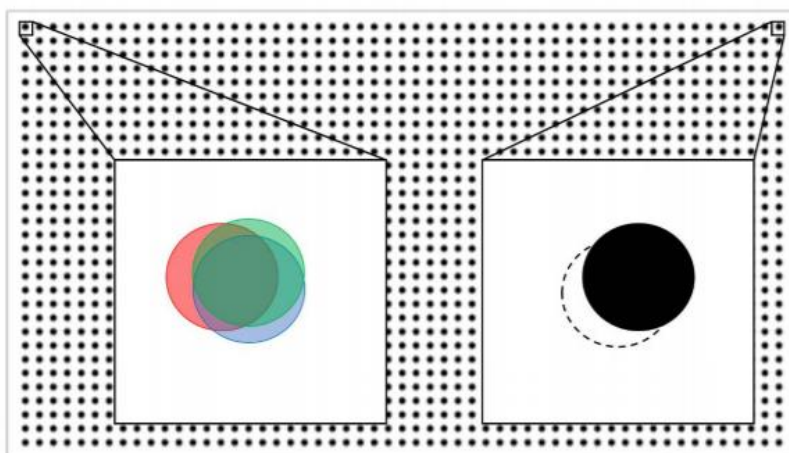


Obr. 3 - Převod objektivních hodnot na subjektivní ztrátu kvality [3]



## 5. Barevná vada

Parametr, který se používá k měření barevné vady, se nazývá *lateral chromatic displacement* (dále jen LCD). Vzniká rozdílnou rychlostí šíření jednotlivých vlnových délek světla čočkami fotoaparátu, neboli disperzí, a spektrální citlivostí použitého obrazového senzoru [3]. Výsledkem je posun jednotlivých barevných kanálů, viditelný na obr. 4.



Obr. 4 - Lateral chromatic displacement [1]

V RGB fotografii, tedy fotografii tvořené kombinací červené, zelené a modré barvy, respektive jejich kanálů, je LCD charakterizováno jako posun těchto barev. Jako referenční se bere zelená barva, jelikož je na ni lidské oko nejcitlivější. Posun červené a modré se tedy měří vzhledem k ní v radiálním směru.

### 5.1. Obrazec

Měření probíhá na obrazci, který tvoří černé body na bílém pozadí (obr. 4). Obrazec by měl zabrat celé zorné pole fotoaparátu. Pořízená fotografie by pak měla obsahovat nejméně 300 černých bodů, kde každý bod musí mít minimální průměr 10 pixelů.

### 5.2. Výpočty a výsledky měření

Výpočet probíhá pro každý bod samostatně a zároveň samostatně pro obě barvy (červenou a modrou). Vzorce pro výpočty vypadají takto:

$$DR_{RCDabs(i)} = \sqrt{(G_{H(i)})^2 + (G_{V(i)})^2} - \sqrt{(R_{H(i)})^2 + (R_{V(i)})^2} \quad (5.1)$$

$$DB_{RCDabs(i)} = \sqrt{(G_{H(i)})^2 + (G_{V(i)})^2} - \sqrt{(B_{H(i)})^2 + (B_{V(i)})^2} \quad (5.2)$$

$$DR_{RCDrel(i)} = \frac{\sqrt{(G_{H(i)})^2 + (G_{V(i)})^2} - \sqrt{(R_{H(i)})^2 + (R_{V(i)})^2}}{\sqrt{H^2 + V^2}} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

$$DB_{RCDrel(i)} = \frac{\sqrt{(G_{H(i)})^2 + (G_{V(i)})^2} - \sqrt{(B_{H(i)})^2 + (B_{V(i)})^2}}{\sqrt{H^2 + V^2}} \cdot 100\% \quad (5.4)$$

kde

$B_{H(i)} / R_{H(i)} / G_{H(i)}$  značí horizontální vzdálenost středu modrého/červeného/zeleného bodu od středu snímku,

$B_{V(i)} / R_{V(i)} / G_{V(i)}$  značí vertikální vzdálenost středu modrého/červeného/zeleného bodu od středu snímku,

$H$  značí počet pixelů snímku v horizontálním směru,

$V$  značí počet pixelů snímku ve vertikálním směru,

$DB_{RCDabs(i)} / DR_{RCDabs(i)}$  značí absolutní hodnotu posunu modrého/červeného bodu oproti zelenému,

$DB_{RCDrel(i)} / DR_{RCDrel(i)}$  značí relativní hodnotu posunu modrého/červeného bodu oproti zelenému vzhledem k počtu horizontálních a vertikálních pixelů snímku,

$i$  značí  $i$ -tý bod obrazce.

Každý výsledek výpočtu reprezentuje posun modrého a červeného kanálu vůči zelenému kanálu pro jeden bod. Všechny výpočty, tedy všechny posuny jsou vyneseny do grafu (obr. 5). Jednotlivé body jsou poté proloženy polynomem 3. stupně. Určí se polynom, který je nejvíce posunut vzhledem ke svislé ose. Výsledná hodnota LCD je hodnota nejvýše posunutého bodu tohoto polynomu úměrně k výšce obrazu.

Pro subjektivní hodnocení ztráty kvality je zvolen přepočít do jednotek JND podle následujících vzorců:

$$QL = 0 \text{ pro } LCD \leq 6,69 \quad (5.5)$$

$$QL = \frac{LCD - a}{b} - \frac{c \cdot \ln(1 + b \cdot \frac{LCD - a}{c})}{b^2} \text{ pro } LCD > 6,69 \quad (5.6)$$

kde

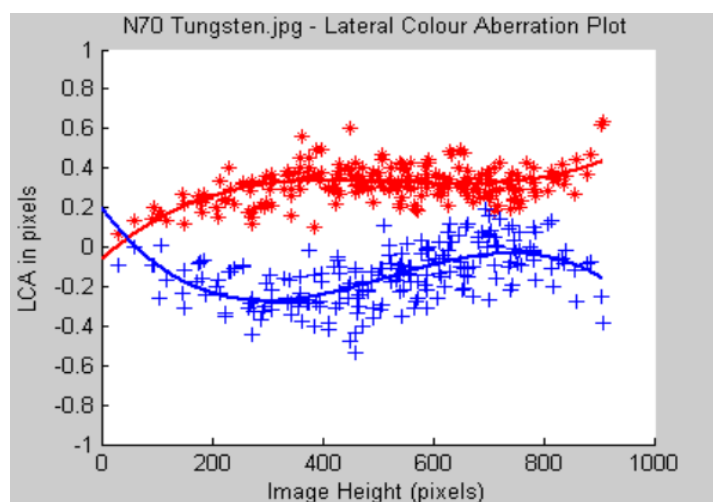
$QL$  značí celkovou ztrátu kvality fotografie v JND,

$a$  je konstanta 6,69,

$b$  je konstanta 4,25,

$c$  je konstanta 5,25.

Vzorci pro přepočít do jednotek JND vznikly díky subjektivnímu experimentu se skupinou pozorovatelů, jež hodnotili fotografie s různou hodnotou LCD a tedy různou ztrátou kvality.



*Obr. 5 - Graf LCD [4]*

Jelikož celkový výsledek může být ovlivněn vzdáleností od měřeného obrazce a ohniskovou vzdáleností objektivu, měly by se tyto údaje u výsledku měření uvést.

## 6. Barevná sytost

Barevná sytost neboli *chroma* je parametr určující intenzitu barev.

### 6.1. Rozdíl mezi *saturation* a *chroma*

V českém jazyce se pod pojmem barevná sytost schovávají hned dva anglické termíny, *saturation* a *chroma*. Commission Internationale de l'Éclairage (dále jen CIE) však tyto dva pojmy přesně definuje. Barevnost je vlastností vizuálního vjemu, podle které se vnímaná barva jisté oblasti jeví více či méně barevná [7]. *Saturation* je barevností oblasti vzhledem ke svému jasů [7]. *Chroma* je barevností oblasti vzhledem k jasů podobně osvětlené oblasti, která se zdá bílá nebo vysoce propustná [7]. Rozdíl v obou pojmech je natolik malý, že se v českém jazyce oba nacházejí pod barevnou sytostí. V tomto měření se však zaměřujeme na druhý z pojmů, tedy chroma.

### 6.2. Obrazec

Dnešní fotoaparáty integrované v mobilních telefonech se mnohdy nesnaží o zachycení originálního a tedy i korektního barevného podání snímaných scén, ale spíše o co nejpříjemnější podání. Proto dochází k přidávání barevné sytosti a posunu všech barev do pro oko líbivějších oblastí.

V tomto měření však nejde o co nejhezčí barevné podání, ale o co nejvěrnější. Proto se pro měření používá X-Rite Digital ColorChecker® SG, s předem známými barevnými odstíny a jejich sytostmi (obr. 6), umístěný na šedém pozadí. Norma doporučuje změřit přesnou barevnou informaci jednotlivých bloků obrazce pomocí spektrofotometru či spektroradiometru. Není-li ani jeden z těchto přístrojů k dispozici, je možno použít referenční data dodávaná výrobcem obrazce.

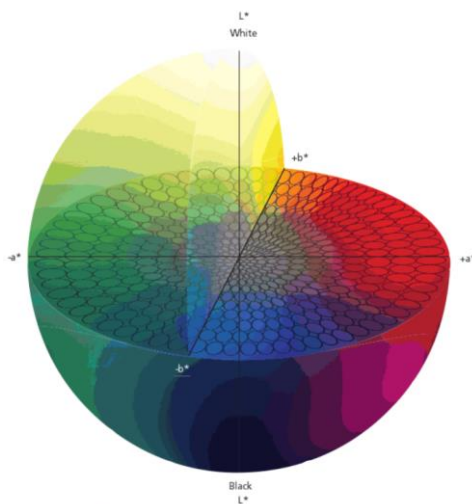


Obr. 6 - ColorChecker Digital SG [3][4]

Do výpočtu barevné sytosti se nezahrnou bílé, šedé a černé čtverce na obvodu a uprostřed obrazce. Tyto čtverce jsou z hlediska sytosti barev neutrální. Výpočet by měl probíhat v barevném prostoru CIELab.

### 6.3. CIELab

CIELab definuje všechny lidskému oku viditelné barvy. Tento prostor byl vytvořen, aby sloužil jako referenční prostor. Osa  $L^*$  označuje světlost či jasnost barvy a osy  $a^*$  a  $b^*$  označují barevný tón [4]. Celý prostor je vidět na obr. 7.



Obr. 7 - Barevný prostor CIELab [8]

Všechna zachycená data by tak měla být převedena do tohoto barevného prostoru.

### 6.4. Nastavení fotoaparátu

Mobilní telefon by měl být nastaven do automatického režimu. Zisk by měl být nastaven na minimum, pokud je to možné, aby došlo ke snížení šumu snímku.

### 6.5. Výpočty

K výpočtu se použije níže uvedených vzorců:

$$C_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{a_{M(i)}^2 + b_{M(i)}^2} \quad (6.1)$$

$$C_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{a_{R(i)}^2 + b_{R(i)}^2} \quad (6.2)$$

$$CL_{sg} = \frac{C_M}{C_R} \cdot 100 \quad (6.3)$$

kde

$a_{Mi}$  a  $b_{Mi}$  značí hodnoty  $a^*$  a  $b^*$  prostoru CIELab pro změřená data v  $i$ ,  
 $a_{Ri}$  a  $b_{Ri}$  značí hodnoty  $a^*$  a  $b^*$  prostoru CIELab pro referenční data v  $i$ ,  
 $N$  značí počet CIELab trojic,

$C_M$  značí průměrnou hodnotu barevné sytosti (chromy) pro změřená data,  
 $C_R$  značí průměrnou hodnotu barevné sytosti (chromy) pro referenční data,  
 $CL_{sg}$  je výsledná hodnota, tzv. chroma level.

### 6.6. Výsledky měření

Celkový výsledek tohoto měření je pak zjištěn z vypočtených hodnot barevné sytosti převedením do jednotky JND pomocí vzorce (6.4).

$$QL = k \cdot (1 - e^{-((a \cdot |CL_{sg} - p|)^r)}) \quad (6.4)$$

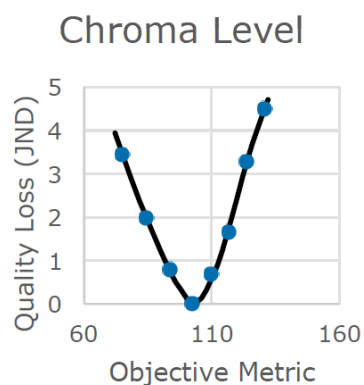
kde

$QL$  značí celkovou ztrátu kvality fotografie v JND,  
 $a$ ,  $k$ ,  $p$  a  $r$  jsou konstanty definované v tabulce (tab. 2).

Tab. 2 - Hodnoty konstant pro výpočet  $QL$

konstanta	$CL_{sg} \leq 102$	$CL_{sg} > 102$
$p$	102	102
$a$	0,0064	0,0402
$r$	1,36	1,98
$k$	38,3	6,22

Díky tomu dostaneme subjektivní hodnocení ztráty kvality snímku v závislosti na jeho barevné sytosti. Hodnoty jednotlivých koeficientů byly získány pomocí subjektivního experimentu se skupinou pozorovatelů, kteří porovnávali a hodnotili fotografie s různou barevnou sytostí z hlediska vnímané ztráty kvality [2]. Převod mezi objektivními a subjektivními hodnotami ztráty kvality je reprezentován na obr. 8.



Obr. 8 - Převod objektivních hodnot na subjektivní ztrátu kvality [3]

## 7. Barevná uniformita

Barevná uniformita, někdy též barevná jednotnost neboli *color uniformity* je parametr, který popisuje radiální změnu barvy snímku. K této nestejnorodosti může docházet kvůli nevhodnému přizpůsobení mezi senzorem a jeho čočkami, prostorově různým propustným rozdílům spektra infračerveného filtru a rozdílům ve spektrální citlivosti použitého senzoru [3].

### 7.1. Obrazec a osvětlení

Samotné měření probíhá na barevně jednotném obrazci (s uniformitou nejméně 92%), odrazném a propustném. Pro odrazný typ je požadován matný povrch s odrazivostí větší než 90%. Pro oba typy by mělo být dostatečně jasově neměnné osvětlení, jehož parametry závisí na zvoleném typu obrazce. V případě odrazného by neměl mít jas menší hodnotu než  $50 \text{ cd/m}^2$ , optimální hodnota je pak  $100 \text{ cd/m}^2$ . V případě propustného je požadován jas minimálně  $100 \text{ cd/m}^2$ . Splnění výše zmíněných podmínek by mělo být ověřeno pomocí jasoměru.



Obr. 9 - Uniformní obrazec/plocha [4]

### 7.2. Nastavení fotoaparátu a analýza obrazu

Fotoaparát by měl být nastaven do automatického režimu a měly by jím být pořízeny dva snímky, pro každý typ obrazce jeden. Fotografie by měly být rozděleny na bloky v závislosti na poměru stran pořízené fotografie. Pro 4:3 by se mělo jednat o bloky o rozměrech  $20 \times 15$  pixelů, pro 3:2 by měly být bloky velké  $24 \times 16$  pixelů a pro 16:9  $32 \times 18$  pixelů. Průměrná hodnota každého bloku by měla být převedena do barevného prostoru CIELab (obr. 7).

### 7.3. Výpočet

Analýzou souřadnic  $a^*$  a  $b^*$  jednotlivých bloků dostaneme celkový průměr všech bloků a tedy i celého snímku. Největší odchylku od tohoto finálního průměru pak považujeme za výslednou hodnotu.

K výpočtu se použije následujících vzorců:

$$D_c(i) = \sqrt{(a^*(i) - \bar{a})^2 + (b^*(i) - \bar{b})^2} \quad (7.1)$$

$$D_c = \underbrace{\max D_c(i)}_i \quad (7.2)$$

$$QL = 0 \text{ pro } D_c \leq 0,864 \quad (7.3)$$

$$QL = \frac{D_c - a}{b} - \frac{c \cdot \ln(1 + b \cdot \frac{D_c - a}{c})}{b^2} \text{ pro } D_c > 0,864 \quad (7.4)$$

kde

$a^*$  a  $b^*$  značí průměrné hodnoty  $a^*$  a  $b^*$  prostoru CIELab pro změřená data v  $i$ -tém bloku,

$\bar{a}$  a  $\bar{b}$  značí celkový průměr hodnot  $a^*$  a  $b^*$  prostoru CIELab pro všechny bloky fotografie,

$D_c(i)$  značí odchylku  $i$ -tého bloku od průměrné hodnoty,

$D_c$  značí maximální odchylku všech bloků od průměrné hodnoty,

$QL$  značí celkovou ztrátu kvality fotografie v JND,

$a$  je konstanta 0,864,

$b$  je konstanta 2,4,

$c$  je konstanta 0,977.

Pro zjištění vzorce pro přepočet do jednotek JND a konstant v něm použitých bylo nutno provést subjektivní experiment se skupinou pozorovatelů, jelikož pro každou barvu může mít barevná uniformita jiný dopad na kvalitu celkového snímku. Pozorovatelé na předem vybraných obrazcích s různými hodnotami barevné uniformity hodnotili, jaký dopad na celkový dojem a kvalitu obrazců barevná uniformita měla.

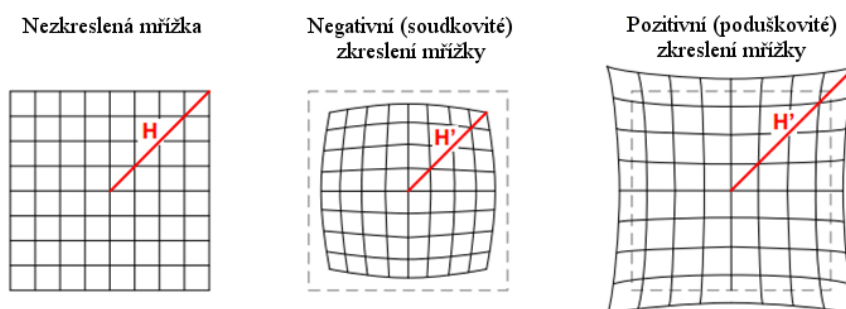


## 8. Geometrické zkreslení

Geometrické zkreslení neboli *local geometric distortion* (dále jen LGD) je parametr zabývající se zkreslením, deformací obrazu způsobenou různým zvětšením zachycené scény při fotografování. Projevuje se jako změna rozměrů jednotlivých objektů ve fotografii. Nejvíce je tato deformace patrná na objektech obsahujících rovné části. V takovém případě dochází k viditelnému ohybu těchto částí.

### 8.1. Typy deformací

Typy deformací jsou viditelné na obr. 10. Z něj je též patrné, že zde dochází ke stejným deformacím obrazu jako v případech vypouklého (konvexního) a vydutého (konkávního) zrcadla.



Obr. 10 - Typy geometrické deformace [3][4]

V případě vypouklého zrcadla se objekty v jeho středu zdají větší, zatímco objekty na okrajích snímků se zmenšují. Jelikož dochází ke zmenšování objektů od středu, můžeme tento typ zkreslení nazvat též negativní (soudkovité). V opačném případě, tedy v případě vydutého zrcadla, dochází ke zvětšování objektů směrem ke krajům obrazu. Proto můžeme tento typ zkreslení nazvat též pozitivní (poduškovité). Kombinací obou typů můžeme dostat ještě dva další typy, a to negativní zvlnění a pozitivní zvlnění. V těchto situacích dochází k postupné změně z negativního do pozitivního typu a zpět, či obráceně.

Vady, které následně vedou k těmto deformacím, vznikají při konstrukcích fotoaparátů, zejména jejich čoček.

### 8.2. Obrazec a nastavení fotoaparátu

Pro měření se používá obrazec s černými body na bílém pozadí, viditelný na obr. 4. Fotoaparát mobilního telefonu by měl být nastaven do automatického režimu s výjimkou zesílení, které by mělo být nastaveno na minimální možné, a komprese, která by měla být též nastavena na minimum.

### 8.3. Měření a výpočty

Měření ovlivňuje ohnisková vzdálenost objektivu, vzdálenost telefonu od obrazce a tzv. *focus distance*, což je vzdálenost, ve které dochází k zaostření snímku. Všechny tyto parametry by měly být uvedeny společně s výsledky měření. Výsledek měření závisí na spektrální odezvě senzoru, podobně jako při měření LCD (kapitola 5). Měření by mělo probíhat pouze na referenčním zeleném kanálu snímku. Snímaný obrazec by měl zabírat celé zorné pole fotoaparátu. Pořízená fotografie by měla obsahovat nejméně 300 černých bodů s tím, že každý z nich by měl být o minimálním průměru

10 pixelů. Pro toto měření je velmi důležité správné umístění fotoaparátu vzhledem k obrazci. Mobilní telefon, respektive jeho kamera by měla být umístěna proti středu snímaného obrazce. K úpravě pozice je možno použít zrcadla.

*Local geometric distortion* lze pak definovat takto:

$$LGD = 100 \cdot \frac{H' - H}{H} \quad (8.1) \quad [4]$$

kde

$H'$  značí vzdálenost bodu od středu obrazce,

$H$  značí vzdálenost při nulové deformaci (tuto vzdálenost je možno získat pomocí vzdálenosti fotoaparátu a pozice středového bodu).

Uprostřed snímku by nemělo docházet k deformaci, tedy alespoň nijak výrazné, proto je možný dopočet pozic bodů nedeformovaného obrazu ze středového bodu a několika bodů v jeho okolí.

Pro přepočet do subjektivní jednotky JND bylo znovu nutno provést subjektivní experiment se skupinou pozorovatelů, kteří porovnávali několik zcela rozdílných snímků se čtyřmi typy deformace (pozitivní, negativní, pozitivní zvlnění, negativní zvlnění). Pozorovatelé následně hodnotili kvalitu fotografií v závislosti na LGD a díky jejich pozorování vznikly vzorce pro převod LGD do jednotek JND. Ty vypadají takto:

pro pozitivní a negativní typ

$$QL = 0, \text{ pro } LGD \leq 3,1543 \quad (8.2)$$

$$QL = \frac{LGD - a}{b} \cdot \frac{c \cdot \ln(1 + b \cdot \frac{LGD - a}{c})}{b^2}, \text{ pro } LGD > 3,1543 \quad (8.3)$$

pro obě vlny pak

$$QL = 13,9 \cdot (1 - e^{-((0,0842 \cdot LGD)^{1,64})}) \quad (8.4)$$

kde

$QL$  značí ztrátu kvality fotografie vlivem LGD v jednotkách JND,

$LGD$  je celková hodnota geometrické deformace,

$a$  je konstanta 3,15,

$b$  je konstanta 1,8,

$c$  je konstanta 3,53.

## 9. Viditelný šum

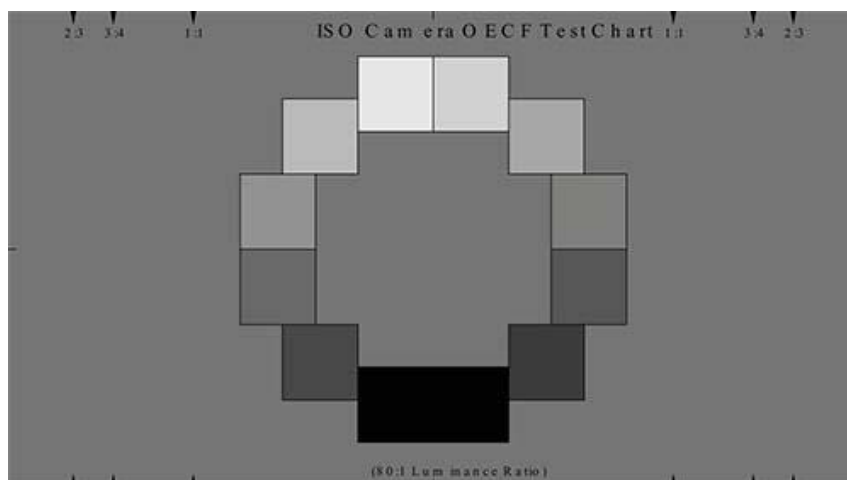
Viditelný šum či *visual noise* je jedním ze základních parametrů pro hodnocení kvality fotografií. Standard CPIQ vychází ze standardu ISO 15739:2013 Photography - Electronic still-picture imaging - Noise measurements (dále jen ISO 15739). V tomto standardu musí dojít ke změnám, jelikož fotoaparáty v mobilních telefonech mnohdy nedovolují manuální nastavení. Dochází u nich i k automatickému nastavení expozice a kvůli tomu nelze použít pouze jedno pole měřeného obrazce, jak vyžaduje standard ISO 15739 [2].

### 9.1. Osvětlení

Měření probíhá pro několik různých osvětlení, jelikož dobré výsledky měření pro jedny světelné podmínky nemusí znamenat dobré výsledky pro všechny světelné podmínky. Proto je kritické použití stabilního osvětlení, jelikož i malá změna může vést k velkým chybám ve výsledcích měření.

### 9.2. Obrazec

Pro měření by měl být použit testovací obrazec vyhovující standardu ISO 14524:2009 Photography - Electronic still-picture cameras - Methods for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs) (obr. 11).



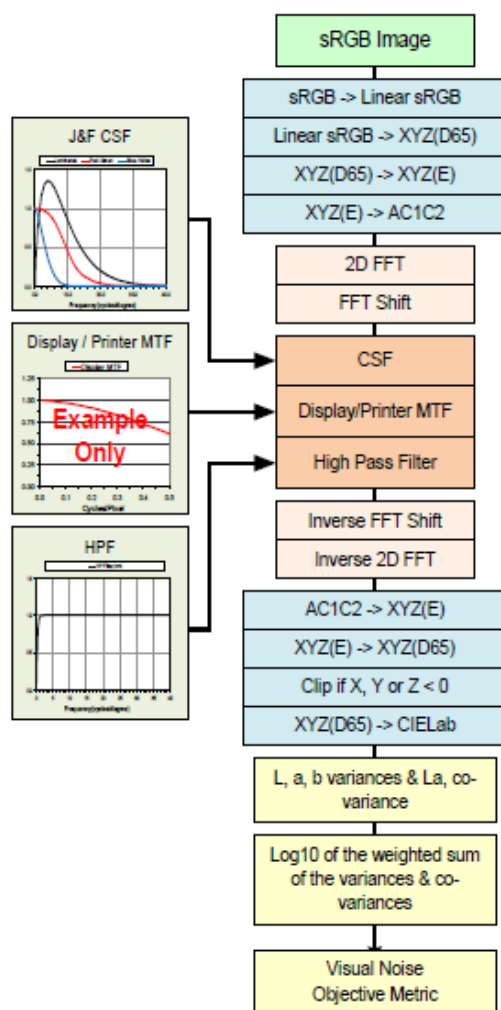
Obr. 11 - OECF Test Chart (ISO 14524) kontrast 80:1 [9]

### 9.3. Nastavení fotoaparátu

Fotoaparát by měl být nastaven do automatického režimu. Měla by být vybrána co nejmenší komprese a obrazec by měl být co možná nejlépe zaostřen. U výsledků měření by měla být zmíněna expozice, zisk a použitá osvětlovací technika (její technické parametry).

### 9.4. Výpočty a výsledky měření

Výpočet šumu by měl proběhnout pro všechny části obrazce s tím, že všechny kroky pro výpočet jsou ve standardu CPIQ uvedeny (obr. 12). Mezi tyto kroky patří například linearizace snímku, převod do barevného prostoru CIE Lab či filtrace pomocí filtru typu horní propust.



Obr. 12 - Vývojový diagram pro měření viditelného šumu [4]

Pro výpočet viditelného šumu se použije vzorec:

$$\Omega = \log_{10}(1 + 23 \cdot \sigma_L^2 + 4,24 \cdot \sigma_a^2 - 5,47 \cdot \sigma_b^2 + 4,77 \cdot \sigma_{La}^2) \quad (9.1)$$

kde

$\Omega$  je výsledná hodnota vizuálního šumu,

$\sigma_L^2$  značí rozptyl neboli varianci hodnoty  $L^*$  prostoru CIELab pro změřená data,

$\sigma_a^2$  značí rozptyl neboli varianci hodnoty  $a^*$  prostoru CIELab pro změřená data,

$\sigma_b^2$  značí rozptyl neboli varianci hodnoty  $b^*$  prostoru CIELab pro změřená data,

$\sigma_{La}^2$  značí kovarianci hodnot  $L^*$  a  $a^*$  prostoru CIELab pro změřená data.

Výstup celého měření by měl být znovu v jednotkách JND. Převodní vzorce byly sestaveny po analýze dat subjektivního experimentu se skupinou pozorovatelů, kteří hodnotili několik snímků s různými hodnotami přidaného šumu z hlediska jejich kvality, a vypadají takto:

$$QL = 0 \text{ pro } \Omega \leq 0,319 \quad (9.2)$$

$$QL = \frac{\Omega - a}{b} - \frac{c \cdot \ln(1 + b \cdot \frac{\Omega - a}{c})}{b^2} \text{ pro } \Omega > 0,319 \quad (9.3)$$

kde

$QL$  značí celkovou ztrátu kvality fotografie vlivem šumu v JND,

$\Omega$  je celková hodnota vizuálního šumu,

$a$  je konstanta 0,319,

$b$  je konstanta 0,138,

$c$  je konstanta 0,0049.

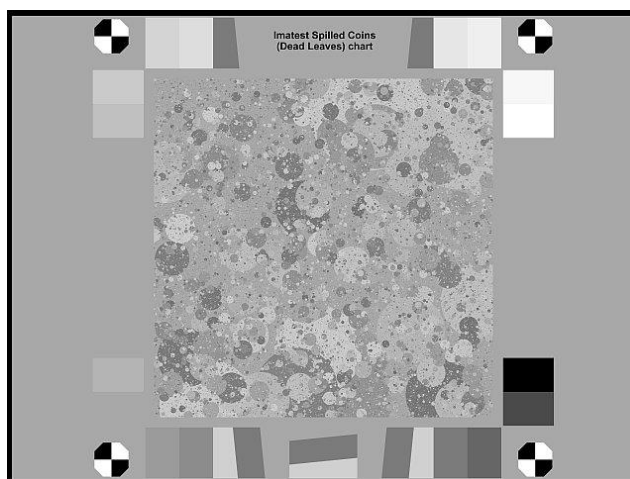
## 10. Rozostření textury

Při zpracování snímků dochází v mobilních telefonech k různým vylepšením, mezi ty patří například i odstranění šumu či doostření snímku. Algoritmy použité pro tyto účely dokážou rozeznat okraje různých objektů zachycených na fotografiích či rovné plochy. Ty pak zhodnotí tak, aby byl zachován dobrý poměr signál-šum. Při zpracování však nedochází k přidávání informace do snímku, ale k jejímu odebrání, případně nahrazování.

Problémem je, jeví-li se část obrazu jako šum, ale přitom se o šum nejedná. Tento případ nastává pro různé materiály či objekty s velmi, z hlediska barvy, nehomogenními povrchy či ve špatných světelných podmínkách. V takovém případě se algoritmus může splést a provést korekci tam, kde by být neměla. Výsledkem je pak rozmazání či ztráta kontrastu části obrazu, ve které se objekt nachází [1]. Texture blur neboli rozostření textury je parametr, který tyto změny (ztrátu kvality) hodnotí.

### 10.1. Obrazec a osvětlení

K měření se používá takzvaný *dead leaves patch/target* neboli obrazec napodobující chování padajícího listí (Obr. 13).



Obr. 13 - Dead leaves target [10]

Tento obrazec byl vytvořen statisticky a reprezentuje různorodost tvarů a barev, které se ve fotografiích mohou objevovat. Obsahuje náhodně rozmístěné kruhy různých velikostí a různých odstínů šedi. Důležitou vlastností tohoto obrazce je, že spektrum jeho šumu neboli NPS (Noise Power Spectrum) dodržuje určitý statistický model. Tento model, zvaný *power law for limited frequencies* ukazuje závislost výkonového spektra na prostorové frekvenci fotografie. V případě, že jsou obě osy v logaritmickém měřítku, je výše zmíněná závislost reprezentována klesající přímkou. Tu je možno ve standardu vidět.

K měření by se měly použít dva světelné zdroje s minimální rovnoměrností osvětlení 92%. Měřený obrazec by měl být umístěn uprostřed fotografie s tím, že pro fotoaparáty s rozlišením větším než 5 megapixelů by měla prostřední plocha s kruhy zabírat nejméně 1/4 zorného pole a pro fotoaparáty s menším rozlišením než 5 megapixelů by měla zabírat alespoň 1/3 zorného pole.

## 10.2. Nastavení fotoaparátu

Fotoaparát by měl být nastaven do automatického režimu, avšak komprese by měla být nastavena na minimální hodnotu, tedy maximální kvalitu fotografie, je-li to možné. Pokud fotoaparát disponuje manuálním ostřením, je možné pořídit několik snímků s různými nastaveními a z nich následně vybrat snímek s největším průměrným stupněm modulace vzhledem k prostorové frekvenci. Ta by měla být alespoň osminou vzorkovací frekvence fotoaparátu.

Měření může být ovlivněno rozlišením, velikostí clony, ohniskovou vzdáleností objektivu a použitou metodou komprese. Tyto parametry by proto měly být u výsledků měření uvedeny.

## 10.3. Výpočty a výsledky měření

Výpočty by se měly provádět na jasovém signálu snímku. Pro fotoaparáty, které neprodukuje jasovou složku signálu přímo, je možno tuto složku získat převedením signálů do jiného barevného prostoru, například CIEXYZ. Zároveň bude nejspíše potřeba výstupní signál fotoaparátu linearizovat, jelikož měření probíhá na lineárním signálu, pro který platí, že je jeho úroveň lineárně úměrná jasů scény. Tento signál v dnešní době většina fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech neprodukuje.

Pro výpočet modulační přenosové funkce lze použít vzorec:

$$MTF = \left( \frac{PSD(image) - PSD(noise)}{PSD(target)} \right)^{1/2} \quad (10.1)$$

kde

$PSD(image)$  je spektrální hustota výkonu fotografie,

$PSD(noise)$  je spektrální hustota výkonu šumu měřené fotografie,

$PSD(target)$  je spektrální výkonová hustota obrazce.

Pro výpočet funkce kontrastní citlivosti lze použít vzorec 4.2 z kapitoly 4.

Pro výpočet ostrosti textury, jenž je podobný vzorci 4.4 pro výpočet SFR, lze použít vzorec:

$$Q_T = \frac{\int_0^{v_{cut}} MTF_L(v) \cdot M(v) \cdot CSF_L(v) dv}{16,88} \quad (10.3)$$

kde

$MTF_L(v)$  značí funkci MTF v závislosti na prostorové frekvenci  $v$ ,

$M(v)$  značí funkci MTF pozorovacího zařízení v závislosti na prostorové frekvenci  $v$ ,

$CSF_L(v)$  značí funkci kontrastní citlivosti v závislosti na prostorové frekvenci  $v$ ,

$v_{cut}$  je konstanta závislá na velikosti použitého obrazce.

Pro přepočítání do jednotek JND lze použít vzorců:

$$Q_F = 0,961 - Q_T \quad (10.4)$$

$$QL = 3,83 \cdot Q_F + 52,9 \cdot Q_F^2 + 9,97 \cdot Q_F^3 \quad (10.5)$$

kde

$QL$  značí subjektivní ztrátu kvality fotografie.

Vzorce pro přepočítání ztráty kvality fotografie do subjektivních jednotek JND byl odvozen ze standardu ISO 20462 a z výsledku subjektivního testu na skupině pozorovatelů [2].



## 11. Softwarové nástroje

Na trhu je dostupných několik softwarových nástrojů, které lze použít pro měření jednotlivých metrik popsaných ve standardu CPIQ. Žádný z nich ale není v plné verzi volně dostupný.

### 11.1. Imatest

Americká firma Imatest nabízí několik produktů zabývajících se testováním fotografií. Liší se funkcími a cenou. Program Imatest Master<sup>13</sup> umožňuje analýzu více než třiceti testů zaměřujících se na barevné podání, ostrost, šum a další faktory pro hodnocení kvality fotografií.

### 11.2. IMAGING GAUGE<sup>14</sup>

Tento systém vyvinutý firmou APPLIED IMAGE je nabízen ve třech verzích a to Deployment Edition, Enterprise Edition a Engineering Edition. Každá z nich obsahuje základní balíček funkcí zaměřujících se zejména na analýzu barevného podání fotografií. S rostoucí cenou roste i počet nabízených funkcí.

### 11.3. Quick MTF<sup>15</sup>

Quick MTF je jednoduchý software použitelný k měření SFR. Oproti výše zmíněným programům je ke stažení zkušební verze. Plná verze je levnější, ale má menší nabídku funkcí..

### 11.4. DxO Analyzer<sup>16</sup>

Francouzská firma DxO Labs používá pro měření parametrů fotoaparátů systém zvaný DxO Analyzer. Tento software si firma DxO Labs vyvinula sama a je komerčně dostupný pouze po dohodě/konzultaci. DxO Labs spolupracuje s více než 100 podniky, kterým dala svůj systém k dispozici. Nejnovější verze DxO Analyzeru měří kvalitu snímků pomocí mnoha metrik, mezi které patří SFR, vizuální šum, LGD, LCD, ostrost a další. V současnosti se jedná o nejlepší systém na testování kvality fotografií.

### 11.5. Image Processing Toolbox<sup>17</sup> – Matlab

Nástrojová sada pro Matlab nacházející se pod jménem Image Processing Toolbox nabízí algoritmy, funkce a dodatečné programy sloužící pro analýzu a vizualizaci fotografií. Mezi funkce využitelné pro měření kvality snímků patří například možnost převodu barev mezi barevnými prostory či detekce hran/pozice objektů. Stejně jako Matlab samotný je i tento toolbox dostupný v několika licenčních variantách.

---

<sup>13</sup> <http://www.imatest.com/products/imatest-master/> [cit. 2017-05-18]

<sup>14</sup> <https://www.appliedimage.com/products/imaging-gauge-software-test-system> [cit. 2017-05-18]

<sup>15</sup> <http://www.quickmtf.com/> [cit. 2017-05-18]

<sup>16</sup> <http://www.dxo.com/us/image-quality-evaluation/dxo-analyzer> [cit. 2017-05-18]

<sup>17</sup> <https://www.mathworks.com/products/image.html> [cit. 2017-05-18]

## 11.6. iQ-Analyzer<sup>18</sup>

Tento software od německé firmy Image Engineering obsahuje několik modulů, jež obsahují různé funkce. Lze zakoupit kompletní softwarový balík obsahující všechny moduly, kombinaci vybraných modulů či pouze jeden modul. Zákazník díky tomu nemusí platit za funkce, které nebude potřebovat. Pomocí iQ-Analyzeru lze měřit například SFR, viditelný šum, LCD a další.

Tab. 3 - Srovnání funkcí jednotlivých programů

	SFR	Barevná vada	Barevná sytost	Barevná uniformita	Geometrické zkreslení	Viditelný šum	Rozostření textury
Imatest	•	•	•	•	•	•	•
IMAGE GAUGE			•	•			
Quick MTF	•						
DxO Analyzer	•	•	•	•	•	•	•
iQ-Analyzer	•	•	•	•	•	•	

V tabulce (tab. 3) lze vidět porovnání funkcí jednotlivých nabízených programů používaných k analýze obrazové kvality fotoaparátů. Tabulka byla vytvořena z informací uvedených na webových stránkách jednotlivých výrobců, nemusí proto být zcela korektní.

V tabulce není uveden Image Processing Toolbox od Matlabu, jelikož obsahuje pouze funkce a algoritmy, které se k analýze dají použít. Uživatel si musí zvolené měření implementovat sám.

---

<sup>18</sup> <https://www.image-engineering.de/products/software/376-iq-analyzer> [cit. 2017-05-18]

## 12. Měření prostorové frekvenční charakteristiky

Tato část zahrnuje přípravu laboratorní úlohy pro měření SFR dle výše uvedené metody. Součástí je implementace výpočetního nástroje v prostředí Matlab a návrh testovacího obrazce, na kterém měření probíhá. Další částí je změření stanovené charakteristiky na vybraném vzorku fotoaparátů a vyhodnocení výsledků měření.

### 12.1. Implementace výpočetního nástroje

Skript sloužící k výpočtu SFR vychází ze standardu ISO 12233. Tento skript [11] jsem upravil podle pokynů stanovených ve standardu CPIQ. Funkci skriptu znázorňuje vývojový diagram (obr. 14). Samotný skript se skládá z několika bloků.

První čtyři bloky, tedy *načtení parametrů fotografie*, *zadání parametrů měření*, *výběr fotografie* a *označení oblastí měření*, jsou závislé na vstupu uživatele. Načtením fotografie v prvním bloku dojde k získání DPI<sup>19</sup> fotografie. Následně je uživatel vyzván k zadání dalších potřebných údajů k výpočtu, mezi něž patří zejména informace o zařízení, na němž bude fotografie hodnocena. Ve třetím a čtvrtém kroku je vyzván k výběru fotografie a konkrétních oblastí, na kterých chce, aby následně měření probíhalo. Tyto údaje jsou uloženy pro použití ve výpočetní části algoritmu.

Řetězec bloků od bloku s názvem *zjištění OECF* po blok pojmenovaný *FFT a normalizace dat* se stará o samotný výpočet SFR. Celý proces se odehrává ve funkci a pro jeden průchod algoritmem, tedy pro jeden výpočet SFR, ho lze popsat následovně.

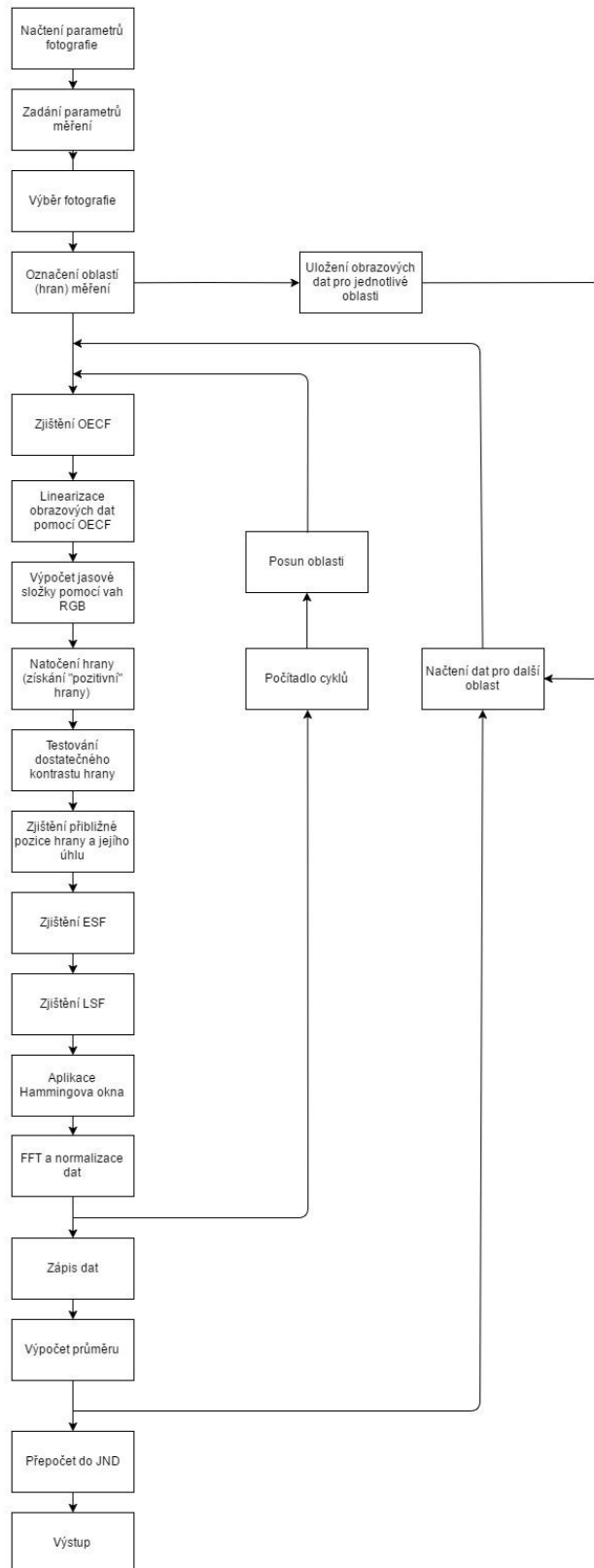
Po výběru hrany dojde k transformaci pomocí OECF, tím se zajistí kompenzace nelineární fotometrické odezvy fotoaparátu. Následně je vypočtena jasová hodnota každého pixelu pomocí váhovaného součtu RGB hodnot jednotlivých pixelů (vzorec 4.1). Jaké váhování je použito záleží na vstupu uživatele ve druhém bloku skriptu. Z jasových hodnot je přes výpočet první derivace pomocí FIR filtru a výpočtu těžiště pro každý řádek dat zjištěna přibližná pozice a natočení hrany. Obrazová data jsou následně promítána podél směru hrany pro vytvoření tzv. ESF (edge-spread function). Vytvořením ESF dojde k převzorkování, čímž se sníží vliv aliasingu na měřené SFR [12].

Derivací ESF, se získá tzv. LSF (line-spread function), na níž se aplikuje Hammingovo okno. Následnou FFT (Fast Fourier Transform) a normalizací získáme jako výstup měřené SFR. Tato část skriptu vychází ze standardu ISO 12233 [12].

Celý výpočetní algoritmus se v případě skriptu pod názvem `sfrmatpop` opakuje třicet dva krát pro okolní data vybrané oblasti. Aritmetický průměr všech vypočtených hodnot se považuje za výsledné SFR. Skript pod názvem `sfrmatpop2` průměrování neobsahuje. Díky tomu je možné vybrat větší oblast, jelikož se s ní následně nijak po obrazci nepohybuje. Celá výpočetní část skriptu se opakuje pro všechny 3 vybrané oblasti. Data jsou následně převedena podle vzorců v kapitole 4. Prostorová frekvenční charakteristika do jednotek JND pro subjektivní hodnocení ztráty kvality fotografie.

---

<sup>19</sup> DPI (Dots Per Inch) je v tomto případě stejně jako PPI (Pixels Per Inch) údaj udávající hustotu obrazových bodů (pixelů) na palec. DPI je potřeba k přepočtu prostorové frekvence z cyklů na mm (cy/mm) na cykly na stupeň (cy/degrese).



Obr. 14 - Vývojový diagram skriptu určeného na měření SFR

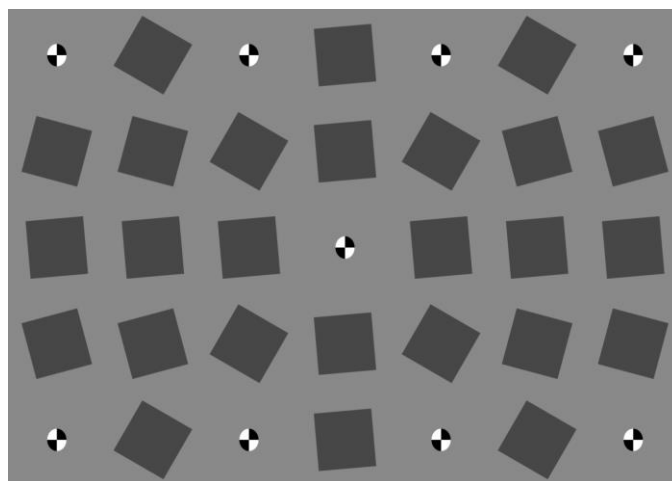
## 12.2. Návrh testovacího obrazce

Jelikož nebylo možné získat testovací obrazec (obr. 2), navrhl jsem v grafickém editoru GIMP (verzi 2.8.16) obrazec vlastní (obr. 15). Ten splňuje parametry uvedené ve standardu CPIQ. Kontrast na hranách čtverců měl být mezi 0,55 a 0,65. Natočení prostředních čtyř čtverců by mělo být  $5^\circ \pm 2^\circ$ . Natočení ostatních čtverců není podrobně definováno. Rozlišení závisí na velikosti obrazce a předpokládaném rozlišení testovaných fotoaparátů (tab. 4).

Tab. 4 - Požadované rozlišení testovacího obrazce

velikost obrazce	velikost senzoru			
	24 MP	16 MP	8 MP	5 MP
	minimální frekvence [cy/mm] s 80% SFR			
A2	5,43	4,07	2,74	2,17
A3	7,67	5,75	3,88	3,07
A4	10,85	8,13	5,48	4,33
A5	15,3	11,5	7,74	6,12
A6	21,5	16,1	10,89	8,61
	minimální frekvence [l/mm] s 80% SFR			
A2	10,86	8,14	5,48	4,34
A3	15,34	11,5	7,76	6,14
A4	21,7	16,26	10,96	8,66
A5	30,6	23	15,48	12,24
A6	43	32,2	21,78	17,22

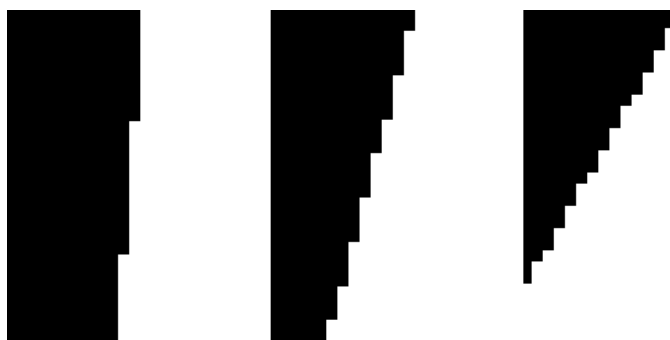
Mnou navržený obrazec (viz příloha) splňuje všechny parametry a to pro rozlišení měřeného fotoaparátu do 24 megapixelů, při minimální velikosti obrazce  $20,2 \times 29,7$  cm (tedy velikosti papíru A4).



Obr. 15 - Testovací obrazec pro měření SFR

Samotný obrazec tvoří 26 čtverců tmavě šedé barvy a 7 černobílých terčů na světle šedém pozadí. Barevná kombinace byla převzata z materiálu o standardu CPIQ. Díky tomu je zaručeno splnění podmínky minimálního kontrastu v celém obrazci.

Jednotlivé čtverce jsou v obrazi rozmístěny do mřížky. Vzdálenost mezi středy čtverců je konstantní, avšak vzdálenosti středů čtverců od středu obrazce jsou rozdílné, což umožňuje měření SFR v různých částech (senzoru) fotoaparátu. Čtverce jsou natočeny o  $\pm 5$ ,  $\pm 15$  a  $\pm 30$  stupňů, což má za účel vyhodnotit, jak dobře si dokáže měřený přístroj zachovat ostrost vzhledem k míře natočení. Lze předpokládat, že se výsledky měření budou pro různá natočení lišit, jelikož pro fotoaparáty není snadné zachytit přesně, a hlavně ostře, velké natočení. Rozdíly v tom, jak jednotlivé pixely uchovávají barvu při natočení, jsou patrné na obr. 16. Z něj též vyplývá, že je pravděpodobnější rozmazání hran v případě větších úhlů.



*Obr. 16 - Natočení*

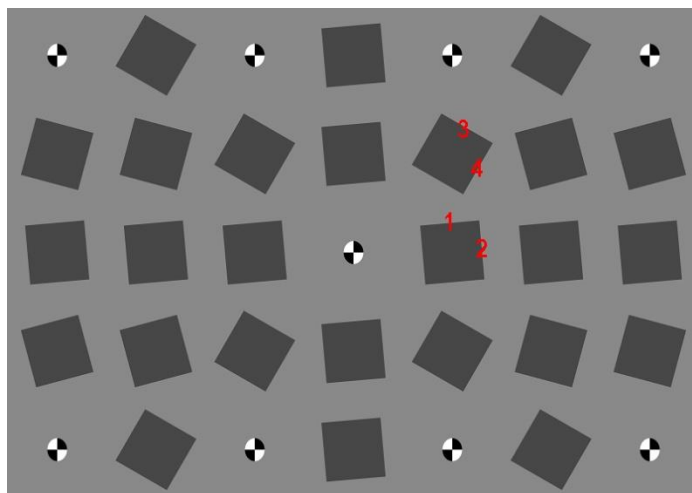
Při tisku je třeba dbát na splnění podmínky odrazivosti, která v případě světle šedé části činí 0,15 – 0,25 a v případě hran čtverců 0,12 – 0,25. Standard CPIQ dále doporučuje tisk obrazce o šířce 20 – 40 palců (50,8 – 101,6 cm). Mnou navržený obrazec byl vytištěn na papír s malou odrazivostí, jejíž přesnou hodnotu bohužel neznám, o rozměrech 20,2 × 29,7 cm.

### **12.3. Ukázka měření SFR ověřující funkčnost algoritmů dle návodu v příloze B**

Tato část se zabývá měřením SFR na vybraných vzorcích mobilních telefonů v předepsaných podmínkách, respektive v prostředí, které tyto podmínky nespĺňuje.

K testování jsem si vybral telefony nižší a střední třídy, konkrétně přístroje Motorola Moto G3, Motorola Moto E2, Alcatel One Touch Idol 3 a Samsung Galaxy S3 mini. Testování proběhlo bez dodatečných světelných zdrojů, tedy pouze se slunečním osvětlením. Přístroj Motorola Moto G3 jsem otestoval také při špatném zaostření a ve špatných světelných podmínkách.

Všechna zařízení byla nastavena na maximální možné rozlišení, minimální kompresi a automatický režim. Jako vyhodnocovací zařízení byl použit 14 palcový notebook značky Lenovo s FullHD rozlišením, tedy 1920 x 1080. Pozorovací vzdálenost činila 50 cm a konstanta  $k_{disp}$  (tab. 1) byla zvolena 0,022. Pořízené fotografie jsou přiloženy v příloze. Hrany, na kterých testování probíhalo, lze vidět na obr. 17 a výsledky měření v tab. 5. K získání jednotlivých hodnot byl použit skript `sfrmatpop`, tedy skript obsahující průměrování hodnot. Výsledky měření jsou čistě orientační, jelikož algoritmus pro výpočet nepodává konstantní výstupy.



Obr. 17 - Oblasti měření SFR

Tab. 5 - Výsledky měření SFR na vybraném vzorku přístrojů

mobilní telefon	rozměry fotografie	zaostření	osvětlení	místo měření			
				1	2	3	4
Motorola Moto E2	2560 x 1920	dobré	ucházející	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034
Alcatel Idol 3	4096 x 2304	ucházející	ucházející	0,0034	0,0034	6	0,0034
Motorola Moto G3	4160 x 3120	dobré	dobré	0,0034	0,0034	0,0034	0,0034
Motorola Moto G3	4160 x 3120	špatné	špatné	21	20	25	22
Motorola Moto G3	4160 x 3120	špatné	ucházející	7	11	18	13
Samsung Galaxy S3 mini	2560 x 1920	dobré	dobré	0,0034	0,0034	5	0,0034

Hodnota 0,0034 značí nejnižší ztrátu kvality fotografie. Porovnáme-li zbylé hodnoty se stupnicí viditelnou na obr. 1 (strana 10), zjistíme, že při ucházejících světelných podmínkách dosahují všechna testovaná zařízení dobrých výsledků.

Dále lze pozorovat několik jevů. Z porovnání mobilních telefonů Motoroly Moto E2 a Samsung Galaxy S3 mini je například patrné, že i při horších světelných podmínkách je novější Motorola schopna vyprodukovat z hlediska ostrosti lepší fotografie, při stejném rozlišení fotoaparátu.

I přes horší zaostření Alcatelu je zřejmé, že při pozorování na FullHD monitoru není špatná ostrost příliš znatelná, a to hlavně díky vyššímu rozlišení fotografie.

Porovnáme-li výsledky měření u Motoroly Moto G3 zjistíme, že správné osvětlení obrazce úzce souvisí s kvalitou zaostření a tedy i ztrátou kvality fotografie. Při špatném osvětlení navíc dochází nejen k rozmazání hran, ale k celkové ztrátě kontrastu fotografie, což zhoršuje výsledky měření. To je patrné i z grafů SFR (příloha C, obr. 24, obr. 25 a obr. 26).

## 13. Měření barevné uniformity

Tato část zahrnuje popis implementace a otestování výpočetního nástroje v prostředí Matlab.

### 13.1. Implementace výpočetního nástroje

Podle postupu zmíněného v kapitole 7 byl navržen skript na výpočet barevné uniformity, jehož vývojový diagram lze vidět na obr. 18.



Obr. 18 - Vývojový diagram skriptu určeného na měření barevné uniformity

Po načtení fotografie a zjištění její velikosti a poměru stran je zvolena velikost jednoho bloku pixelů, v nichž se bude provádět průměrování. Následně se rozdělí obrazová data do jednotlivých barevných kanálů RGB. Každý barevný kanál je poté rozdělen do mřížky o velikosti jednoho bloku podle poměru stran fotografie a v každém bloku je vypočtena průměrná barevná hodnota. Průměrné hodnoty jednotlivých kanálů jsou následně převedeny do barevného prostoru CIE Lab (obr. 7).

Z průměrných hodnot jednotlivých bloků je vypočten celkový průměr barevných souřadnic  $a^*$  a  $b^*$ . Pomocí vzorce (7.1) je zjištěna odchylka jednotlivých bloků od celkové průměrné hodnoty. Dosazením do vzorce (7.2) získáme největší odchylku, pomocí které po dosazení do vzorců (7.3) a (7.4) získáme celkovou ztrátu kvality fotografie.

### 13.2. Otestování výpočetního nástroje

Jelikož se mi nepodařilo získat obrazec na měření barevné uniformity, rozhodl jsem se otestovat výpočetní algoritmus na snímcích z webové stránky<sup>20</sup> zabývající se porovnáním barevné uniformity televizních přijímačů. Dostupné obrázky byly pro mé účely dostačující.

### 13.3. Ukázka měření barevné uniformity

Místo obrazce pro měření uniformity jsem na dvou přístrojích nafotil nejjednodušší šedou plochu, kterou jsem měl k dispozici (šedý papír formátu A4). Jako měřené přístroje byly použity Motorola Moto G3 a Samsung Galaxy S3 mini. Testování proběhlo se slunečním osvětlením. K výpočtu byl použit skript s názvem `Uniformity`, jehož vývojový diagram je vidět na obr. 18.

Ztráta kvality fotografie u mobilního telefonu Samsung byla za testovaných podmínek nulová. V případě Motoroly byla ztráta nepatrná a to 0.155 JND. Oba výsledky můžeme nazvat za vynikající. V potaz je však třeba brát, že obrazec, na kterém testování probíhalo, neodpovídal požadavkům stanoveným v kapitole 7. Byly by tyto podmínky splněny, výsledky měření by se však nejspíše příliš nezměnily.

---

<sup>20</sup> <http://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/gray-uniformity-dirty-screen-effect-dse> [cit. 2017-05-18].



## 14. Závěr

Tato práce popisuje metody určené pro měření parametrů digitálních fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech dle nového standardu IEEE STANDARD 1858-2016 - IEEE Standard for Camera Phone Image Quality (CPIQ), jehož široké uplatnění se předpokládá v následujících letech. Každá uvedená metrika hodnotí jeden z aspektů kvality fotografií. Popisuji zde nejen, proč byly vybrány právě tyto metriky, ale též postupy, jakými by mělo měření probíhat, a jaké přístroje, pomůcky a výpočty by měly být použity. Výsledky jednotlivých měření by pak měly dát jednotlivým fotoaparátům jasné a srozumitelné hodnocení. Toho je docíleno přepočtem výsledků jednotlivých testů do jednotek JND, které slouží pro subjektivní hodnocení ztráty kvality fotografií.

V praktické části jsem navrhl obrazec pro měření SFR<sup>21</sup> a v Matlabu napsal skript pro jeho vyhodnocení. Skript, který byl nakonec k výpočtu SFR použit, je kombinací volně dostupného skriptu [11][13] a vlastní implementace podle úprav stanovených ve standardu CPIQ. Při programování skriptu jsem narazil hned na několik problémů. Jedním z nich bylo správné pochopení všech výrazů potřebných k výpočtu. V draftu standardu, s kterým jsem pracoval, se objevuje hned několik ne příliš zřejmých veličin, jejichž přesnou funkci jsem musel najít. Dalším problémem jsou výstupy, které ze skriptu vycházejí. Ty stále nejsou optimální a mnohdy se stává, že se na jedné hraně obrazce naměří velké rozpětí výsledných hodnot. Tuto potíž jsem se pokusil vyřešit pohybem uživatelem vybrané oblasti a následným průměrováním výsledků. Tento postup problém nevyřešil úplně, zajistil však o něco přesnější výsledky měření. Výsledky měření velmi závisí na volbě konstant a vybraném pozorovacím zařízení. Čím větší je rozlišení displeje či kvalita výtisku, na němž fotografie pozorujeme, tím více je patrná ztráta kvality měřených fotografií.

Do skriptu by bylo možné přidat algoritmy, které by většinu problémů vyřešily. Patří mezi ně například algoritmus, který by velké výchyly hodnot před průměrováním odstraňoval, případně SFR funkci vyhladil, a tím ještě výsledky měření vylepšil. V neposlední řadě bude zlepšením skriptu lepší popis konstant a funkcí ve standardu CPIQ. V podobě, v níž je skript nyní, jsou výstupy z něj spíše orientační.

Mnohem jednodušší skript k výpočtu barevné uniformity byl navržen podle informací ve standardu CPIQ. Jeho funkčnost byla ověřena a na rozdíl od skriptu pro výpočet SFR podává dobré výsledky.

---

<sup>21</sup> O možnosti zakoupení obrazce jsem komunikoval s francouzskou firmou DxO Labs, která se měřením parametrů fotoaparátu zabývá. Zástupce firmy mi podal finanční nabídku na nákup dvou obrazců ze standardu CPIQ, avšak nakonec nedošlo k zakoupení ani jednoho z nich. Firma DxO Labs však ukázala ochotu spolupracovat s naší fakultou, což beru za jedno z pozitiv této práce.

## 15. Použitá literatura

- [1] PELTOKETO, Veli-Tapani. *Benchmarking of Mobile Phone Cameras*. Helsinki: Vaasan yliopisto, 2016. Acta Wasaensia. ISBN 978-952-476-685-2. Disertační práce. Dostupné také z: [http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn\\_978-952-476-685-2.pdf](http://www.uva.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-685-2.pdf)
- [2] P1858/D2. *IEEE Approved Draft Standard for Camera Phone Image Quality (CPIQ)*. New York: IEEE, 2016. Dostupné v Univerzitní knihovně Technické univerzity v Liberci.
- [3] BELSKA, Margaret. IEEE P1858 CPIQ Overview. *Imatest* [online]. Boulder: IEEE, c2004-2017, aktualiz. 2016-02-15 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: [www.imatest.com/wp.../CPIQ\\_Overview\\_15Feb2016\\_FINAL.pdf](http://www.imatest.com/wp.../CPIQ_Overview_15Feb2016_FINAL.pdf)
- [4] JIN, Elaine a Philip CORRIVEAU. IEEE CPIQ Standard Updates. *Video Quality Experts Group (VQEG)* [online]. Boulder: VQEG, aktualiz. 2015-09-14 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: [ftp://vqeg.its.bldrdoc.gov/Documents/VQEG\\_Glasgow\\_Sept15/MeetingFiles/VQEG\\_LIAISON\\_2015\\_121\\_IEEE\\_CPIQ\\_updates\\_4VQEG\\_Sept2015\\_Intel.pdf](ftp://vqeg.its.bldrdoc.gov/Documents/VQEG_Glasgow_Sept15/MeetingFiles/VQEG_LIAISON_2015_121_IEEE_CPIQ_updates_4VQEG_Sept2015_Intel.pdf)
- [5] Tutorials: Sharpness. *Cambridge in colour* [online]. Cambridge in Colour, ©2005-2017 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/sharpness.htm>
- [6] NADENAU, Marcus J., Julien REICHEL a Murat KUNT. Wavelet-based color image compression: exploiting the contrast sensitivity function. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2003, 12(1), 58-70. DOI 10.1109/TIP.2002.807358. ISSN 1057-7149. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1187359/>
- [7] BRIGGS, David. The Difference Between Chroma and Saturation. *Munsell Color System; Color Matching from Munsell Color Company* [online]. Grand Rapids: Munsell Color, ©2017 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://munsell.com/color-blog/difference-chroma-saturation/>
- [8] GUNDLACH, Mark. Tolerancing on flexo and offset printing. *X-Rite Color Blog - Your Color. Always In Harmony* [online]. Tokyo: X-Rite, ©2016, aktualiz. 2015-06-15 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://blog.xrite.com/tolerancing-in-flexo-and-offset-printing/>
- [9] TE197 [obrázek online]. *Image Engineering - Solutions to test image Quality* [online]. Frechen: Image Engineering - Solutions to test image Quality, ©2017 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <https://www.image-engineering.de/products/charts/all/520-te197>
- [10] The Imatest Spilled Coins (Dead Leaves) chart [obrázek online]. *Imatest* [online]. Boulder: IEEE, c2004-2017 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://www.imatest.com/docs/random/>
- [11] BURNS, Peter D. Matab source (zip file) [MATLAB skript]. Peter D. BURNS. LosBurns [online]. [2015], aktualiz. 2015-05-12 [cit. 2017-05-15] Dostupné z: [http://losburns.com/imaging/software/SFRedge/sfrmat3\\_post/src/sfr3.zip](http://losburns.com/imaging/software/SFRedge/sfrmat3_post/src/sfr3.zip)
- [12] BURNS, Peter D. Slanted-edge MTF for digital camera and scanner analysis. In: *Proceedings IS&T PICS Conference*. Society for Imaging Science & Technology, 2000, s. 135-138. Dostupné také z: <http://www.losburns.com/imaging/pbpubs/26pics2000burns.pdf>

[13] BURNS, Peter D. sfrmat3: SFR evaluation for digital cameras and scanners. Peter D. BURNS. LosBurns [online]. [2015], aktualiz. 2015-05-12 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: [http://losburns.com/imaging/software/SFRedge/sfrmat3\\_post/index.html](http://losburns.com/imaging/software/SFRedge/sfrmat3_post/index.html)

## 16. Seznam obrázků a tabulek

### 16.1. Seznam obrázků

Obr. 1 - Porovnání kvality fotografií dvou přístrojů [4].....	10
Obr. 2 - Obrazec pro měření SFR pro fotoaparáty s větším rozlišením než VGA [4] .....	13
Obr. 3 - Převod objektivních hodnot na subjektivní ztrátu kvality .....	16
Obr. 4 - Lateral chromatic displacement [1].....	17
Obr. 5 - Graf LCD [4] .....	19
Obr. 6 - ColorChecker Digital SG [3][4].....	20
Obr. 7 - Barevný prostor CIELab [8] .....	21
Obr. 8 - Převod objektivních hodnot na subjektivní ztrátu kvality .....	22
Obr. 9 - Uniformní obrazec/plocha [4].....	23
Obr. 10 - Typy geometrické deformace [3][4] .....	25
Obr. 11 - OECF Test Chart (ISO 14524) kontrast 80:1 [9].....	27
Obr. 12 - Vývojový diagram pro měření viditelného šumu [4].....	28
Obr. 13 - Dead leaves target [10] .....	30
Obr. 14 - Vývojový diagram skriptu určeného na měření SFR.....	36
Obr. 15 - Testovací obrazec pro měření SFR.....	37
Obr. 16 - Natočení .....	38
Obr. 17 - Oblasti měření SFR.....	39
Obr. 18 - Vývojový diagram skriptu určeného na měření barevné uniformity .....	40
Obr. 19 - Uspořádání měřicího pracoviště .....	48
Obr. 20 - Dialogové okno pro výběr parametrů .....	49
Obr. 21 - Dialogové okno pro výběr parametrů .....	50
Obr. 22 - Okno pro výběr oblastí měření .....	50
Obr. 23 – Grafy SFR, CSF a M.....	51
Obr. 24 - Průběh SFR pro dobré podmínky měření (Moto G3) .....	52
Obr. 25 - Průběh SFR pro špatné zaostření (Moto G3) .....	52
Obr. 26 - Průběh SFR pro špatné světelné podmínky (Moto G3) .....	52

### 16.2. Seznam tabulek

Tab. 1 - Volba konstant v závislosti na podmínkách prohlížení .....	15
Tab. 2 - Hodnoty konstant pro výpočet QL.....	22
Tab. 3 - Srovnání funkcí jednotlivých programů .....	34
Tab. 4 - Požadované rozlišení testovacího obrazce.....	37
Tab. 5 - Výsledky měření SFR na vybraném vzorku přístrojů.....	39
Tab. 6 - Standardy ISO/IEC pro měření parametrů digitálních fotoaparátů.....	45
Tab. 7 - Volba konstant v závislosti na podmínkách prohlížení .....	47

## Příloha A. Tabulka standardů

Tab. 6 - Standardy ISO/IEC pro měření parametrů digitálních fotoaparátů

Označení	Název	Zaměření	Využito při měření
ISO 7589:2002	Photography - Illuminants for sensitometry - Specifications for daylight, incandescent tungsten and printer	udává požadavky na osvětlení pro jednotlivá měření	Barevné uniformity, Barevné sytosti, Viditelného šumu
ISO 12233:2017	Photography - Electronic still picture imaging - Resolution and spatial frequency responses	popisuje měření SFR	SFR
ISO 14524:2009	Photography - Electronic still-picture cameras - Methods for measuring opto-electronic conversion functions (OECFs)	popisuje metody pro měření OECF (udává směrnice pro měření s testovacími obrazci)	SFR, Viditelného šumu, Rozostření textury
ISO 15739:2013	Photography - Electronic still-picture imaging - Noise measurements	popisuje metody určené k měření šumu (metody však nejsou vhodné pro měření šumu u digitálních fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech)	Viditelného šumu
ISO 20462-1:2005	Photography - Psychophysical experimental methods for estimating image quality - Part 1: Overview of psychophysical elements	popisuje metody převodu jednotlivých veličin do jednotek JND	SFR, LCD, Barevné sytosti, LGD, Viditelného šumu, Rozostření textury
IEC 61966-2-1:1999	Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB	popisuje barevný prostor sRGB (včetně transformace do prostoru CIEXYZ)	SFR, Rozostření textury

# Příloha B. Laboratorní úloha - měření SFR

## 1. Úkol měření

Hlavním cílem této úlohy je změřit prostorovou frekvenční charakteristiku SFR (Spatial Frequency Response) digitálních fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech podle draftu standardu IEEE 1858-2016 (IEEE Standard for Camera Image Quality (CPIQ)) [1].

1. Seznamte se s vybranými modely mobilních telefonů, zejména pak s funkcemi a nastaveními fotoaparátů
2. Sestavte systém pro snímání testovacího obrazce mobilními telefony
3. Sejměte testovací snímky pro všechny vybrané modely mobilních telefonů
4. Vyhodnoťte sejmuté snímky a výsledky jednotlivých modelů porovnejte

## 2. Vybavení pracoviště

- Mobilní telefony
- Vhodné osvětlení
- Testovací obrazec pro měření SFR
- Stativ

## 3. Teoretický úvod

Prostorová frekvenční charakteristika (dále jen SFR) je měřítkem rozlišení a ostrosti fotografie. Ostrost je subjektivní vjem, který lidské oko vyhodnocuje prostřednictvím kontrastu hran objektů zachycených na fotografii. Vyšší kontrast v kombinaci s vyšším rozlišením dodává dojem vyšší ostrosti obrazu. Při příliš velkém zvětšení kontrastu může dojít k přeostření. Fotografie se pak jeví nepřírodně. Při příliš malém kontrastu se může naopak snímek jevit rozmazaně [2].

SFR, někdy též označováno jako MTF (Modulation Transfer Function – Modulační přenosová funkce) popisuje, jak dobře se přenesou prostorové frekvence scény do výsledného snímku. U ideálního systému by došlo ke sto procentnímu přenosu kontrastu u každé prostorové frekvence, dnešní fotoaparáty však za ideální považovat nelze. Čím je snímaná prostorová frekvence vyšší, tím menší kontrast bývá při snímání detekován [1][3]. Výsledná křivka (obr. 23), která tento pokles značí, se nazývá SFR.

Testovací obrazec, viditelný na obr. 22, umožňuje měřit pokles kontrastu a tedy i ostrosti snímku na hranách tmavě šedých čtverců. Výsledný průběh SFR je převeden pomocí vzorců 1 až 6 na subjektivní hodnocení ztráty kvality fotografií v jednotkách JND (Just Noticeable Difference - Právě pozorovatelný rozdíl) [1].

Funkce kontrastní citlivosti (CSF – Contrast Sensitivity Function) udává, jak vnímá naše zrakové ústrojí kontrast v závislosti na prostorové frekvenci v cyklech na stupeň [cy/degree]. Maximální citlivosti dosahuje funkce v okolí 4 cyklů na stupeň, tedy lidské zrakové ústrojí je při této hodnotě nejvíce choulostivé na změny kontrastu [4].

$$CSF(v) = av^c e^{-bv} \quad (1)$$

kde

$a$  je konstanta 1,

$b$  je konstanta 0,2,

$c$  je konstanta 0,8,

$v$  značí prostorovou frekvenci snímku v cyklech na stupeň [cy/degree].

$$Q = \frac{\int_0^{v_{cut}} SFR(v)M(v)CSF(v)dv}{16,88} \quad (2)$$

kde

$SFR(v)$  značí funkci SFR v závislosti na prostorové frekvenci  $v$ ,

$M(v)$  značí funkci MTF pozorovacího zařízení v závislosti na prostorové frekvenci  $v$ ,

$v_{cut}$  je konstanta závislá na velikosti použitého obrazce.

Pro aproximaci  $M(v)$  lze použít jeden ze vzorců:

$$M(v) = M_{disp}(v) = \left| \frac{\sin(\pi k_{disp} v)}{\pi k_{disp} v} \right| \quad (3)$$

$$M(v) = M_{print}(v) = \exp\left(-\frac{v}{k_{print}}\right) \quad (4)$$

kde

$k_{disp}$  je konstanta závislá na typu a velikosti zobrazovacího zařízení (tab. 7),

$k_{print}$  je konstanta závislá na typu a velikosti výtisku (tab. 7).

Tab. 7 - Volba konstant v závislosti na podmínkách prohlížení

	Podmínky prohlížení				
	Počítačový monitor (100% jas, 100 ppi)	4,5 palcový displej mobilního telefonu	30 palcový 4k displej	Výtisk o rozměrech 10×15 cm	Výtisk o rozměrech 40×60 cm
$k_{disp}$	0,0243	0,0176	0,02	×	×
$k_{print}$	×	×	×	21,8	65,4

$$B = \begin{cases} 0 & \text{pro } Q > 0,886 \\ 0,886 - Q & \text{pro } Q \leq 0,886 \end{cases} \quad (5)$$

$$QL = \frac{0,00336 - 2,34 \cdot B + 164 \cdot B^2 - 192 \cdot B^3 + 16,3 \cdot B^4}{1 - 0,0866 \cdot B + 0,968 \cdot B^2 - 2,31 \cdot B^3} \quad (6)$$

kde

$B$  značí hodnotu rozmazání hrany,

$QL$  značí celkovou ztrátu kvality fotografie v JND.

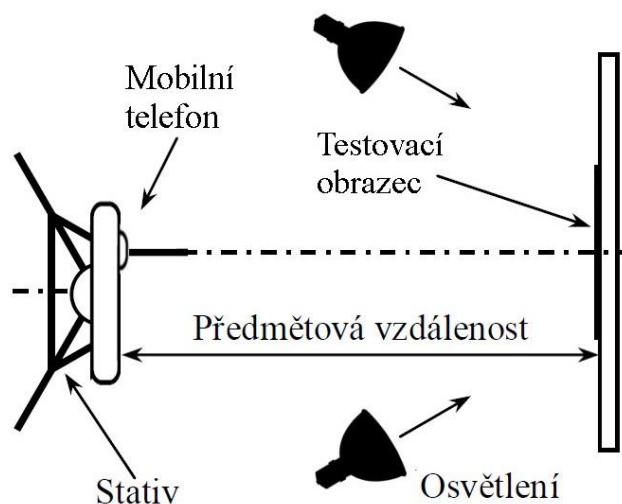
#### 4. Postup měření

##### 4.1. Seznamte se s vybranými modely mobilních telefonů, zejména pak s funkcemi a nastaveními fotoaparátů

Seznamte se s funkcemi a nastavením fotoaparátů vybraných vzorků mobilních telefonů. Lze-li to, nastavte všechny fotoaparáty do automatického režimu. Je-li v nastavení možnost změny komprese fotoaparátu, nastavte ji na minimální hodnotu. Komprese má značný vliv na výsledky měření, proto by měla být u výsledků její hodnota uvedena.

##### 4.2. Sestavte systém pro snímání testovacího obrazce mobilními telefony

Měřicí pracoviště by mělo být sestaveno podle obr. 19. Není-li možno použít tuto konfiguraci, lze použít i jinou, tu je však potřeba uvést k výsledkům měření.



Obr. 19 - Uspořádání měřícího pracoviště



### 4.3. Sejměte testovací snímky pro všechny vybrané modely mobilních telefonů

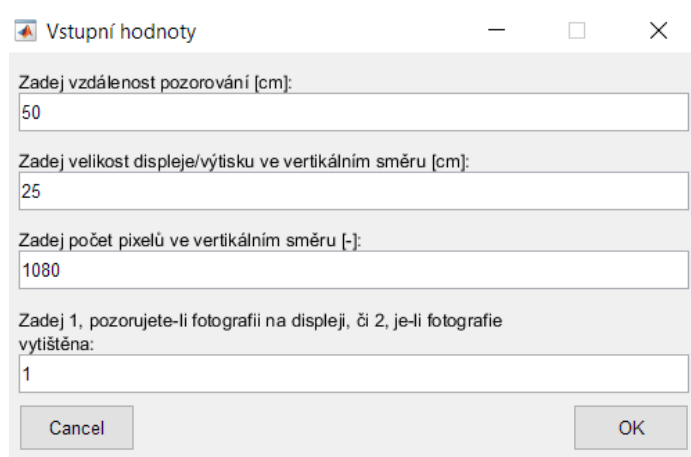
Pořídte dobře orámovaný snímek, zaostřený doprostřed obrazce. Dejte pozor na změnu světelných podmínek, pohyb mobilního telefonu při snímání a nastavení vyvážení bílé. Je-li vše v pořádku, přesuňte fotografie do počítače, na němž budete snímky vyhodnocovat. Dejte pozor na kompresi snímků při přenosu použitím online služeb. Místo nich se doporučuje přesun pomocí datového kabelu či Bluetooth.

### 4.4. Vyhodnoťte sejmuté snímky a výsledky jednotlivých modelů porovnejte

Vybrané snímky vložte do složky v počítači, otevřete Matlab a jako výchozí adresář nastavte složku, v níž je skript. Skript otevřete a spusťte.

Po spuštění skriptu budete vyzváni k vybrání fotografie, na níž bude následné měření probíhat. Z této fotografie skript zjistí hodnotu dpi fotografie, kterou poté dosadí do funkce pro výpočet SFR. Do následujících dialogových oken (obr. 20 a obr. 21) zadejte hodnoty týkající se zařízení, na kterém budete fotografie/přístroje porovnávat. V závislosti na těchto hodnotách dojde k přepočtu cyklů na mm na jednotku cykly na stupeň, výpočtu CSF (vzorec 1), M (vzorce 3 a 4) a finální hodnoty JND (vzorec 6).

Podle čísla zadaného ve spodní části prvního dialogového okna dojde k volbě mezi funkcí M (vzorec 3) pro displeje zařízení nebo funkcí M (vzorec 4) pro výtisky. Pozorujete-li měřené fotografie na displeji počítače, dosad'te do oken vzdálenost od displeje monitoru, vertikální velikost monitoru v centimetrech, počet pixelů monitoru ve vertikálním směru a konstantu z tabulky.



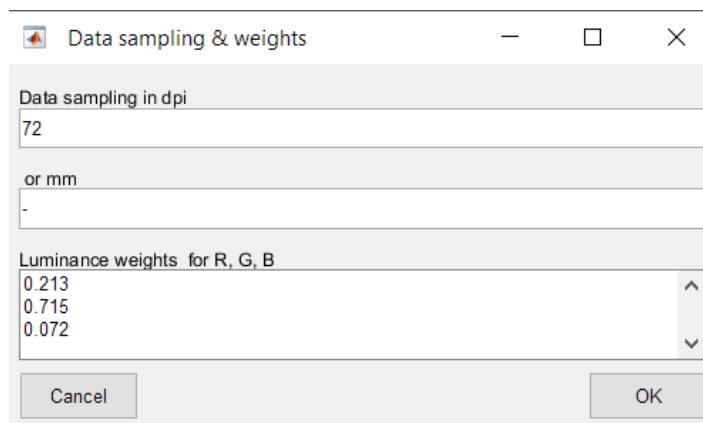
The image shows a dialog box titled "Vstupní hodnoty" (Input values) with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). It contains four input fields with the following labels and values:

- Label: "Zadej vzdálenost pozorování [cm]:" (Enter observation distance [cm]); Value: 50
- Label: "Zadej velikost displeje/výtisku ve vertikálním směru [cm]:" (Enter display/print size in vertical direction [cm]); Value: 25
- Label: "Zadej počet pixelů ve vertikálním směru [-]:" (Enter number of pixels in vertical direction [-]); Value: 1080
- Label: "Zadej 1, pozorujete-li fotografii na displeji, či 2, je-li fotografie vytištěna:" (Enter 1 if viewing photo on display, or 2 if printed); Value: 1

At the bottom of the dialog box, there are two buttons: "Cancel" on the left and "OK" on the right.

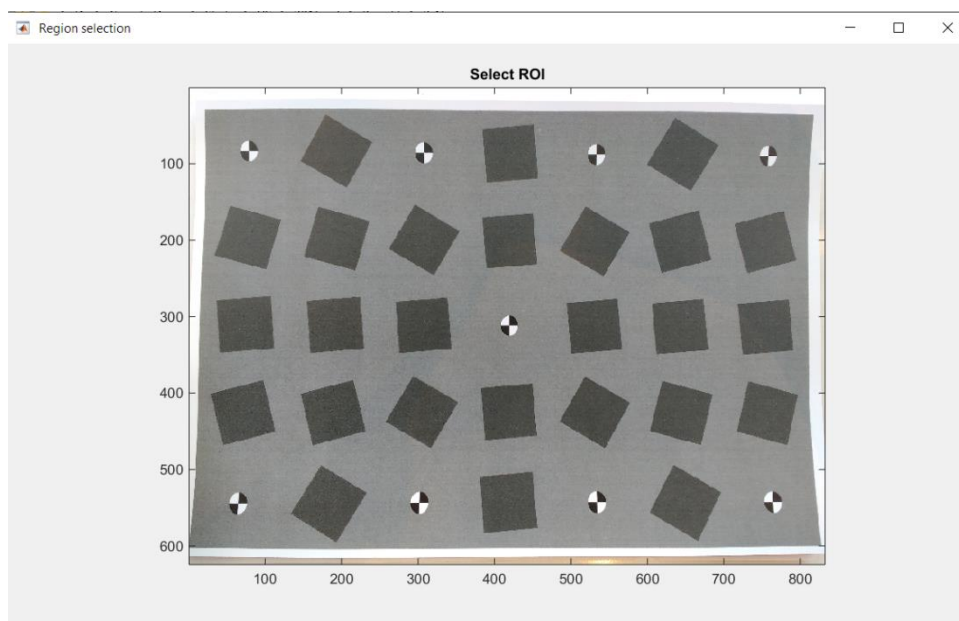
Obr. 20 - Dialogové okno pro výběr parametrů

Následně budete vyzváni k opětovnému výběru fotografie, na níž chcete, aby měření probíhalo. V dialogovém okně můžete též změnit hodnotu dpi fotografie či hodnoty pro výpočet jasové složky z hodnot RGB.



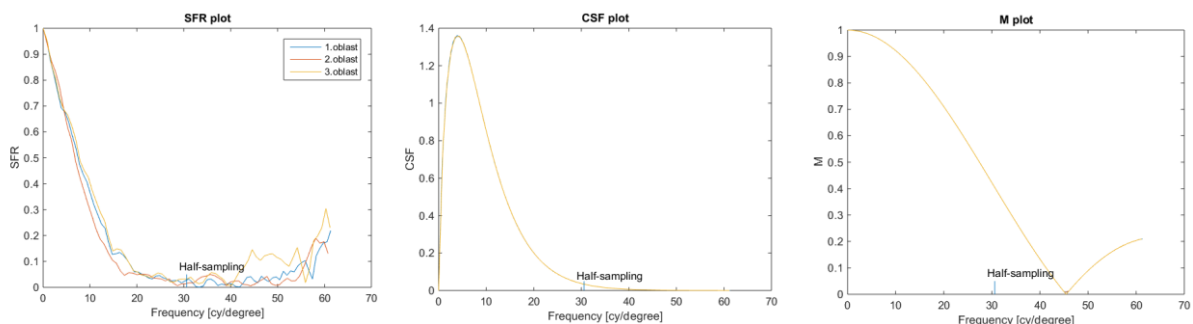
*Obr. 21 - Dialogové okno pro výběr parametrů*

V dalším okně budete vyzváni k výběru tří míst na fotografii (tří hran), na nichž chcete provést výpočet (obr. 22). Standard doporučuje měřit pouze na nejbližších čtvercích, můžete si však vyzkoušet vybrat i 3 prostorově vzdálená místa. S každým z míst se ve skriptu pohybuje diagonálně o malé vzdálenosti. Díky tomu by mělo dojít k částečnému zpřesnění výsledků, jelikož skript počítá SFR ve vybrané oblasti hned několikrát. Průměr všech hodnot vypočtených v dané oblasti by měl potlačit náhodné chyby ve výpočtech.



*Obr. 22 - Okno pro výběr oblastí měření*

Jsou-li vybraná místa mimo hrany čtverců nebo jsou-li příliš malá, ukáže se ve výstupní konzoli chybové hlášení nebo hlášení o potřebném důkladnějším výpočtu. Proběhne-li celý skript, zobrazí se vám grafy SFR, CSF a M (obr. 23) a ve výstupní konzoli se vypíše výsledky měření.



Obr. 23 – Grafy SFR, CSF a M

Bude-li po vás skript chtít dosadit hodnoty, jimiž si nejste jisti, zeptejte se vyučujícího. Pro určení hodnoty vzdálenosti použijte metr či pravítko.

Po skončení skriptu si prohlédněte vykreslené grafy a poznamenejte si hodnoty ztráty kvality vypsané na konzoli. Tyto hodnoty porovnejte mezi jednotlivými měřeními přístroji.

## 5. Použitá literatura

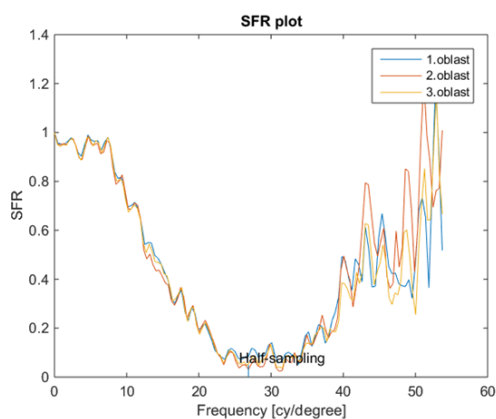
[1] P1858/D2. *IEEE Approved Draft Standard for Camera Phone Image Quality (CPIQ)*. New York: IEEE, 2016. Dostupné v Univerzitní knihovně Technické univerzity v Liberci.

[2] Tutorials: Sharpness. *Cambridge in colour* [online]. Cambridge in Colour, ©2005-2017 [cit. 2017-01-29]. Dostupné z: <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/sharpness.htm>

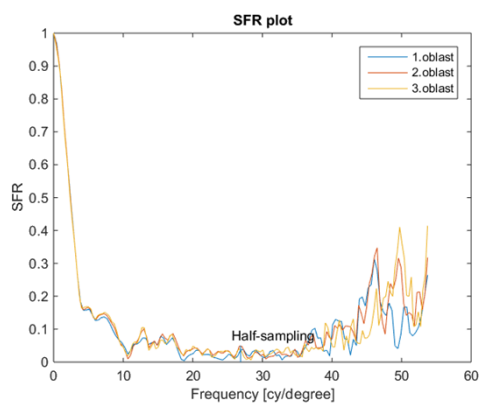
[3] SÚKUPOVÁ, Lucie. Modulační přenosová funkce (1). *Něco málo o zobrazování a dávkách v radiodiagnostice, ale i mimo ni, aneb co by Vás mohlo zajímat* [online]. Praha: Lucie Sukupová, 2017, aktualiz. 2015-10-12 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://www.sukupova.cz/modulacni-prenosova-funkce/>

[4] NADENAU, Marcus J., Julien REICHEL a Murat KUNT. Wavelet-based color image compression: exploiting the contrast sensitivity function. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2003, **12**(1), 58-70. DOI 10.1109/TIP.2002.807358. ISSN 1057-7149. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1187359/>

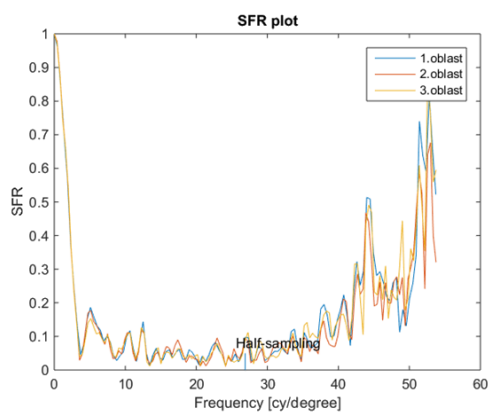
## Příloha C. Výstupní průběhy SFR



Obr. 24 - Průběh SFR pro dobré podmínky měření (Moto G3)



Obr. 25 - Průběh SFR pro špatné zaostření (Moto G3)



Obr. 26 - Průběh SFR pro špatné světelné podmínky (Moto G3)

## **Příloha D. Obsah přiloženého DVD**

1. Metody pro hodnocení obrazové kvality digitálních fotoaparátů integrovaných v mobilních telefonech – text práce ve formátu pdf
2. SFR – ZIP složka obsahující soubory potřebné k měření SFR
  - a. složka `sformat3_post` – složka obsahuje soubory volně dostupného algoritmu pro výpočet SFR dle ISO 12233 [11]
  - b. složka SFR skript – složka obsahuje soubory potřebné k měření SFR dle standardu CPIQ
3. Uniformity – ZIP složka obsahující soubory potřebné k měření barevné uniformity
4. Fotografie – ZIP složka obsahující soubory použité k měření SFR a barevné uniformity
5. Testovací obrazec ve formátu bmp
6. Testovací obrazec ve formátu xcf