



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ**

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky

## **Parametry digitálního fotoaparátu mobilního telefonu**

### **Parameters of the Mobile Phone Digital Camera**

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Doc. Mgr. Petr Páta, PhD.

**Miroslav Růžička**

**Praha, 2018**

# 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 21.5.2018

Podpis: .....

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Růžička** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **457142**  
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:

**Parametry digitálního fotoaparátu mobilního telefonu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Parameters of the Mobile Phone Digital Camera**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s konstrukcí digitálního fotoaparátu v mobilním telefonu a popište jeho hlavní části včetně nejdůležitějších parametrů. Zaměřte se především na snímací část (obrazový senzor). Vysvětlete jeho funkci a zaměřte se především na artefakty, které vznikají vlivem malých rozměrů čipu. Navrhněte měření vlastností parametrů fotoaparátu (především výskyt šumu, aliasing atd.) a proveďte srovnání s konvenčním digitálním fotoaparátem.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ISO, ISO 12233:2017, Photography - Electronic still-picture cameras - Resolution measurements, 2017.
- [2] Ch. Mauer, Measurement of the spectral response of digital cameras, VDM Verlag, 2010.
- [3] ISO, ISO 17850:2015 Photography - Digital cameras - Geometric distortion (GD) measurements, 2015.
- [4] J. B. Phillips, H. Eliasson, Camera Image Quality Benchmarking, Wiley, 2017.
- [5] J. Nakamura, Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras, CRC Press, 2017.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D., katedra radioelektroniky FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
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

# Poděkování

Poděkovat bych chtěl především vedoucímu mé práce Doc. Mgr. Petrovi Pátovi, PhD. za pomoc při řešení problémů a za jeho odborné rady a připomínky. Rád bych poděkoval také své rodině za podporu nejen po dobu psaní práce.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce přibližuje téma fotoaparátů v mobilních telefonech. Zaměřuje se na jejich parametry a popisuje nejčastěji používaný obrazový senzor CMOS. Zmíněny byly také artefakty související s CMOS obrazovými senzory, výrobci těchto senzorů a historie vývoje fotoaparátů v mobilních telefonech. Cíl této práce byl popsat parametry, definovat metodiku měření obrazové kvality a provést vybraná měření na vzorku telefonů a konvenčním fotoaparátu. Výsledky naznačují velký vliv zpracování fotografie během focení, jelikož rozdíly mezi automatickým režimem a manuálním jsou v některých případech značné.

Klíčová slova: obrazové senzory, CMOS senzor, fotoaparát v telefonu, mobilní telefon, obrazová kvalita, porovnávání kvality obrazu

## Abstract

This bachelor thesis deals with Mobile Phone Digital Camera. The focus is on parameters and on the most popular image sensor type CMOS. Image sensors may occur artefacts which are also described as well as manufacturers and history of mobile phone cameras. The main goal of this thesis is a description of parameters, methods of measurement and comparison with conventional camera. The results show key role of image signal processing of phone camera to achieve better scores.

Index Terms: mobile phone, parameters for image quality, image sensors, CMOS sensor, phone camera, benchmarking image quality



# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Historie vývoje fotoaparátů v mobilech .....	2
3	Technické parametry fotoaparátů v mobilních telefonech .....	3
3.1	Ohnisková vzdálenost .....	3
3.2	Clonové číslo.....	3
3.3	Počet obrazových bodů.....	4
3.4	Velikost obrazových bodů.....	5
3.5	Velikost obrazového senzoru.....	5
3.6	Ostření .....	6
3.7	Stabilizace.....	6
4	Obrazový senzor CMOS.....	7
4.1	Fotoelektrický jev .....	7
4.2	Princip.....	7
4.3	Bayerova maska .....	8
4.4	Back side-illuminated CMOS.....	9
4.5	Artefakty snímání.....	10
4.5.1	Obecné .....	10
4.5.2	Artefakty CMOS technologie .....	11
5	Přehled výrobců senzorů a optiky v mobilech.....	12
5.1	Výrobci obrazových senzorů.....	12
5.1.1	Sony.....	12
5.1.2	OmniVision.....	13
5.1.3	Samsung.....	13
5.1.4	Toshiba.....	14
5.1.5	SK Hynix .....	14
5.1.6	Tabulka vybraných senzorů .....	14
5.2	Výrobci optiky .....	15
6	Parametry fotoaparátů v nynějších mobilech .....	16
6.1	Obrazový senzor.....	16
6.1.1	Počet obrazových bodů.....	16
6.1.2	Velikost čipu .....	16
6.1.3	Velikost obrazového bodu.....	16

6.2	Modul fotoaparátu.....	17
6.2.1	Clonové číslo .....	17
6.2.2	Ohnisková vzdálenost .....	17
6.2.3	Ostření .....	18
6.2.4	Stabilizace .....	18
6.2.5	Optika.....	19
7	Použití stejných senzorů v jiných přístrojích .....	20
8	Metodika měření parametrů fotoaparátů v mobilních telefonech.....	21
8.1	Definice parametrů .....	21
8.1.1	Modulační přenosová funkce .....	21
8.1.2	Šum.....	24
8.1.3	Dynamický rozsah .....	25
8.1.4	Reprodukce barev .....	26
8.1.5	Vinětace.....	27
8.1.6	Geometrické zkreslení .....	28
8.2	Definice měření .....	29
8.2.1	Podmínky v měřené místnosti .....	29
8.2.2	Nastavení měřeného zařízení.....	30
9	Vlastní měření a vyhodnocení parametrů.....	31
9.1	Popis měřených vzorků.....	32
9.1.1	Apple iPhone 7.....	32
9.1.2	Google Pixel 2.....	33
9.1.3	Huawei P20 .....	33
9.1.4	Nokia 5 .....	33
9.1.5	Fotoaparát Nikon D700 .....	33
9.2	Modulační přenosová funkce.....	34
9.2.1	Vyhodnocení .....	34
9.2.2	Způsob vyhodnocení.....	36
9.3	Vizuální šum.....	37
9.3.1	Vyhodnocení .....	37
9.3.2	Způsob vyhodnocení.....	38
9.4	Geometrické zkreslení.....	39
9.4.1	Vyhodnocení .....	39
9.4.2	Způsob vyhodnocení.....	42



9.5	Vinětace .....	43
9.5.1	Vyhodnocení .....	43
9.5.1	Způsob vyhodnocení .....	44
10	Závěr .....	46
11	Literatura .....	48
	Příloha A – MTF všech měřených vzorků.....	51
	Příloha B – Vinětace všech měřených vzorků .....	61
	Příloha C – Obsah přiloženého DVD.....	66

## Seznam zkratek

CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CIE	Commission internationale de l'éclairage
CPIQ	Camera Phone Image Quality
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISO	International Organization for Standardization
HD	High Definition
Full HD	rozlišení 1920 × 1080 obrazových bodů
4K	zpravidla rozlišení 3840 × 2160 obrazových bodů
BSI	Back side-illuminated
FSI	Front side-illuminated
PDAF	Phase detection Autofocus
OECF	Opto-Electric Conversion Function
MPx	megapixel, milión obrazových bodů
MTF	Modular Transfer Function

## Seznam obrázků

Obrázek 3.1 - Ohnisková vzdálenost $f$ , ohnisko $F$ , vlastní úprava. [2] .....	4
Obrázek 4.1 – Zjednodušený model jednoho pixelu [16].....	7
Obrázek 4.2 – Bayerova maska [17].....	8
Obrázek 4.3 – Porovnání FSI a BSI CMOS [18].....	9
Obrázek 4.4 – Ukázka moaré efektu na běžné fotografii [vlastní fotografie] .....	10
Obrázek 4.5 – Časový diagram čtení řádků CMOS senzoru – rolling shutter [2] .....	11
Obrázek 5.1 - Porovnání Sony BSI CMOS (Exmor R) s Stacked CMOS (Exmor RS) [21] .....	12
Obrázek 5.2 - Porovnání BSI CMOS a ISOCELL od Samsungu [24].....	13
Obrázek 6.1 - Porovnání několika běžně používaných velikostí čipu [31].....	16
Obrázek 6.2 – Schéma čtyřčlenného optického systému [35] .....	19
Obrázek 7.1 - Modul fotoaparátu se senzorem společnosti Samsung pro mobilní telefon [28] .....	20
Obrázek 8.1 – Obrazec dle standardu ISO 12233, graf $P_1$ se využívá pro měření MTF.....	23
Obrázek 8.2 – Různé tvary modulační přenosové funkce [39] .....	24
Obrázek 8.3 – Obrazec pro měření šumu dle standardu ISO 15739 .....	25
Obrázek 8.4 - Obrazec X-Rite Digital ColorChecker SG [40].....	26
Obrázek 8.5 – Geometrické zkreslení [1] .....	29
Obrázek 8.6 – Nasvícení obrazce dle standardu IEE CPIQ [1].....	30
Obrázek 9.1 – Fotka z měření.....	31
Obrázek 9.2 – Vlastní koláž testovaných telefonů .....	32
Obrázek 9.3 – Aliasing v případě iPhone 7, automatický režim (JPEG).....	36
Obrázek 9.4 – Nikon D700 –Vykreslení potřebného grafu z tabulky ISO 12233 DCR3 pro další zpracování .....	36
Obrázek 9.5 – Mnou navrhnutý obrazec .....	39
Obrázek 9.6 – Ukázka detekce bodů z fotografie pomocí funkce <code>imfindcircles</code> .....	42
Obrázek 9.7 – Huawei P20 vinětace v automatickém režimu JPEG.....	45
Obrázek 9.8 – Huawei P20 vinětace v manuálním režimu RAW .....	45

## Seznam tabulek

Tabulka 5.1 – Parametry pěti vybranýchobrazových senzorů [28, 29].....	14
Tabulka 5.2 – Přehled největších výrobců optiky [30].....	15
Tabulka 9.1 - Vizualní šum při osvětlení 8300 lx.....	37
Tabulka 9.2 – Vizualní šum při osvětlení 460 lx.....	38
Tabulka 9.3 – Geometrické kreslení – automatický režim (JPEG).....	40
Tabulka 9.4 – Geometrické kreslení – manuální režim (RAW).....	40
Tabulka 9.5 – Vinětace .....	44

## Seznam grafů

Graf 9.1 - Modulační přenosová funkce – automatický režim .....	35
Graf 9.2 - Modulační přenosová funkce – manuální režim.....	35
Graf 9.3 – Geometrické zkreslení u telefonu Google Pixel 2 – manuální režim - vertikální od středu .....	41
Graf 9.4 – Geometrické zkreslení u telefonu Google Pixel 2 – manuální režim – horizontální od středu .....	41

# 1 Úvod

Fotoaparáty v mobilních telefonech jsou dnes běžnou součástí našeho života. Pravděpodobně všichni nosí v kapse telefon s fotoaparátem. Každým rokem fotí telefony lépe a zlepšují se jejich parametry. Fotoaparát v mobilním telefonu je založen na principech standardních fotoaparátů, akorát je vše zmenšeno do miniaturního modulu.

Fotoaparát v mobilním telefonu lze rozdělit na několik částí. Patří sem samotný modul, obrazový senzor a také část zpracování obrazu v obrazovém signálovém procesoru. Jelikož celý fotoaparát je vcelku malý a nelze od sebe tyto části separovat, budu se věnovat této problematice jako celku.

Velmi podobné, ne-li stejné obrazové senzory najdou uplatnění také v dalších odvětvích, jako jsou třeba drony.

V této práci budou nejprve popsány parametry fotoaparátů. Výhradně se dnes používají CMOS senzory a jelikož je to natolik důležitá součást, bude jí věnována celá kapitola se zaměřením na možné artefakty související s malým rozměrem těchto čipů právě v mobilních telefonech.

U moderních telefonů lze zaznamenávat snímky do formátu RAW (výraz z anglického *raw* – surový, nezpracovaný). Tento formát uchovává nezpracovaná obrazová data přímo ze senzoru a mnohdy se o něm hovoří jako o digitálním negativu. Díky použití tohoto formátu lze vynechat část obrazového zpracování. Tím lze zajistit porovnání pouze hardwarové stránky fotoaparátu, což je jeden z cílů této práce.

Vyhodnocení objektivního porovnání fotoaparátů bude provedeno také ve standardu JPEG v automatickém režimu. Měření bych chtěl provést s vybranými telefony a jedním konvenčním fotoaparátem a porovnat, jak moc se liší v několika měření.

## 2 Historie vývoje fotoaparátů v mobilech

Jako první komerčně dostupný telefon s fotoaparátem je považován model Sharp J-SH04 z roku 2000, který nabízel CMOS senzor s počtem 110 000 obrazových bodů (0,11 Megapixelů). Již předtím byly k dispozici různé prototypy a první fotka pořízena telefonem je z roku 1997. [7, 8]

Jelikož rozlišení tohoto prvního telefonu bylo velmi nízké, pracovali výrobci na zvyšování tohoto čísla. Prvním telefonem s rozlišením 1,3 MPx byl model PM-8920 od výrobce Audiovox pro operátora Sprint. Ten nabízel dokonce tlačítko pro fotografování a snímky bylo možné hned bezdrátově sdílet. [9]

Na začátku roku 2005 se začaly objevovat první telefony s rozlišením 2 MPx. Jedním z nich byla Nokia N90, která nabízela také autofokus, optiku značky Carl Zeiss a LED blesk. Velmi populární telefon s 2MPx fotoaparátem byl také Sony Ericsson K750i, který nabízel navíc duální LED blesk. Společnost Sony Ericsson o rok později představila první telefon s 3,2MPx rozlišením, kterým byl model K800i. Tento model navíc nabízel xenonový blesk a stabilizaci obrazu. [9, 10]

V roce 2007 byl představen první telefon s 5MPx fotoaparátem – Nokia N95. O rok později přišel na trh 8MPx fotoaparát v telefonu – model Samsung INNOV8. První telefon s proměnlivou clonou byla Nokia N86 v roce 2009. Její clona měla tři hodnoty a to  $f/2,4$ ,  $f/3,2$  a  $f/4,8$ . Nejvyšší hodnotu počtu obrazových bodů v telefonech dokázala dosáhnout Nokia v roce 2012 s modelem 808 PureView se 41 MPx. [9]

Ačkoliv počet obrazových bodů není jediný klíčový parametr v hodnocení kvality snímků vyfocených mobilních telefonů, velmi dobře to ilustruje celkový vývoj tohoto odvětví. Navíc jeho nízká hodnota byla z počátku velmi limitující. Fotoaparáty v mobilních telefonech se celkově značně vylepšily, nyní nabízí mnohé modely optickou stabilizaci, pokročilé metody ostření, vysoký dynamický rozsah nebo podporu formátu RAW. [8]

## 3 Technické parametry fotoaparátů v mobilních telefonech

Fotoaparáty v mobilních telefonech vycházejí konstrukčně z klasických velkých fotoaparátů. Oproti nim jsou ale výrazně menší. Určující technické parametry jsou však stejné. V této kapitole budou probrány nejdůležitější parametry těchto miniaturních fotoaparátů obecně. Konkrétní dnes používané parametry budou probrány v kapitole Parametry fotoaparátů v nynějších mobilech.

### 3.1 Ohnisková vzdálenost

Popisuje vzdálenost čočky od jejího ohniska (bod, kde se kříží paprsky světla). Ohnisková vzdálenost se u zrcadlovek uvádí vzhledem k velikosti full frame. Full frame je obrazový formát, který lze považovat za standardní velikost obrazového senzoru běžných fotoaparátů a odvozen od původního využívání filmu této velikosti (135 film), kde jedno kinofilmové políčko na kazetě mělo rozměr 36 x 24 mm.

Při použití ohniska 50 mm je záběr zhruba stejný jako u pohledu lidského oka. Úhel záběru je při tomto ohnisku zhruba 40 stupňů a bývá označován za normální. Menší ohnisková vzdálenost znamená větší úhel záběru a přísluší jí označení širokoúhlé. Použití větší ohniskové vzdálenosti (nad 50 mm) je označováno jako teleobjektivy.

U mobilních telefonů se ohnisková vzdálenost také udává a přepočítává se právě ke zmíněné velikosti, aby ji bylo možné lépe porovnávat. Taková hodnota se označuje jako ekvivalentní ohnisková vzdálenost. Skutečná ohnisková vzdálenost je vzhledem k malé velikosti samotného fotoaparátu většinou 4 mm.

### 3.2 Clonové číslo

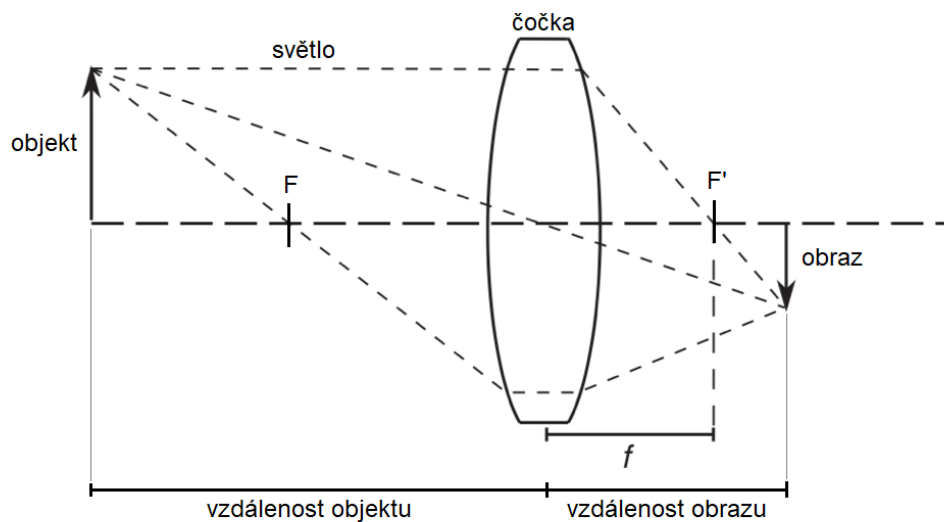
Tento parametr velmi úzce souvisí s ohniskovou vzdáleností. Clonové číslo s označením  $F$  je definováno jako poměr ohniskové vzdálenosti  $f$  k průměru clony. V místě čočky je u klasických fotoaparátů umístěna clona. Ta se dle nutnosti dokáže přivřít a zmenšit tak její průměr  $D$ . Tento vztah popisuje (1).

$$F = f/D \tag{1}$$



Čím nižší clonové číslo, tím menší je hloubka ostrosti. Hloubka ostrosti označuje rozsah od nejbližšího k nejvzdálenějšímu bodu, které se na snímku budou zdát ostré. Nízké clonové číslo je u klasických fotoaparátů charakterizováno velmi malou hloubkou ostrosti, kdy je zaostřený pouze jeden objekt a jeho pozadí bývá rozostřené.

Clonové číslo úzce souvisí se světelností. Světelnost je minimální hodnota clonového čísla. Jelikož u většiny mobilních telefonů není možné měnit průměr clony  $D$ , rovná se udávané clonové číslo zpravidla světelnosti. Tento parametr je důležitý zejména proto, že udává množství světla, které může maximálně dopadnout na senzor. Ve finále zajišťuje kvalitnější noční snímky, jelikož na senzor dopadne více světla.



Obrázek 3.1 - Ohnisková vzdálenost  $f$ , ohnisko  $F$ , vlastní úprava. [2]

### 3.3 Počet obrazových bodů

Počet obrazových bodů udává, kolik jich je celkem umístěno na obrazovém senzoru. Tento parametr úzce souvisí se samotnou velikostí senzoru, a tedy i velikostí jednotlivých obrazových bodů. Při pohledu do specifikací vidíme velmi často pouze jedno číslo. To vzniklo vynásobením počtem obrazových bodů na výšku a na šířku.

Jelikož obrazové senzory v telefonech jsou obecně velmi malé, vysoký počet obrazových bodů může mít negativní dopad. Při použití čipu s počtem přes 20 miliónů obrazových bodů, tzv. Megapixelů je velikost jednotlivých pixelů mnohem menší než při použití polovičního

počtu. Malé obrazové body jsou schopny snímat méně světla, výsledná fotografie obsahuje více šumu a její kvalita je většinou nižší. [11]

Vysoký počet obrazových bodů má také výhody. Při použití digitálního přiblížení je výhodné, jelikož při tomto kroku dochází k výřezu fotografie. Další důvod, proč může být důležité, je natáčení videa. Pro natáčení videa ve 4K (3840 x 2160 pixelů) je totiž nutné mít minimálně 8,3 megapixelový obrazový senzor.

Celkový počet obrazových bodů senzoru nemusí být stejné číslo jako počet využitelných bodů k zachycení snímku, které se označují jako efektivní počet obrazových bodů. Hodnota tohoto počtu je většinou nižší a označuje velikost výsledného snímku.

Bayerova maska, která umožňuje zachycení barev, snižuje reálné rozlišení. Pokud použijeme například fotoaparát s rozlišením 20 Megapixelů, bude 10 milionů obrazových bodů citlivých na zelenou barvu, dalších pět na červenou a pět na modrou barvu. Vzhledem k tomuto faktu je nutné provádět tzv. interpolaci. Ta zajišťuje dopočítávání chybějících dvou barev na daném bodu přes nejrůznější složité algoritmy.

### 3.4 Velikost obrazových bodů

Velikost jednotlivých obrazových bodů ovlivňuje množství dopadající světla na každý bod. Čím větší velikost, tím více světla bod zachytí. U mobilních telefonů se tento parametr pohybuje v řádech jednotek mikrometrů. Velikost jednoho obrazového bodu lze snadno spočítat z velikosti obrazového senzoru.

### 3.5 Velikost obrazového senzoru

Velikost samotného obrazového senzoru ovlivňuje předchozí dva zmíněné parametry. Parametr velikosti se u menších senzorů obvykle vyjadřuje jedním číslem v jednotce palec. Tento údaj není úhlopříčka a je odvozen z průměru válcovitých elektronek určených pro televizní snímání v polovině minulého století. Reálná úhlopříčka se rovná přibližně dvou třetinám tohoto čísla. [12]

Použití většího obrazového senzoru znamená obvykle vyšší kvalitu, jelikož větší plocha senzoru dokáže pohltit více světla. Plocha obrazového senzoru mobilního telefonu je zhruba 50krát menší než u klasického full frame formátu.

### 3.6 Ostření

Neméně důležitým parametrem je způsob ostření. To se stará o to, aby vypadal snímáný objekt zaostřeně pro lidské oko. Rozlišujeme pevný fokus na určitou vzdálenost (tzv. fixed focus) a automatické ostření – autofokus.

Fixed focus znamená, že fotoaparát při používání nezaostřuje. Má již z výroby nastavenou pevnou a neměnnou vzdálenost (většinou od jednoho metru do nekonečna), při které se budou fotografie jevit ostré. Při použití fixed focus tak prakticky není možné fotografovat makro snímky.

Automatické ostření se dále dělí na několik metod. Ostření pomocí detekce kontrastu používá algoritmy pro vyhodnocení, kdy je snímáný obraz ostrý. Postupně zkouší různé kombinace, než nalezne vhodné nastavení, kdy je detekován nejvyšší lokální kontrast. Nevýhodou této metody je zhoršená funkčnost při nízkém osvětlení a její nízká rychlost. [13]

Mezi používané aktivní metody ostření patří laserové. Telefon má vedle snímače fotoaparátu umístěný vysílač a přijímač laserového paprsku. Princip spočívá ve vyslání paprsku, který se následně vrátí. Telefon změří tuto dobu a pomocí ní vypočítá vzdálenost objektu, na který je třeba zaostřit. Tato metoda funguje velmi dobře i ve tmě. Naopak při snímání velmi vzdálených objektů není vhodná, laserový paprsek se v tomto případě nemusí vrátit.

### 3.7 Stabilizace

Stabilizace fotoaparátu v telefonu je buď elektronická nebo optická. Elektronická znamená, že celý modul fotoaparátu je na pevno umístěn a fyzicky se nepohybuje. Veškerá stabilizace je prováděna pouze pomocí speciálních softwarových algoritmů, které analyzují pohyb telefonu pomocí jeho pohybových senzorů.

U optické stabilizace je s modulem fotoaparátu fyzicky pohybováno na základě dat z gyroskopu. Tím lze kompenzovat vnější otřesy jako třeba otřes ruky. Základní optická stabilizace probíhá pouze ve dvou osách, pokročilejší fotoaparáty nabízejí i čtyř-osou. Optická stabilizace je vhodná zejména pro stabilizaci videa a také při focení v horších světelných podmínkách. Díky tomu může telefon nastavit delší expoziční čas. Tím pádem dopadne na senzor více světla a výsledná fotografie je kvalitnější. [14]

## 4 Obrazový senzor CMOS

Aktivní CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) snímače se začaly plně používat až koncem 90. let minulého století. Jejich výhodou je především nižší výrobní cena a možnost integrovat další obvody ke zpracování signálu přímo do čipu. Aktivní CMOS senzor znamená, že každý obrazový bod má svůj vlastní zesilovač. [2]

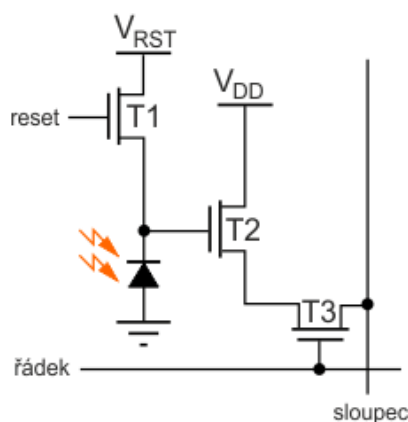
Dnes se při pohledu do katalogu u mobilních telefonů využívají výhradně CMOS čipy, ačkoli v minulosti se používali i CCD čipy jako v případě Samsungu SCH-V200 z roku 2000 nebo Sony Ericssonu S700 z roku 2004. [8, 15] Nadále bude popisován pouze CMOS senzor.

### 4.1 Fotoelektrický jev

Základ snímání obrazu je využití fotoelektrického jevu neboli fotoefektu. Ten vysvětlil Albert Einstein již v roce 1905. Když částice světla (fotony) dopadají na snímač, elektrony mění svůj stav na excitovaný. Tím zde vzniká elektrický náboj – napětí, které odpovídá intenzitě osvětlení daného obrazového bodu.

### 4.2 Princip

Kapacita připojená vedle fotodiody je nejprve resetována jedním tranzistorem T1 na referenční úroveň napětí  $V_{rst}$ . Poté, co začne světlo dopadat na fotodiodu, začne se kapacita vybíjet. Toto vybití je pomocí tranzistoru T2 zesíleno na vyšší hodnotu elektrické veličiny a přivedeno na sběrnici, kde je tento údaj přečten za pomoci tranzistoru T3. Ten je aktivní pouze pokud je přiveden signál na daný řádek. [5]



Obrázek 4.1 – Zjednodušený model jednoho pixelu [16]

Další obvody tyto data dopraví ke zpracování. Čím více dopadajícího světla na obrazový bod dopadne, tím větší bude jeho hodnota napětí. To se posléze pomocí A/D převodníku převede na konkrétní číslo. Na základě toho se pak sestaví výsledný snímek, který bude černobílý. Proto, aby byl obraz barevný, využívá se Bayerova maska.

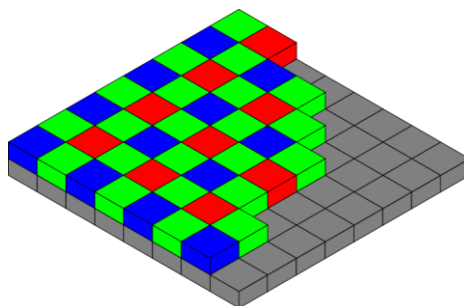
Zmíněné schéma výše na obrázku 4.1 využívá tři tranzistory. Dle literatury [2] se dnes nejčastěji používá uspořádání se čtyřmi tranzistory (4T) umístěné u jednoho obrazového bodu. Obraz je postupně po velmi krátkou dobu vyčítán bod po bodu z celého obrazového senzoru. Načtení jednoho obrazového bodu trvá v řádech jednotek mikrosekund až desítek nanosekund. [16]

CCD senzor funguje jako posuvný registr a dochází k přesunu náboje postupně přes obrazové body po celém senzoru. V případě CMOS senzoru má každý obrazový bod svůj zesilovač a napětí je vyčteno z každého bodu pomocí sběrnice. Díky tomuto přístupu je tato technologie mnohem rychlejší ve srovnání s CCD. Výhodou je také možnost integrace dalších obvodů (například A/D převodník) přímo na čip, což u CCD snímačů nelze.

### 4.3 Bayerova maska

Snímače dokáží zaznamenat pouze intenzitu jasu světla, čímž pádem byly výsledné snímky černobílé. Roku 1976 přišel Bryce Bayer s myšlenkou barevné masky.

Bayerova maska aplikuje nad snímač filtr, čímž umožňuje zachycení barev. Tento filtr se skládá z matice červené, modré a zelené barvy. Nad každým pixelem je tak umístěn filtr, přičemž projde pouze světlo dané vlnové délky. Pro červenou odpovídá délka kolem 700 nm, pro zelenou kolem 500 nm a pro modrou kolem 450 nm. Vzhledem k tomu, že lidské oko je citlivější na zelenou barvu, má tato maska dvojnásobek pixelů zelené barvy oproti červené a modré.

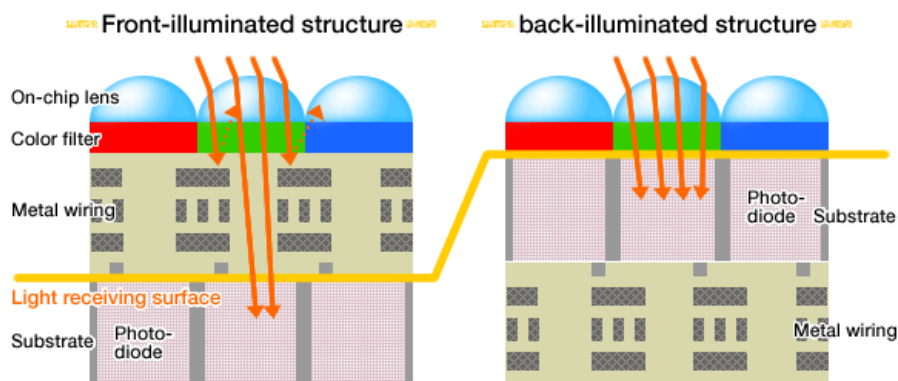


Obrázek 4.2 – Bayerova maska [17]

## 4.4 Back side-illuminated CMOS

Jedna z dřívějších nevýhod senzorů CMOS byla, že některé fotony při zaznamenávání dopadaly na samotný obvod a tranzistory. Tento neduh však vyřešily BSI (Back side-illuminated) CMOS senzory. Ty dávají tyto nezbytné komponenty u jednotlivých pixelů až za světlo citlivou vrstvu, čímž se dostane více fotonů přímo na fotodiodu. Zaznamená se tak více světla a ve výsledku tyto čipy lépe fotí v horších světelných podmínkách a mají méně šumu. [18]

Dle informací od Sony se díky tomuto kroku zlepšil poměr odstupů signálu od šumu (SNR ratio) o +8 dB u BSI CMOS senzorů v porovnání s existujícími CMOS senzory stejné velikosti. [18]



Obrázek 4.3 – Porovnání FSI a BSI CMOS [18]

## 4.5 Artefakty snímání

### 4.5.1 Obecné

#### 4.5.1.1 Aliasing

Vzniká při nedodržení vzorkovacího teorému. Vzorkovací teorém neboli Nyquistův teorém říká, že pro zamezení vzniku nechtěných artefaktů musí být vzorkovací frekvence  $f_s$  minimálně dvojnásobná vůči nejvyšší obsažené prostorové frekvenci  $f_{max}$  v obrazu. Rovnice (2) zobrazuje vzorkovací teorém.

$$f_s \geq 2 \times f_{max} \quad (2)$$

Aliasing má podobu různých artefaktů v důsledku nedodržení vzorkovací frekvence. Při nedodržení na obrazi s opakující se vzorky vysoké frekvence nad  $f_s$  vedle sebe (jako je například struktura tkaniny) se na výsledném snímku objevuje uměle vytvořený nízkofrekvenční signál. Ten se projevuje jako tzv. moaré efekt. To může do obrazu přinést barevné artefakty nebo jen deformovaný obraz. Pokud budeme snímat neopakující se obrazec, například pouze jednu diagonální čáru, může projevit jako zubatá diagonální čára (tzv. jaggies). [19]



Obrázek 4.4 – Ukázka moaré efektu na běžné fotografii [vlastní fotografie]

## 4.5.2 Artefakty CMOS technologie

### 4.5.2.1 Dark current (Temný proud)

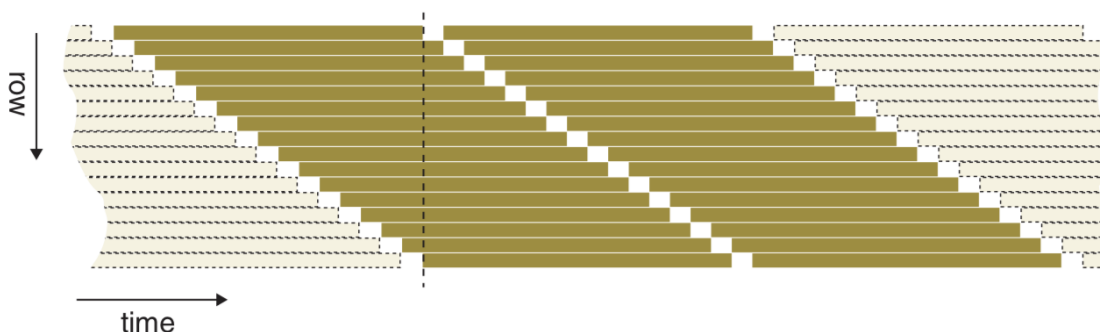
Tak zvaný temný proud se může objevit nejen v obrazovém bodu ale také v dalších v obvodech CMOS senzoru. Tento proud vzniká, přestože na dané části nedopadají žádné fotony. Ve výsledku temný proud přidává na fotografii dodatečný nežádoucí šum. [5]

### 4.5.2.2 Fixed pattern noise

Fixed pattern noise označuje šum, který je vždy umístěn na stejném místě. Většinou se tak jedná o vadný obrazový bod, který se projevuje buď vždy minimální, maximální nebo konstantní hodnotou. O tomto efektu se hovoří také jako o nejednotnosti tmavého signálu (Dark-Signal Non Uniformity). Vadný obrazový bod může vzniknout již při výrobě. Pokud je však vadný pouze jeden bod, není to vzhledem k počtu obrazových bodů v milionech takový problém. [8]

### 4.5.2.3 Rolling shutter

Při čtení informace z obrazového senzoru CMOS probíhá čtení po jednotlivých řádcích s určitou prodlevou. Díky tomu se může na výsledném snímku objevit nežádoucí efekt zvaný jako „jello“ efekt. Děje se tak například u vrtulí letadla či jiných velmi rychle se pohybujících objektů. [2]



Obrázek 4.5 - Časový diagram čtení řádků CMOS senzoru - rolling shutter [2]

Tímto nežádoucím efektem již netrpí nejnovější třívrstvé CMOS senzory, které integrovali jako třetí vrstvu DRAM paměť.



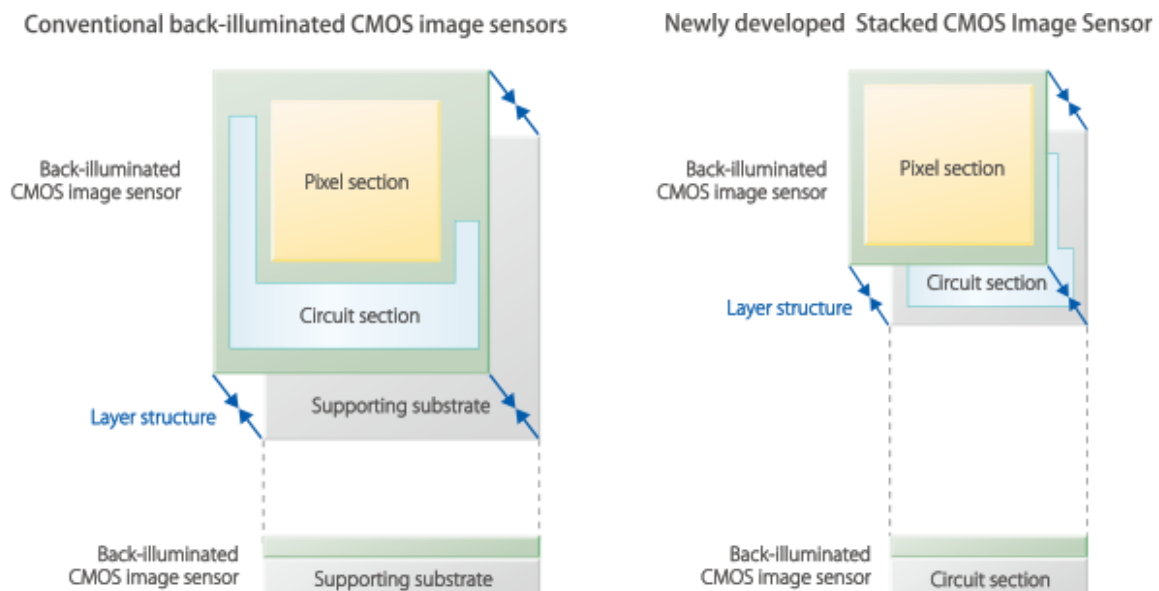
## 5 Přehled výrobců senzorů a optiky v mobilech

### 5.1 Výrobci obrazových senzorů

#### 5.1.1 Sony

Výrobců obrazových senzorů pro mobilní telefony je několik, zaměřím se pouze na významnější větší společnosti. Největším výrobcem je japonská společnost Sony. Konkrétně čipy vyrábí divize společnosti s názvem Sony Semiconductor Solutions Corporation. Většinou míří na top modely výrobců telefonů a také na střední třídu. Jejich čipy se prodávají pod značkou Exmor, přičemž se jedná o CMOS.

V současné době nabízí čip Exmor R, který je tzv. back-side illuminated (BSI). To znamená, že tranzistory a obvody jsou umístěny až za fotocitlivou vrstvou. Ve výsledku tak dopadá více světla na samotný obrazový čip. Novější a více používaným čipem je Exmor RS, který nabízí technologii Stacked CMOS. Díky tomu jsou veškeré obvody zpracování signálu umístěny až za sekci s obrazovými body a čip je tak v podstatě dvouvrstvý. Tuto technologii nejlépe ilustruje obrázek níže. Nejnovější počín z dílen Sony je třívrstvý čip IMX400, který přidává další vrstvu s DRAM. [20, 21]



Obrázek 5.1 - Porovnání Sony BSI CMOS (Exmor R) s Stacked CMOS (Exmor RS) [21]

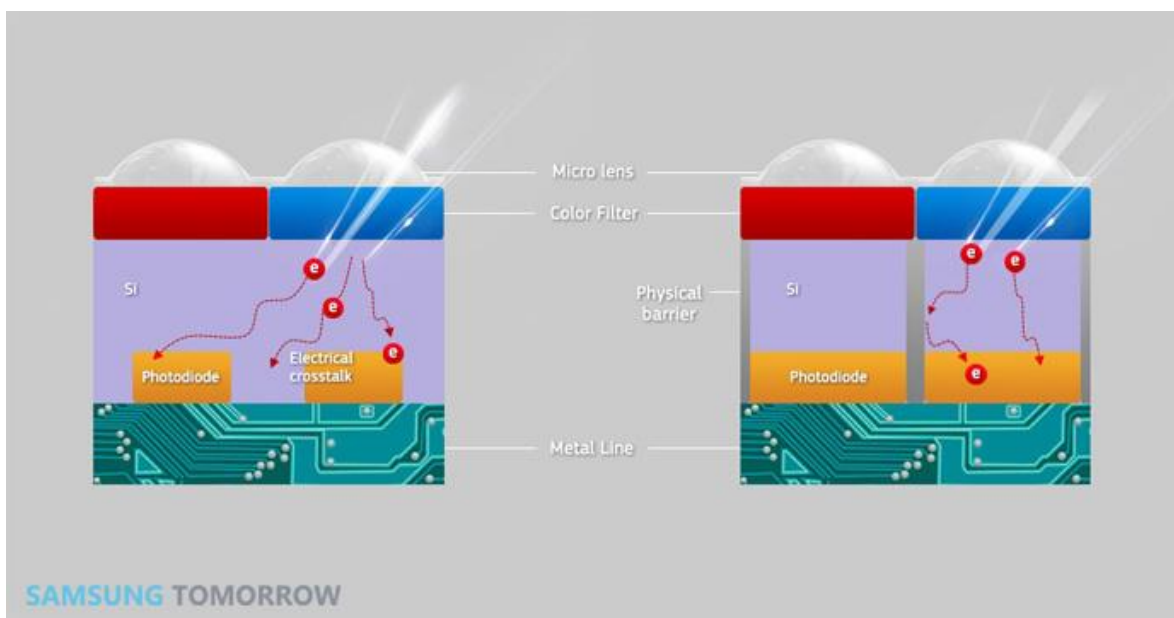
### 5.1.2 OmniVision

Další společností zabývající se výrobou obrazových sensorů pro mobilní telefony je OmniVision. Jejich čipy míří spíše do levnějších telefonů oproti Sony. Výrobní cena jednoho čipu u Sony činí kolem 7 dolarů, zatímco OmniVision nabízí obvykle nižší cenu kolem dvou dolarů. Současné obrazové čipy tohoto výrobce nabízejí obdobné technologie jako u Sony. Řada PureCel nabízí také BSI CMOS čipy s použitím technologie Stacked CMOS. [22, 23]

### 5.1.3 Samsung

Výrobcem obrazových sensorů je také jihokorejská společnost Samsung. Ta vyrábí obrazové čipy BSI nebo ISOCELL CMOS primárně pro své mobilní telefony. Technologie ISOCELL spočívá v izolaci jednotlivých obrazových bodů k zamezení průniku světla mezi body. Snižuje tyto přeslechy až o 30 procent. [24]

Výsledný rozdíl mezi ISOCELL a BSI technologií při použití stejných obrazových procesorů je téměř zanedbatelný. Samsung například používá v telefonech Galaxy S7 oba druhy. První čip vyrábí Sony s technologií BSI (s označením IMX260) a druhý Samsung s použitím ISOCELL (s označením S5K2L1). [25, 26 s. 7]



Obrázek 5.2 - Porovnání BSI CMOS a ISOCELL od Samsungu [24]

#### 5.1.4 Toshiba

Významným výrobcem byla také firma Toshiba Corporation. Její část vyrábějící CMOS obrazové senzory ale v roce 2015 koupila a převzala společnost Sony Semiconductor. Toshiba před tím vyráběla mnoho druhů čipů, přičemž například stojí za 41megapixelovým senzorem PureView použitých v Nokiích. [23, 27]

#### 5.1.5 SK Hynix

Jihokorejská společnost SK Hynix se soustředí především na levnější segment výrobců mobilních telefonů se zaměřením na čínský trh. Vyrábějí BSI CMOS senzory s maximálním počtem obrazových bodů 13 MPx. [22]

#### 5.1.6 Tabulka vybraných senzorů

Následující tabulka 5.1 ukazuje pět vybraných senzorů od dvou největších výrobců a jejich specifikace ze stránek výrobců. Jedná se převážně o senzory z roku 2018.

Tabulka 5.1 – Parametry pěti vybraných obrazových senzorů [28, 29]

Výrobce	Označení senzoru	Počet pixelů	Velikost senzoru	Velikost jednoho pixelu	Technologie
<b>Sony</b>	Exmor RS IMX351	4688 x 3648	1/3,09"	1,00 $\mu\text{m}$	Stacked CMOS BSI
<b>Sony</b>	Exmor RS IMX350	5216 x 4032	1/2,78"	1,00 $\mu\text{m}$	Stacked CMOS BSI
<b>Sony</b>	Exmor RS IMX298	4720 x 3600	1/2,80"	1,12 $\mu\text{m}$	Stacked CMOS BSI
<b>Samsung</b>	ISOCELL S5K2L3	4016 x 3008	1/2,60"	1,40 $\mu\text{m}$	ISOCELL CMOS
<b>Samsung</b>	ISOCELL S5K2L7	4016 x 3008	1/2,56"	1,40 $\mu\text{m}$	ISOCELL CMOS

## 5.2 Výrobci optiky

Stejně jako u zrcadlovek a dalších fotoaparátů, i mobilní telefony mají před senzorem optiku tvořenou několika čočkami. Výrobců je opravdu mnoho, jen v Číně jich je přes 400. Nejedná se o nikterak známé společnosti. Níže v Tabulka 5.2 – Přehled největších výrobců optiky [30] je uvedeno několik největších výrobců. [30]

Tabulka 5.2 – Přehled největších výrobců optiky [30]

<b>Jméno výrobce</b>	<b>Město původu</b>
<b>Sunny optical</b>	Zhejiang
<b>Guangdong Xuye Optoelectronics Technology</b>	Dongguan
<b>Chuanhetian Optronics</b>	Shenzhen
<b>Largan Precision</b>	Taiwan
<b>Shenzen Concept Photoelectric</b>	Shenzhen

## 6 Parametry fotoaparátů v nynějších mobilech

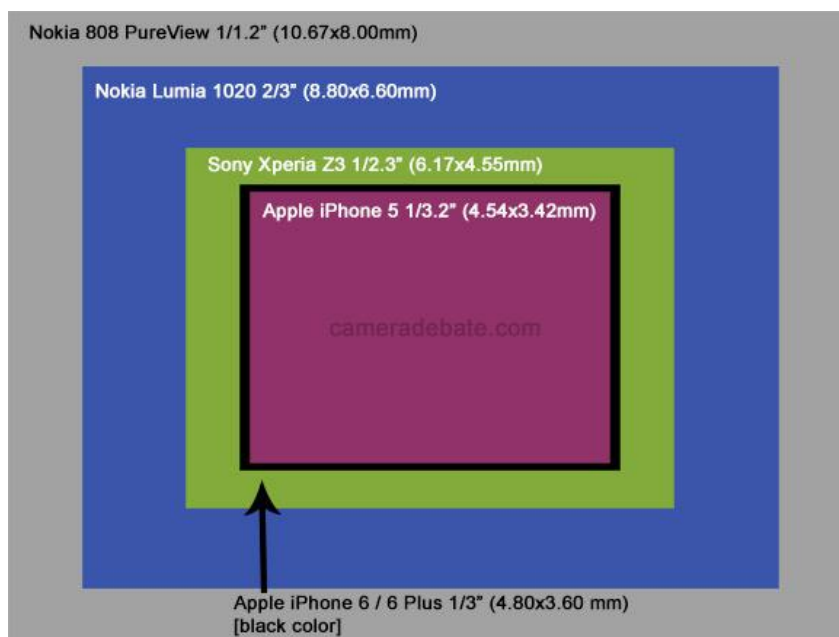
### 6.1 Obrazový senzor

#### 6.1.1 Počet obrazových bodů

Počet obrazových bodů fotoaparátu, o kterém se často hovoří také jako o rozlišení, používané v mobilních telefonech se v současnosti pohybuje od 8 do 20 MPx. Nejběžnější počet u top modelů z posledního roku činí 12 MPx.

#### 6.1.2 Velikost čipu

Úhlopříčka obrazového čipu se pohybuje od 1/2.3" do 1/3.2". Najdou se i výjimky, kdy je použitý čip větší – jako třeba u Lumie 1020, která obsahovala obrazový čip o velikosti 2/3". Na obrázku níže lze pozorovat dnes běžně používané velikosti.



Obrázek 6.1 - Porovnání několika běžně používaných velikostí čipu [31]

#### 6.1.3 Velikost obrazového bodu

Tento parametr se pohybuje od 1 mikrometru do 1,55 mikrometru. Přímo závisí na velikosti celého obrazového senzoru.

## 6.2 Modul fotoaparátu

### 6.2.1 Clonové číslo

Hodnoty minimálního clonového čísla jsou v případě fotoaparátů mobilních telefonů například  $f/1,8$ . Tuto hodnotu nelze přímo porovnávat s klasickým velkým fotoaparátem plného formátu (full frame), jelikož při použití stejné hodnoty bude výsledek na něm zcela odlišný, především co se týče hloubky ostrosti. Děje se tak právě z důvodu malé reálné ohniskové vzdálenosti.

Pro porovnání, jakému clonovému číslu odpovídá zmíněná hodnota na zrcadlovce použijeme tzv. crop-faktor. Po vynásobení reálné ohniskové vzdálenosti tímto číslem dostaneme ohniskovou vzdálenost vztaženou k plnému formátu (full frame). To samé lze provést s minimálním clonovým číslem. Po vynásobení parametru clonového čísla  $f/1,8$  u mobilního telefonu s ohniskovou vzdáleností například 4 mm a senzorem o velikost  $1/3''$ , dostaneme

$$f/1,8 \cdot 7,2 = f/13, \quad (3)$$

kde číslo 7,2 značí crop-faktor. Hloubka ostrosti je tak mnohem větší. Clonové číslo se velmi liší dle cenové kategorie mobilního telefonu. Zatímco ty nejlevnější nabízejí pouze  $f/2,2$ , ty nejlepší nabízejí již  $f/1,6$  jako například senzor IMX351 u telefonu LG V30. Běžně se pohybuje kolem hodnoty  $f/1,9$  –  $f/2,0$ .

Prakticky všechny dnešní mobilní telefony nabízejí pevnou a neměnnou clonu s jednou hodnotou, přičemž se výrobci snaží o co nejnižší číslo. Letos v únoru byl představen mobilní telefon s variabilní clonou – Samsung Galaxy S9. Clonové číslo v jeho případě má hodnotu  $f/1,5$  a  $f/2,4$ , přičemž telefon mezi nimi automaticky přepíná. V manuálním režimu lze použít jakoukoliv hodnotu z těchto dvou, kterou uživatel požaduje. [32]

Proměnlivá clona umožňuje měnit množství dopadajícího světla na senzor. Pokud má telefon pouze pevnou clonu, mění se množství dopadajícího světla jinými parametry, jako například délkou expozičního času nebo citlivostí ISO.

### 6.2.2 Ohnisková vzdálenost

Základní používaná ekvivalentní ohnisková vzdálenost je 28 mm. Tato vzdálenost umožňuje širokouhlé fotky. Nejnovější telefony nahrazují tuto vzdálenost 26 mm, díky čemuž je větší úhel záběru.

Jelikož u telefonů není možné ohniskovou vzdálenost manuálně měnit jako u velkých zrcadlovek, vybavují výrobci telefony více fotoaparáty s různým ohniskem. Velmi často se používá kombinace širokoúhlému snímače s ohniskem 28 mm a teleobjektivem 50 mm. Druhý snímač je většinou používán pro tvorbu portrétních fotografií a slouží také jako dvojnásobný zoom.

Jiní výrobci naopak používají fotoaparát s velmi nízkou ohniskovou vzdáleností pro vytvoření mnohem většího úhlu záběru. Například LG a Lenovo integruje takový snímač jako druhý zadní fotoaparát, bohužel údaj o ohniskové vzdálenosti neudávají. Tento druhý super širokoúhlý snímač tak může mít úhel záběru třeba 125 stupňů. U klasického 28 mm ohniska je přitom 71 stupňů.

### 6.2.3 Ostření

U levnějších telefonů a u fotoaparátů na čelní straně telefonu zpravidla nenalezneme autofokus. Tyto obrazové senzory nabízí pouze fixed focus.

Téměř každý fotoaparát v telefonech na zadní straně až na výjimky nabízí automatické ostření – autofokus. Liší se ale v použité technologie ostření. Nejčastěji a u levnější zařízení nalezneme pouze metodu detekce kontrastu. Mnohé telefony pak nabízejí laserové ostření. Nejnovější pak nabízejí ostření pomocí detekce fázového posunu (PDAF). Nejdál tuto technologii zdokonalil Samsung, který používá PDAF Dual-Pixel. To zajišťuje okamžité zaostření.

### 6.2.4 Stabilizace

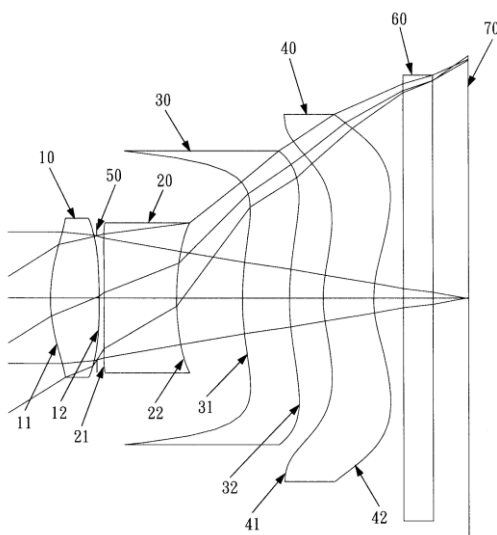
Používá se buď elektronická (softwarová) označovaná také jako Electronic Image Stabilization (EIS), anebo u dražších modelů optická stabilizace označovaná jako Optical Image Stabilization (OIS). Mnohé fotoaparáty u telefonů, například ty na přední straně, nemají žádnou metodu stabilizace. U telefonů s více fotoaparáty (například Samsung Galaxy Note 8) se můžeme setkat s duální optickou stabilizací (Dual OIS), což znamená, že jsou opticky stabilizované oba zadní obrazové senzory.

## 6.2.5 Optika

Optický systém se stejně jako u velkých fotoaparátů skládá ze soustavy čoček, tak aby bylo světlo soustředěno přímo na obrazový senzor s co nejmenším zkreslením. Optika pak přímo definuje ohniskovou vzdálenost  $f$ .

Navrhnout optický systém pro modul fotoaparátu v telefonu je náročné kvůli velmi malým rozměrům samotného telefonu, které jsou navíc stále tenčí. Optický systém se skládá z několika čoček z různých materiálů. Využívá se buď sklo nebo plast či jejich kombinace. Označování pak probíhá číslem, které určuje počet čoček následováno písmenem určující materiál. Písmeno „p“ určuje materiál plast, písmeno „g“ pak sklo (glass). [33]

Setkáváme se pak s označením například „4p“, které nám říká, že optický systém má čtyři plastové čočky. Výrobci pak mnohdy uvádí pouze počet čoček optické soustavy. Například společnost Apple uvádí u svého nejnovějšího modelu použití šesti čoček. [34]



Obrázek 6.2 – Schéma čtyřčlenného optického systému [35]

Na obrázku 5.2 můžeme vidět příklad čtyřčlenného optického systému s označením „4p“ pro použití v mobilních telefonech. Jednotlivé plastové čočky jsou označeny 10, 20, 30 a 40. V optické sestavě je také umístěn infračervený filtr, který je označen 60 a stará se o odfiltrování nepotřebného infračerveného spektra. Tento filtr nemá žádný vliv na optiku.



## 7 Použití stejných senzorů v jiných přístrojích

Stejné obrazové senzory, které se používají v mobilních telefonech naleznou dnes uplatnění také v dalších přístrojích. Příkladem může být senzor Sony Exmor R IMX377, který je osazován do telefonu Nexus 5X. Stejný senzor používá akční kamera Xiaomi Yi 4K. Ta má ale upravenou optiku pro širší úhel záběru 155 stupňů. Stejný senzor je pak také použit v dronu DJI Mavic Pro. Použití senzorů z mobilních telefonů je tedy vcelku běžné i v dronech a akčních kamerách. [36, 37]



Obrázek 7.1 - Modul fotoaparátu se senzorem společnosti Samsung pro mobilní telefon [28]

## 8 Metodika měření parametrů fotoaparátů v mobilních telefonech

V současné době existuje mnoho standardů a organizací, zabývajících se popisem měření různých vlastností digitálních fotoaparátů a také fotoaparátů v telefonech. Mezinárodní organizace pro normalizaci neboli International Organization for Standardization (ISO) vydává několik standardů, které jsou užitečné v rámci tohoto měření.

Standard ISO 12233 popisuje metody pro měření rozlišení a prostorovou frekvenční odezvu. Standard ISO 15739 popisuje měření viditelného šumu. Standard 17850 definuje protokol k měření geometrického zkreslení. V roce 2016 s využitím již existujících standardů vytvořila organizace IEEE standard CPIQ – Camera Phone Image Quality. Jeho cílem je kvantifikovat kvalitu fotoaparátů mobilních telefonů. Tento standard se zaměřuje na výslednou kvalitu snímků pro běžné uživatele a používá automatické nastavení zařízení s výjimkou nastavení nejnižší možné komprese JPEG. Zároveň kromě objektivního hodnocení definuje také subjektivní hodnocení.

Společnost DxOmark testuje v rámci svého testu *DxOmark mobile* fotoaparáty mobilních zařízení a dle svých protokolů jim udává hodnocení. Na toto hodnocení se velmi často odkazuje na publicistických webech. V současné době je zde jako telefon s nejlepším fotoaparátem udáván Huawei P20 Pro. [38]

### 8.1 Definice parametrů

V následující části si definujeme významné parametry pro určení kvality fotoaparátu v mobilních telefonech. Kromě těchto parametrů je důležité sledovat také možný výskyt různých artefaktů popsaných v kapitole č.3.2 – Artefakty CMOS senzoru.

#### 8.1.1 Modulační přenosová funkce

Modulační přenosová funkce neboli Modulation Transfer Function (MTF) vychází z optické přenosové funkce. Optická přenosová funkce neboli Optical Transfer Function (OTF) má také komplexní složku. Pokud tuto složku vynecháme, získáme právě MTF. Optická přenosová funkce  $H(u,v)$  je definována jako Fourierova transformace funkce rozptylu bodu (PSF) soustavy vztaženo k zobrazovací soustavě. Souřadnice  $u,v$  značí prostorové frekvence

zpravidla udávané v cyklech na milimetr [cy/mm] nebo v počtu čar na výšku obrazu [lw/ph] (line widths/picture height).

$$MTF = |H(u, v)| \quad (4)$$

Definice a tím pádem vzorec k výpočtu modulační přenosové funkce je poměr výstupního kontrastu ku vstupnímu v závislosti na prostorové frekvenci.

Pro vyhodnocení MTF podle normy ISO se využívá:

$$MTF(f) = \frac{K(f)}{K(0)} \quad (5)$$

$$K(0) = \frac{L_W - L_B}{L_W + L_B} \quad (6)$$

$$K(f) = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}, \quad (7)$$

kde:

$L_B$  je minimální hodnota jasu pro černé oblasti při nízké prostorové frekvenci

$L_W$  je maximální hodnota jasu pro bílé oblasti při nízké prostorové frekvenci

$L_{min}$  je minimální hodnota jasu pro oblasti při prostorové frekvenci  $f$

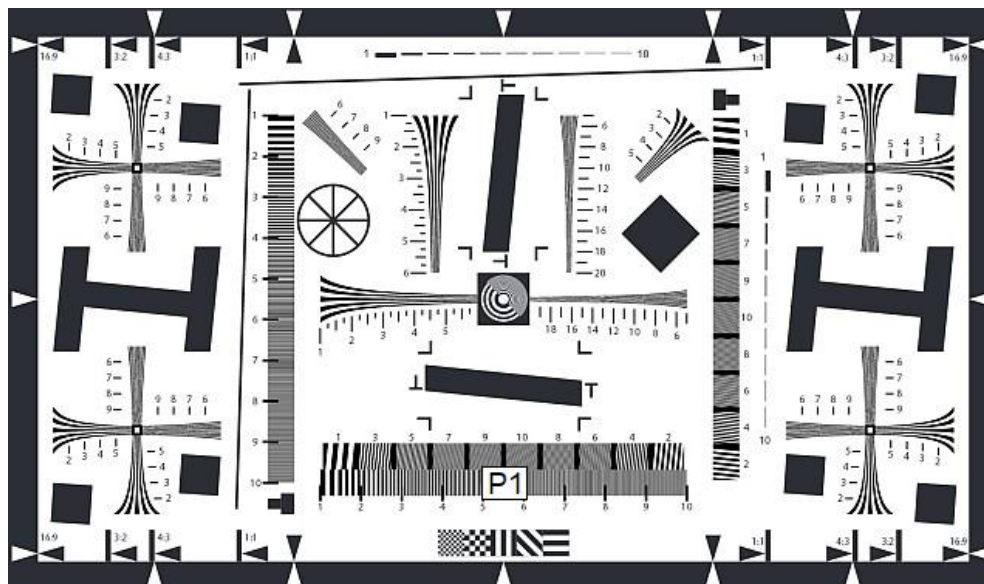
$L_{max}$  je maximální hodnota jasu pro oblasti při prostorové frekvenci  $f$

Funkce MTF se normuje, aby nabývala hodnot od nuly do jedné.

Každý obrazový prvek (objektiv, senzor atd.) má svoji vlastní MTF. Ve výsledku se jednotlivé hodnoty vynásobí a získá se tak hodnota celého systému. Jelikož u mobilních telefonů nelze tyto části nikterak odpojit, budeme měřit celkovou MTF celého modulu fotoaparátu se senzorem.

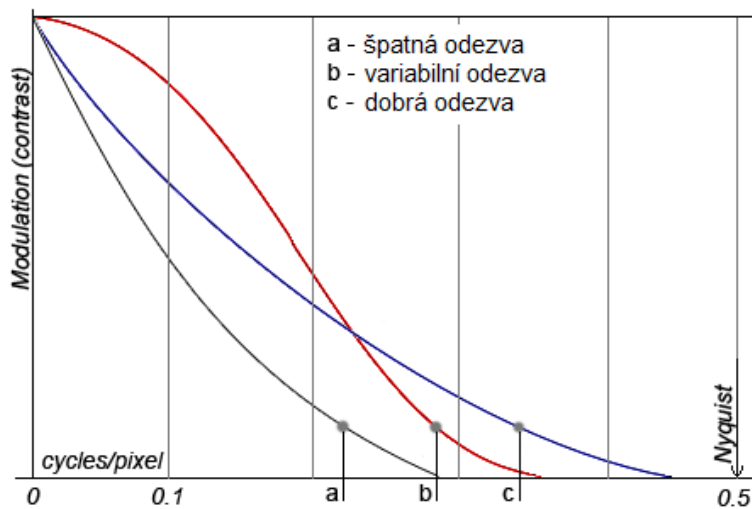
Díky určení MTF lze zjistit také vizuální mez rozlišení. To je nejvyšší prostorová frekvence, kterou fotoaparát dokáže bez zkreslení zaznamenat. Funkce MTF jde za vizuální mez rozlišení a měří prostorové frekvence i za hranicí té nejvyšší prostorové frekvence, kterou již fotoaparát nedokáže zaznamenat. Na grafu MTF je tato hodnota označována MTF<sub>10</sub> neboli pokles na 10 procent z normované křivky.

Vizuální mez rozlišení lze pozorovat také prostým pohledem okem. Je to oblast na snímku, kde se již na obrazci ztrácí vzorek, barvy jsou v podstatě slité a nelze rozlišit jednotlivé čáry od sebe. Pro porovnávání obrazových soustav se velmi často používá parametr MTF<sub>50</sub> neboli pokles křivky na 0,5 (50 procent). Některé zdroje pak využívají a označují MTF<sub>50</sub> a MTF<sub>50P</sub> jako údaj o ostrosti snímku.



Obrázek 8.1 – Obrazec dle standardu ISO 12233, graf P1 se využívá pro měření MTF

Při měření MFR je nutné změřit osvětlení  $E$  [lx], jelikož nedostatečné osvětlení může tento test ovlivnit. Fotoaparát (mobilní telefon) je nutné umístit tak, aby jeho zorné pole při poměru stran 4:3 zabíralo obrazec ISO 12233 tak, že není vidět černý rámeček kolem obrazce s bílými šipkami a zároveň jsou přesně vidět černé šipky ohraničující poměr stran 4:3.



Obrázek 8.2 – Různé tvary modulační přenosové funkce [39]

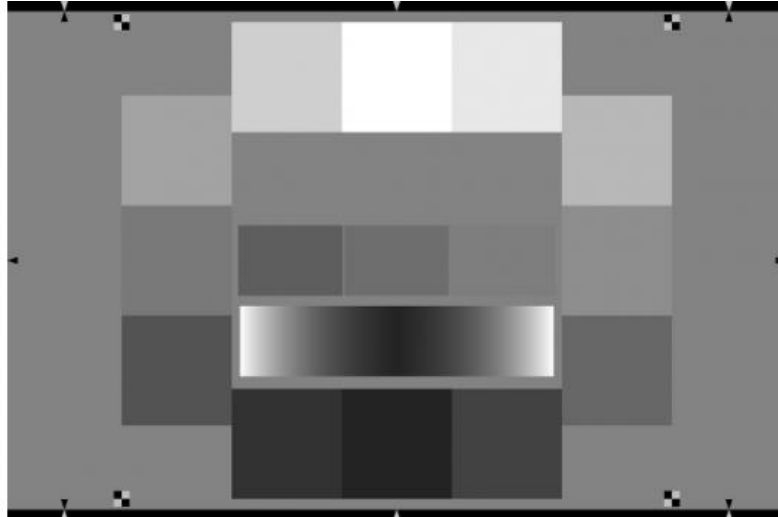
### 8.1.2 Šum

Při měření šumu na snímku musíme odlišit termín odstup signálu od šumu (SNR ratio) a termín vizuální šum. Standard ISO 15739:2013 definuje oba tyto termíny. Zatímco SNR ratio je poměr obecně známý, pojem vizuální šum byl představen v aktualizaci tohoto standardu roku 2013. Vizuální šum je definován vzhledem k vlastnostem lidského oka, stále je ale založen na SNR.

Obrazců pro změření šumu je několik, všechny mají ale společné rysy v podobě několika černobílých čtverců s různou úrovní jasu. To je důležité zejména proto, že šum je více viditelný v tmavších odstínech šedé barvy. Pro měření lze použít obrazec eSFR ISO, ISO 15739 nebo ISO 14524 OECF.

Standard IEEE CPIQ používá k definici měření vizuálního šumu standard ISO 15739 s přihlédnutím k měření fotoaparátů v mobilních telefonech. Oproti standardu ISO uvádí CPIQ, že není možné splnit některé přesné nastavení měřeného zařízení, jelikož je neumožňují. Jako obrazec má být užito ISO 14524:2009 OECF.

Při měření vizuálního šumu je nutné dbát na přesnou úroveň osvětlení, které je typicky 10-1000 lx. Tuto hodnotu je třeba zaznamenat a uvádět u výsledků měření. Obrazec při měření musí zabírat celé zorné pole fotoaparátu.



Obrázek 8.3 – Obrázec pro měření šumu dle standardu ISO 15739

Pro výpočet vizuálního šumu můžeme využít vzorec (8) a postup výpočtu uvedený ve standardu IEEE CPIQ.

$$\Omega = \log_{10}(1 + 23 \times \sigma_L^2 + 4,24 \times \sigma_a^2 - 5,47 \times \sigma_b^2 + 4,77 \times \sigma_{La}^2), \quad (8)$$

kde:

$\Omega$	celkový vizuální šum
$\sigma_L^2$	je rozptyl $L^*$
$\sigma_a^2$	je rozptyl $a^*$
$\sigma_b^2$	je rozptyl $b^*$
$\sigma_{La}^2$	je kovariance $L^*a^*$

### 8.1.3 Dynamický rozsah

Dynamický rozsah lze změřit při použití stejných obrazců jako v předchozím případě měření šumu (SNR). K výpočtu potřebujeme dvě hodnoty, přičemž dynamický rozsah je poměr těchto hodnot. Za prvé je třeba nejnižší hodnota jasu, při které se SNR rovná 1 (0 dB). Druhou hodnotou je nejvyšší jas, který ještě negeneruje saturované pixely (přesvícené). Každý pixel dokáže pohltit určité maximální množství fotonů a jakmile je toto množství překročeno, hovoříme o něm jako o saturovaném pixelu.

### 8.1.4 Reprodukce barev

K měření věrnosti reprodukce barev (sytost barvy) lze využít různé obrazce řady standardů jako třeba eSFR ISO, SFRplus nebo X-Rite Colorchecker. Na obrázku 8.4 lze vidět testovací obrazec X-Rite Digital ColorChecker SG, který má v šachovnici 14 x 10 různé vzorky barev. Ten lze zakoupit například na serveru Amazon za 350 liber. [40]

Dle doporučení standardu CPIQ se má použít právě zmíněný obrazec Digital ColorChecker SG a snímaný obrazec má zabírat na hledáčku zhruba jednu třetinu. Ostatní okolní plocha má mít neutrální šedou barvu po celé ploše. Černobílé čtverce na obrazci nebudou využity k výpočtům.



Obrázek 8.4 - Obrazec X-Rite Digital ColorChecker SG [40]

Před měřením – vyfocení snímků vybranými zařízeními – je nutné zjistit kolorimetrem hodnotu barev, která bude sloužit jako referenční a budeme ji považovat za skutečnou.

Výpočty je nutné provádět v barevném prostoru CIE  $L^*a^*b^*$ . Tento prostor má tři souřadnice, přičemž  $L^*$  reprezentuje světlost barvy od 0 (černá) do 100 (bílá). Polohu mezi červenou a zelenou popisuje souřadnice  $a^*$  a souřadnice  $b^*$  popisuje polohu od žluté k modré.

Dle standardu IEEE CPIQ lze poté převedená data v prostoru CIE  $L^*a^*b^*$  vypočítat následovně:

$$C_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{a_{Mi}^2 + b_{Mi}^2} \quad (9)$$

$$C_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{a_{Ri}^2 + b_{Ri}^2} \quad (10)$$

$$CL_{sg} = \frac{C_M}{C_R} \times 100, \quad (11)$$

kde:

$a_{Mi}$ a $b_{Mi}$	jsou hodnoty barevného prostoru $a^*$ a $b^*$ pro změřená data $i$
$a_{Ri}$ a $b_{Ri}$	jsou hodnoty barevného prostoru $a^*$ a $b^*$ pro referenční data $i$
$N$	počet CIELAB trojic
$C_M$	střední hodnota sytosti barvy změřených dat
$C_R$	střední hodnota sytosti barvy referenčních dat
$CL_{sg}$	výsledná hodnota sytosti barvy

### 8.1.5 Vinětace

Vinětace je jev, při kterém na oblasti okraje snímku dopadá méně světla než na jeho střed, a tudíž jsou tmavší. Pokud daný modul fotoaparátu trpí vinětací, musí se tyto ztmavené oblasti softwarově zesvětlit. Jelikož je vinětace neměnný jev dané optické soustavy, lze ji jednoduše softwarově odstranit. Výraznější vinětaci lze pozorovat také okem. V ideálním případě nemá fotoaparát žádnou vinětaci.

Zjistit vinětaci lze vyfocením rovnoměrně osvětleného bílého papíru. Standard ISO 17957 a literatura [8] rozděluje vyfocený snímek na několik bloků a pak počítá odchylku pomocí vzorce číslo 14. Obdobný vztah uvádí standard CPIQ při měření barevné uniformity:

$$D(i) = \sqrt{(L(i) - \bar{L})^2} \quad (12)$$

$$D_{max} = \max D(i), \quad (13)$$

kde:

$\bar{L}$	je střední hodnota na celém snímku
$L(i)$	jsou střední hodnoty jednotlivých bloků
$D_{max}$	je maximální odchylka od střední hodnoty ze všech hodnot



### 8.1.6 Geometrické zkreslení

Geometrické zkreslení lze určit vyfocením šachovnice s body nebo mřížky. Je nutné definovat přesnou vzdálenost bodů od sebe, která musí být na celém obrazci stejná. Body mřížky mají být černé kulaté tečky na bílém pozadí. Průměr každého bodu musí být stejný a jeho velikost musí být taková, aby jeho průměr na výsledném snímku byl větší než 10 pixelů.

Doporučuje se také, aby počet bodů nebyl menší než 21 x 15 pro poměr stran 4:3. Aby bylo možné určit přesný střed mřížky je nezbytné, aby měla mřížka lichý počet řádků a sloupců ve kterých jsou uspořádány body. Vytisknutý obrazec musí být rovinný.

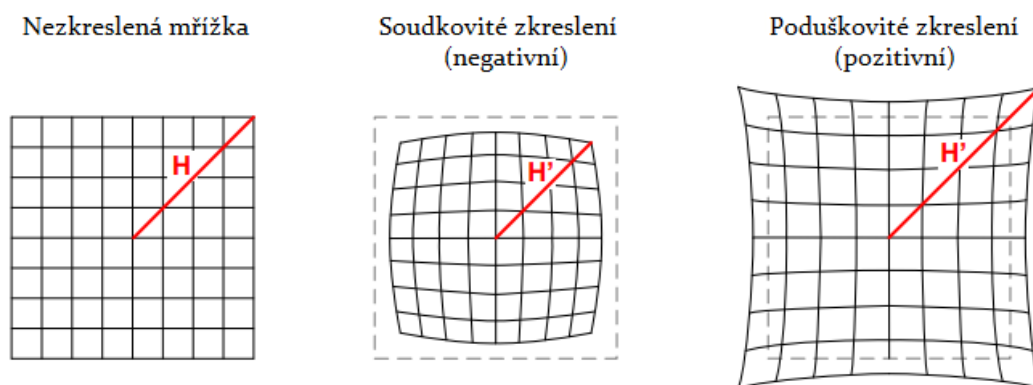
Přístroj, jímž fotíme testovací snímky, musíme umístit dle kapitoly 8.2.1. Focená mřížka s body musí vyplnit celé zorné pole přístroje.

K výpočtu je nutné mít vyfocený snímek, který porovnáme s originálním a určíme, o kolik se změnila pozice jednotlivých bodů podle následujícího vzorce dle standardu IEEE CPIQ:

$$GZ = 100 \times \frac{H' - H}{H}, \quad (14)$$

kde:

- $H$  je nezkreslená skutečná vzdálenost bodu od středu
- $H'$  je naměřená vzdálenost bodu od středu
- $GZ$  je geometrické zkreslení, v procentech, o kolik se liší od nezkresleného obrazce, znaménko určí druh zkreslení



Obrázek 8.5 – Geometrické zkreslení [1]

Při měření se čtvercová mřížka na výsledném snímku může jevit zkreslená. Pokud bude vzdálenost od středu  $H'$  menší než původní vzdálenost  $H$ , nazýváme tento jev soudkovité zkreslení (anglicky barrel distortion). Na výsledné fotografii se toto zkreslení projeví jako nafouknutý střed mřížky. Jestli bude vzdálenost od středu  $H'$  větší než původní  $H$ , jev pojmenujeme jako poduškovité zkreslení (anglicky pincushion distortion). Výsledný snímek má natažené rohy.

Projevit se může též kombinace obou předchozích zkreslení, které se v anglické literatuře označuje jako „wave distortion“. Na výsledném snímku tak například u středu obrazce můžeme vidět soudkovité zkreslení a u okrajích pak poduškovité. Geometrické zkreslení je obvykle způsobeno nedokonalou optickou soustavou v modulu fotoaparátu a lze odstranit softwarovými úpravami.

## 8.2 Definice měření

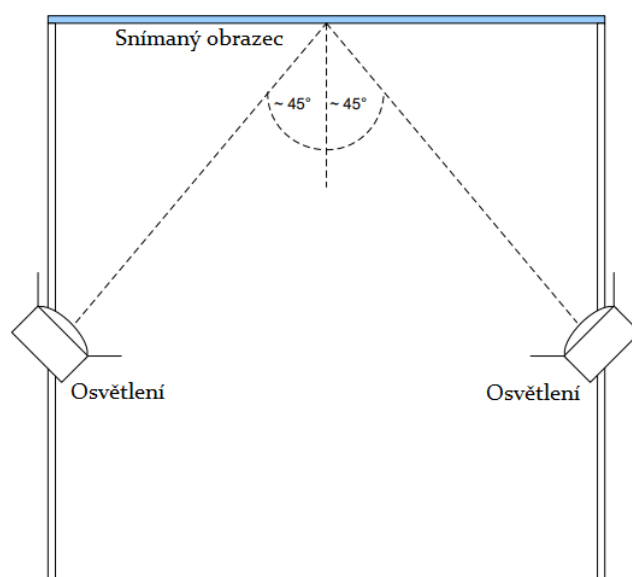
### 8.2.1 Podmínky v měřené místnosti

Teplota místnosti, ve které bude probíhat měření by měla být 23 stupňů Celsia  $\pm 2$  stupně Celsia dle doporučení různých standardů (jako například IEEE CIPQ 1858). Relativní vlhkost místnosti by měla být 50 %  $\pm 30$  %.

Měřené zařízení je nutné umístit na stativ tak, aby jeho hledáček směřoval přesně do středu snímaného obrazce. Tomu lze napomoci umístěním zrcadla do středu snímaného obrazce. Posléze v hledáčku zařízení nalezneme pomocí zrcadla střed.

Pokud se jedná o reflektivní (odrazový) snímáný obrazec, je nutné jej osvětlit. Světelné zdroje by dle standardu IEE CPIQ měli být umístěny dle obrázku číslo 8.7. Oba tyto světelné zdroje musí nabízet stejnou barevnou teplotu  $5700\text{ K} \pm 1000\text{ K}$ .

Obecně platí, že snímáný obrazec musí být dostatečně a rovnoměrně osvětlen. Světelné zdroje nesmí být v hledáčku fotoaparátu vidět. Telefon či fotoaparát, kterým snímáme obrazec, nesmí vytvářet stín na obraze. Pokud se jedná o obrazec přizpůsobený na podsvícení, je nutné jej podsvítit. Ve všech případech je třeba zkontrolovat, zda je osvětlení homogenní.



Obrázek 8.6 – Nasvícení obrazce dle standardu IEE CPIQ [1]

### 8.2.2 Nastavení měřeného zařízení

Dle standardu IEEE CPIQ má být provedeno měření v automatickém režimu. Je tedy nutné nechat na přístroji zvolit automatické vyvážení bílé, expozici, rychlost uzávěrky a ISO. V tomto se fotí do formátu JPEG na nejvyšší možnost kvalitu (nejnižší kompresi), je-li možné toto nastavit. Důležité je také zaznamenat verzi operačního systému a verzi aplikace využitě pro pořízení snímku, jelikož to může výslednou kvalitu také ovlivnit. Toto měření simuluje běžného uživatele, který pravděpodobně bude využívat automatický režim.

Je důležité před každým měřením zkontrolovat, zda je krycí sklíčko fotoaparátu na mobilním telefonu dokonale vyčištěné. Každá nečistota jako například mastný nebo upatlaný povrch sklíčka fotoaparátu, což není na mobilním telefonu nic neobvyklého, může ovlivnit výslednou kvalitu snímku.

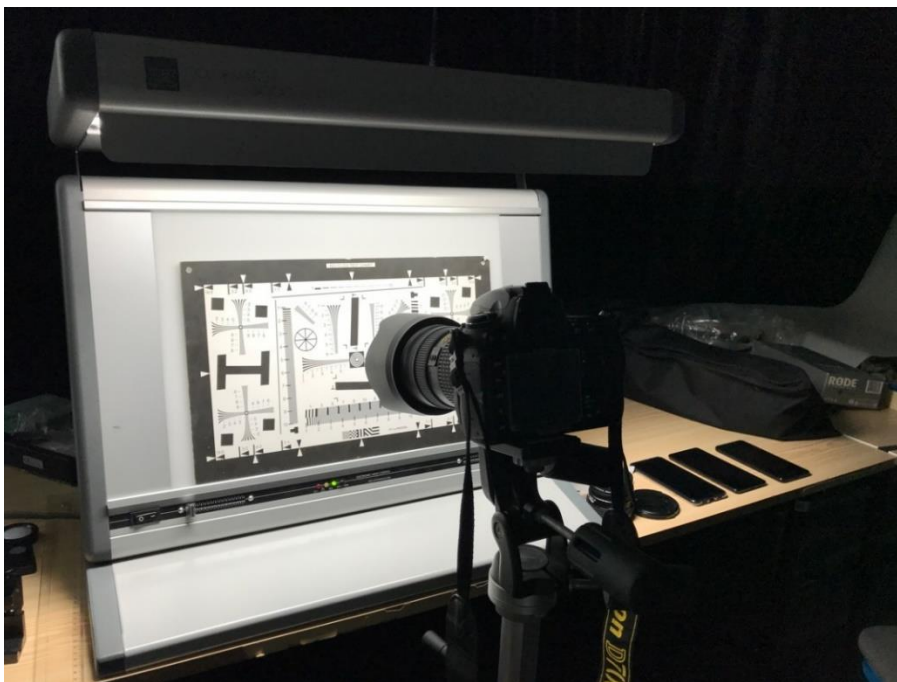
## 9 Vlastní měření a vyhodnocení parametrů

V rámci vlastního měření byla provedena měření modulační přenosové funkce, vizuálního šumu, geometrického zkreslení a vinětace. Měřené zařízení bude pro naše měření nastaveno pro dvě různá nastavení. První měření se zaměří na focení snímků při automatickém nastavení přístroje dle doporučení standardu CPIQ popsané v kapitole 8.2.2.

V druhém případě bude na telefonu aktivován manuální režim fotoaparátu. Zde nastavíme na všech zařízeních stejné údaje – stejné vyvážení bílé, stejnou rychlost uzávěrky, stejnou hodnotu expozice a stejnou hodnotu ISO. Všechny měřená zařízení je třeba nastavit na manuální ostření a pečlivě zaostřit na měřený obrazec.

Při tomto prvním měření aktivujeme fotografování do bezztrátového formátu RAW, které mnoho telefonů na trhu umožňuje. Jedná se většinou o focení do bezztrátového standardizovaného formátu digitální negativ (DNG). Výhodou tohoto měření je možnost přímo porovnat jednotlivé obrazové senzory a modul fotoaparátu bez zásahu obrazového procesoru a bez komprese.

Pro zpracování fotografií vyfocených ve formátu RAW je převedeme bez jakéhokoliv zpracování do formátu TIFF bez komprese.



Obrázek 9.1 – Fotka z měření

Pro vyfocení snímků v automatickém režimu byla využita vždy vestavěná aplikace pro focení od výrobce. Pro manuální režim byla použita vestavěná aplikace tehdy, pokud umožňovala aktivovat ukládání snímků ve formátu RAW. Pokud to neumožňovala, byla na telefonech s operačním systémem Android použita aplikace Open Camera verze 1.43 s podporou Camera2 API [41]. Na telefonech se systémem iOS byla využita aplikace ProCam 5 verze 10.5.1 [42]. Pro vyhodnocení v programu MATLAB R2018a byly soubory digitálního negativu převedeny na standard TIF bez jakékoliv úpravy v programu Adobe Photoshop.

Jako stativ byl využit Velbon CX 560. Pro upevnění telefonu na stativ byl využit nástavec Ulanzi Metal Smartphone Mount. Pro změření osvětlení posloužil digitální luxmetr DX-100.

## 9.1 Popis měřených vzorků

Pro měření parametrů byl vybrán vzorek tří telefonů vyšší třídy od různých výrobců, které se nachází na vrcholu žebříčku DxOmark Mobile. Jedná se převážně o aktuální top modely z letošního, nebo loňského roku. Jako čtvrtý vzorek byl vybrán telefon střední třídy, který umožňuje focení do formátu RAW, aby bylo možné provést všechna měření. Pro srovnání s konvenčním digitálním fotoaparátem je vybrána zrcadlovka Nikon D700.



Obrázek 9.2 – Vlastní koláž testovaných telefonů

### 9.1.1 Apple iPhone 7

Apple iPhone 7 obsahuje obrazový senzor o velikosti  $1/3''$  s počtem 12 milionů obrazových bodů. Senzor vyrábí firma Sony a jedná se o Exmor RS. Přesné označení senzoru není známo. Optická soustava tohoto zařízení se skládá z šesti čoček a zajišťuje ekvivalentní ohniskovou vzdálenost 28 mm. Clonové číslo je  $f/1,8$ . Telefon je vybaven optickou a elektronickou stabilizací a automatickým ostřením PDAF.

### 9.1.2 Google Pixel 2

Google Pixel 2 má obrazový senzor o velikosti  $1/2,6''$  s 12,2 miliony obrazových bodů. Velikost jednoho bodu je tak 1,4 mikrometru. Clonové číslo je  $f/1,8$ . Zařízení disponuje optickou stabilizací a laserovým ostřením včetně PDAF. Dle neoficiálních informací Google Pixel 2 obsahuje senzor Exmor RS IMX362 od Sony. Tento telefon je z konce roku 2017.

### 9.1.3 Huawei P20

Huawei P20 nabízí dva fotoaparáty na zadní straně vedle sebe. Prvním je RGB senzor s počtem obrazových bodů 12 Megapixelů. Tento senzor má velikost  $1/2,3''$  a jeden obrazový bod je velký 1,55 mikrometru. Clonové číslo je  $f/1,8$  a ekvivalentní ohnisková vzdálenost 27 mm.

Druhý senzor je monochromatický a nabízí 20 Megapixelů. Jeho velikost je  $1/2,78''$  a clonové číslo tohoto senzoru je  $f/1,6$ . Ohnisková vzdálenost je stejná. Automatické ostření zajišťuje PDAF a laserové ostření. Při fotografování v automatickém režimu jsou využívána data z obou senzorů a výsledný barevný snímek má velikost 20 Megapixelů. Při fotografování do formátu RAW má ale barevný snímek 12 Megapixelů. Jedná se o telefon z roku 2018.

### 9.1.4 Nokia 5

Nokia 5 obsahuje obrazový senzor o velikosti  $1/3''$  s 13 miliony obrazových bodů. Velikost jednoho bodu činí 1,12 mikrometru. Clonové číslo je zde  $f/2,0$ . Ostření zajišťuje technologie PDAF. Další podrobnosti o senzoru nejsou známy. Telefon Nokia 5 je zástupcem střední třídy z loňského roku a jeho cena je mnohem nižší než předchozích zařízení.

### 9.1.5 Fotoaparát Nikon D700

Digitální zrcadlovka Nikon D700 s objektivem Nikon 24-70 mm  $f/2,8$  AF-S G ED je využit jako konvenční fotoaparát. Nikon D700 nabízí CMOS senzor plného formátu (full frame) s poměrem stran 3:2. Počet obrazových bodů činí  $4\,256 \times 2\,832$  (12,1 Megapixelů). Citlivost ISO lze nastavit v rozsahu 200-6400. Jedná se o zrcadlovku z roku 2008. Objektiv měl nastavenou ohniskovou vzdálenost na 28-32 mm po dobu měření.

## 9.2 Modulační přenosová funkce

Měření modulační přenosové funkce proběhlo na dvou obrazcích. Prvním z nich byla odrazná tabulka DCR<sub>3</sub> dle standardu ISO 12233, která nabízí na grafu P<sub>1</sub> prostorovou frekvenci od 100 do 1000 lw/ph. Druhá tabulka byla DCR<sub>4</sub> dle standardu ISO 12233 přizpůsobená na podsvícení. Tato tabulka nabízí prostorovou frekvenci od 1200 do 3000 lw/ph, čímž je mnohem vhodnější pro měření fotoaparátů s vysokým rozlišením v řádech desítek Megapixelů.

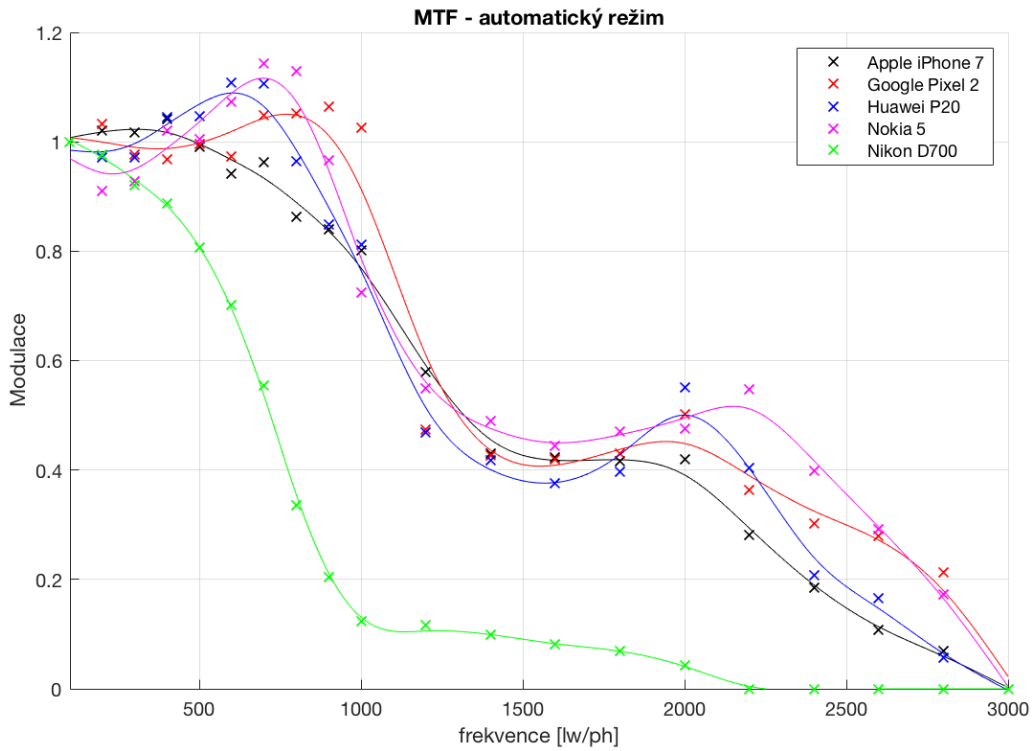
Při měření v automatickém režimu bylo vždy zkontrolováno, zda je zaostřeno na snímáný obrazec. To je při měření funkce MTF velmi důležité. Osvětlení tabulky DCR<sub>3</sub> bylo změřeno 9900 lx a podsvícení tabulky DCR<sub>4</sub> bylo mírně nehomogenní, avšak na testovaném grafu P<sub>1</sub> se pohybovala hodnota kolem 8200 lx. Při snímání tabulky DCR<sub>3</sub> bylo voleno nastavení ISO 50, popřípadě co nejnižší možné, a expoziční čas 1/160. U tabulky DCR<sub>4</sub> bylo voleno ISO 200 a expoziční čas 1/640. Toto nastavení bylo mírně změněno, pokud by fotka byla příliš přesvícena či naopak příliš tmavá.

### 9.2.1 Vyhodnocení

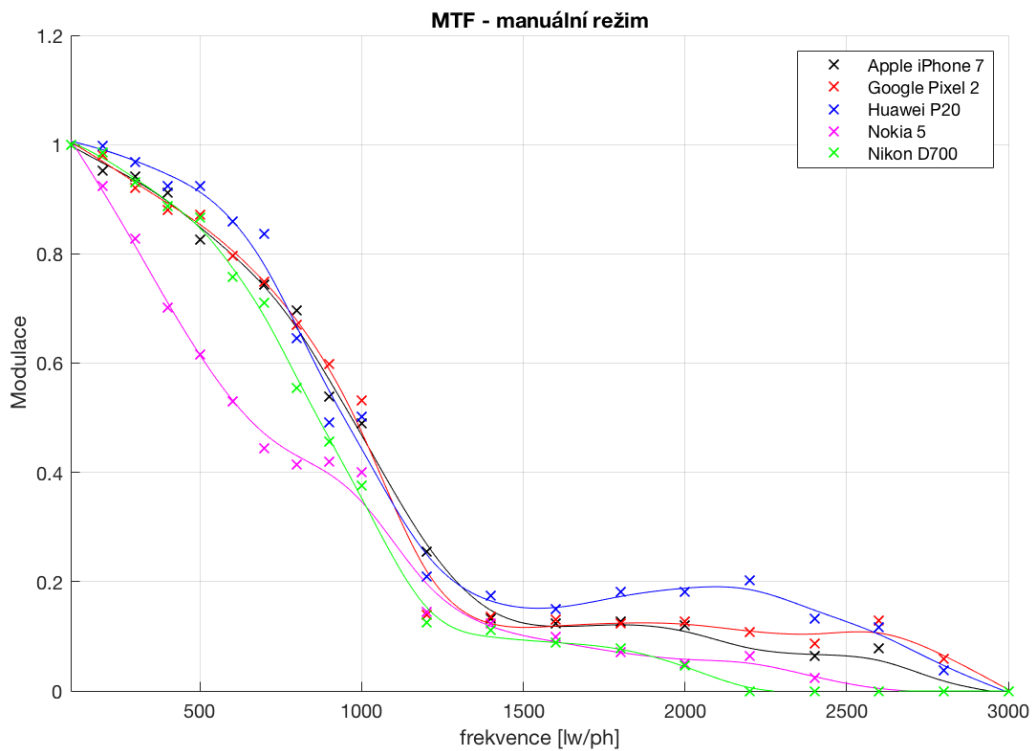
Výsledky nám ukazují, že všechny telefony oproti konvenčnímu fotoaparátu fotografie dost doostřují v případě prvního měření v automatickém režimu. Na grafu lze pozorovat vcelku konstantní odezvu u telefonů do frekvence 1000 lw/ph. Tuto odezvu má nejvíce konstantní telefon Google Pixel 2. Hodnota modulace u většiny telefonů přesahuje číslo jedna na frekvencích okolo 700 lw/ph. To je opět pravděpodobně způsobeno doostřováním fotografií z výroby. Díky tomu působí Nikon D700 jako nejhorší z vybraných vzorků, jelikož jeho obrazový procesor nedoostřuje.

U těchto digitálních zrcadlovek se předpokládá, že uživatel fotí spíše do formátu digitálního negativu a posléze fotografie v programu v počítači sám doostří dle potřeby. Překvapivě nejlevnější telefon Nokia 5 dosáhl podobných výsledků jako výrazně dražší modely.

V druhém měření v manuálním režimu lze pozorovat na grafech u telefonů, že spád křivky je plynulejší a nedochází k tak rychlému pádu u frekvence 1000 lw/ph a 1200 lw/ph. Zde se totiž nachází změna tabulky DCR<sub>3</sub> za DCR<sub>4</sub>. Z tohoto grafu nejlépe dopadl telefon Huawei P20. Jeho fotografie má ale opravdu velmi výraznou vinětaci, která mohla jeho křivku ovlivnit. Na grafu lze také pozorovat, že nejhůře dopadl telefon Nokia 5, který je nejlevnější ze všech zařízení.



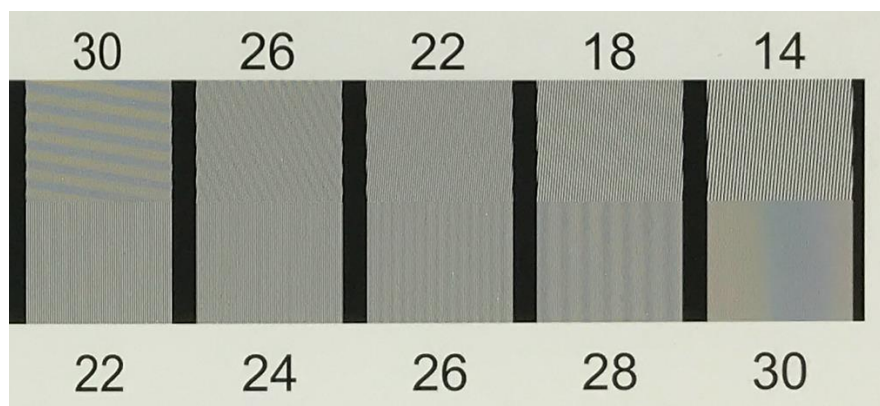
Graf 9.1 - Modulační přenosová funkce – automatický režim



Graf 9.2 - Modulační přenosová funkce – manuální režim



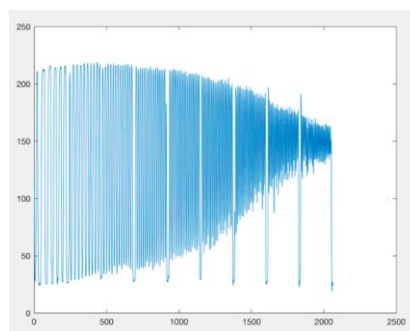
Při tomto druhém měření již dopadl konvenční fotoaparát velmi podobně jako testované telefony. Křivky jsou podobné pravděpodobně také z důvodu podobného počtu obrazových bodů senzorů, který se pohybuje od 12 do 13 Megapixelů. Projevil se také aliasing, a to na všech telefonech na prostorové frekvenci 3000 lw/ph, jak lze vidět na obrázku 9.3. Výsledné grafy a tabulky MTF všech přístrojů lze nalézt v příloze A.



Obrázek 9.3 – Aliasing v případě iPhone 7, automatický režim (JPEG)

### 9.2.2 Způsob vyhodnocení

Pro vyhodnocení funkce MTF byl využit program MATLAB a Microsoft Excel. V programu Matlab byl napsán jednoduchý skript. Ten nejdříve načte obrázek. Poté je nutné zadat řádek, kde se potřebný obrazec na tabulce ISO nachází a poté jeho rozsah na řádku. Pak je vykreslen graf potřebného obrazce. Z tohoto obrazce jsou čteny data ručně a průměrovány v případě prvního obrazce DCR3. V případě obrazce DCR4 je nutné zadat u fotografie rozsah na řádku každé prostorové frekvence a Matlab pak spočítá horní a dolní střední hodnotu na požadované frekvenci. Další vyhodnocení probíhá v programu Excel, kde pomocí vzorců v kapitole 8.1.1 dojde k výpočtům MTF. Data jsou pak převedena zpět do Matlabu, kde jsou vykresleny grafy.



Obrázek 9.4 – Nikon D700 – Vykreslení potřebného grafu z tabulky ISO 12233 DCR3 pro další zpracování

## 9.3 Vizuální šum

Pro měření vizuálního šumu byl využit obrazec OECF podle standardu ISO 15739 s dvanácti čtverci různého odstínu šedé barvy. Fotografování proběhlo při dvou intenzitách osvětlení (podsvícení) a to minimální a maximální možné hodnoty, kterou šlo na stojanu nastavit. Osvětlení bylo tedy 430 lx pro první a 8300 lx pro druhé měření. V manuálním režimu při fotografování bylo na telefonech nastaveno následující nastavení. Pro nízkou intenzitu osvětlení ISO 200 a expoziční čas 1/100 s. Pro druhé měření při vyšší intenzitě osvětlení ISO 50 a 1/400 s. Pokud zařízení nepodporuje tak nízkou hodnotu ISO, byla zvolena nejnižší možná hodnota (případ Nokia 5 a Nikonu D700).

### 9.3.1 Vyhodnocení

Vyhodnocené výsledky ukazují zajímavý trend. U telefonů Apple iPhone 7 a Google Pixel 2 byl dosažen lepší výsledek v manuálním režimu než v automatickém režimu. To je možná způsobeno celkově světlejší fotkou až přesvětlenou fotkou. Pokud byla fotka ztmavena na podobnou úroveň jako fotka v JPEG, bylo dosaženo jiných výsledků, které již o trochu více odpovídali předpokladům, že manuální režim nabídne horší výsledek než automatický.

Při popisu vzorce ve standardu IEEE CPIQ je pak také zmíněno, že pokud má fotoaparát více šumu (vyšší rozptyl) na ose  $b^*$  (žlutá – fialová barva) používaného barevného prostoru, bude mít lepší skóre vizuálního šumu než jiné fotoaparáty s nižším rozptylem. Tento fakt mohl přímo ovlivnit výsledek, jelikož při pohledu na fotku ve formátu TIF je žlutější než fotka ve standardu JPEG.

Tabulka 9.1 - Vizuální šum při osvětlení 8300 lx

Zařízení	Automatický režim JPEG	Manuální režim RAW
Apple iPhone 7	1,20	0,44
Google Pixel 2	1,48	0,21
Huawei P20	0,07	1,77
Nokia 5	0,02	0,19
Nikon D700	0,60	0,64

U telefonu Huawei P20 a Nokia 5 je vidět, že v automatickém režimu dochází softwarově k odstraňování šumu při zpracování fotografie ve fotoaparátu. U konvenčního fotoaparátu Nikon D700 lze pozorovat téměř identické hodnoty v obou režimech. Zde pravděpodobně nedochází k žádnému dodatečnému odstraňování šumu během zpracování fotografie.

Tabulka 9.2 – Vizualní šum při osvětlení 460 lx

Zařízení	Automatický režim JPEG	Manuální režim RAW
Apple iPhone 7	0,49	1,05
Google Pixel 2	1,81	0,96
Huawei P20	0,04	1,98
Nokia 5	0,20	0,49
Nikon D700	0,66	0,72

Z obou tabulek výše je patrné, že zatímco u všech telefonů hodnota vizuálního šumu kolísá při všech těchto měřeních, u konvenčního fotoaparátu Nikon D700 je hodnota pořád skoro stejná. Je u něj zaznamenán nejmenší rozdíl při dvou úrovních osvětlení. Tabulka 9.2 nicméně říká, že nejméně vizuálního šumu lze pozorovat na fotografii telefonu Huawei P20 v automatickém režimu.

Výsledky mohl ovlivnit také fakt, že měření vizuálního šumu v manuálním režimu není ve standardu IEEE CIPQ, ze kterého je vycházeno, definováno. Příslušné vzorce ve zmíněném standardu tak nemusí být připraveny na výpočty v jiném formátu než JPEG.

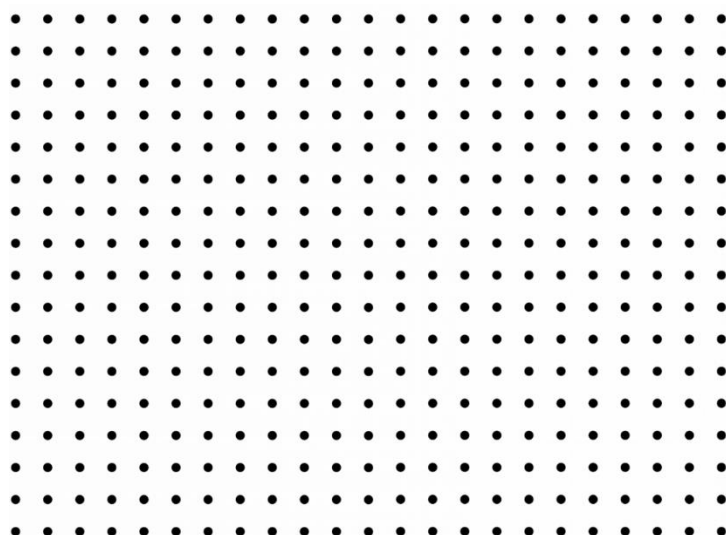
### 9.3.2 Způsob vyhodnocení

Pro vyhodnocení byl napsán skript v programu MATLAB, který nejprve načte obrázek. Poté je provedena linearizace hodnot RGB s korekcí gama pomocí funkce `rgb2lin`. Následně je obrázek převeden do barevného prostoru CIE XYZ a pak do prostoru CIE  $L^*a^*b^*$ , v obou případech je nastaven referenční bílý bod jako D65 dle doporučení standardu. Tři osy prostoru  $L^*a^*b^*$  jsou separovány a obrázek je rozdělen do dvanácti bloků. Každý blok je jeden ze dvanácti čtverců různé šedé barvy. Jejich výběr je nutné provádět ručně.

Poté je pro každý blok vypočten rozptyl všech tří os zvlášť a kovariance  $L^*a^*$ . S využitím vzorce z kapitoly číslo 7 z kapitoly 8.1.2 je pak vypočten vizuální šum pro každý blok. Posléze je proveden průměr všech bloků. Díky tomu můžeme v tabulce vidět vždy jedno číslo pro jeden snímek. Stejně to provedl například Peltoketo při měření v této literatuře [43].

## 9.4 Geometrické zkreslení

Pro vlastní měření byl navrhnout vlastní obrazec v grafickém editoru, jelikož žádný veřejně zdarma dostupný není k dispozici. Obrazec byl navrhnout v souladu s doporučením standardu IEEE CPIQ v grafickém editoru Adobe Photoshop. Mřížka o rozměrech 23 x 17 bodů obsahuje celkem 391 bodů. Černé body jsou kulaté a jsou umístěny na bílém pozadí v rovnoměrné mřížce, přičemž vzdálenost mezi body je stejná ve všech směrech.



*Obrázek 9.5 – Mnou navrhnutý obrazec*

Obrazec byl vtištěn na karton o velikosti A3. Při měření byl dostatečně osvětlen a umístěn na dostupný stojan na katedře radioelektroniky. Vzdálenost fotoaparátu od obrazce byla taková, aby bylo vyplněno jeho zorné pole. Při měření se ukázala jako obtížné správně umístit telefon tak, aby mřížka vyplnila přesně určené pole ohraničené černými okraji. Určitý vliv na toto měla optická stabilizace. Při každém nepatrném pohybu s telefonem se senzor uvnitř telefonu mohl pohnout a změnit zarovnání fotografie. To může na výsledcích zanechat chybu měření, kterou nelze přesně určit.

Ohnisková vzdálenost na Nikonu D700 s objektivem Nikon 24-70 mm f/2,8 AF-S G ED byla nastavena na 32 mm. Všechny telefony měly ponechány jejich standardní neměnnou ohniskovou vzdálenost.

### 9.4.1 Vyhodnocení

Tabulka 9.3 zobrazuje celkové geometrické zkreslení v automatickém režimu (JPEG) měřené od středu do tří směrů – nahoru (horizontálně), do strany (vertikálně) a šikmo do levého horního rohu. Při pohledu na výsledné hodnoty u všech měřených telefonů v procentech není

geometrické zkreslení nikterak veliké a pohybuje se do 2,5 procenta. Nejmenší zkreslení vykazuje telefon Huawei P20. U všech telefonů vidíme poduškovité zkreslení, zatímco konvenční fotoaparát s objektivem má zkreslení soudkovité.

Tabulka 9.3 – Geometrické kreslení – automatický režim (JPEG)

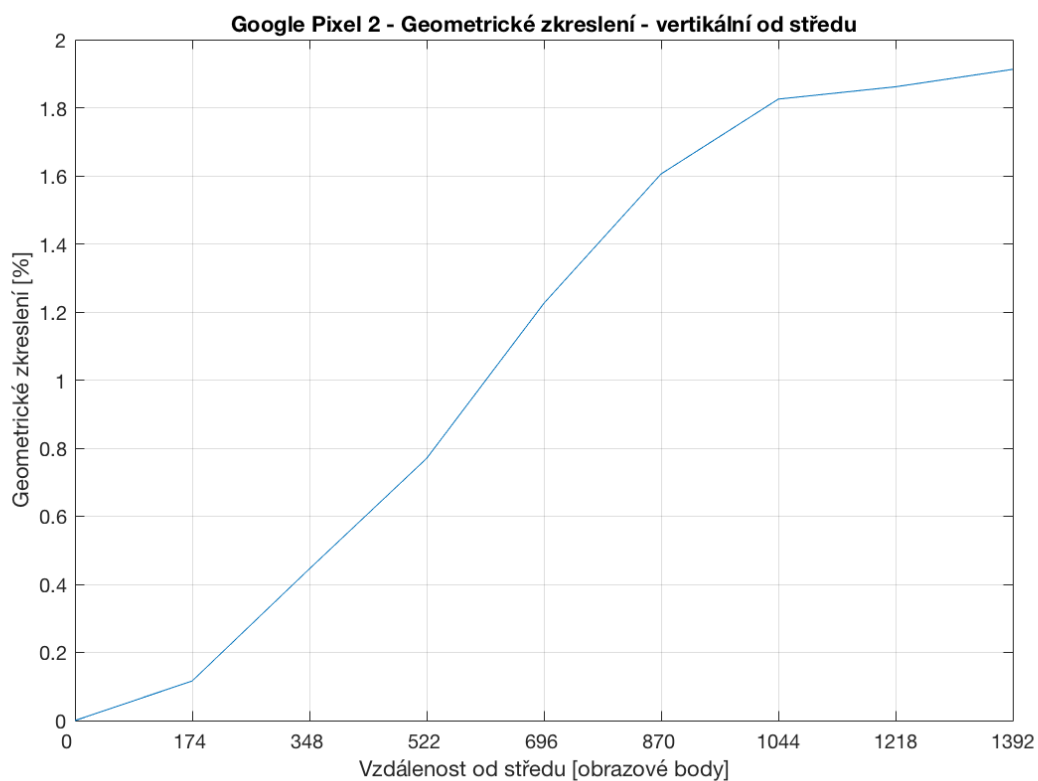
Zařízení	Celkové zkreslení horizontálně [%]	Celkové zkreslení vertikálně [%]	Celkové zkreslení úhlopříčně [%]
Apple iPhone 7	1,68	1,95	1,75
Google Pixel 2	1,45	1,80	1,22
Huawei P20	1,16	1,81	0,68
Nokia 5	1,46	2,32	1,55
Nikon D700	-0,85	-0,07	-5,33

Druhé měření v manuálním režimu ukázalo velmi podobné výsledky v tabulce 9.4 a je vidět, že na rozdíl od měření modulační přenosové funkce nejsou fotky tolik dodatečně upravovány obrazovým procesorem. Zkreslení je i v manuálním režimu u telefonů maximálně do 2,5 procent.

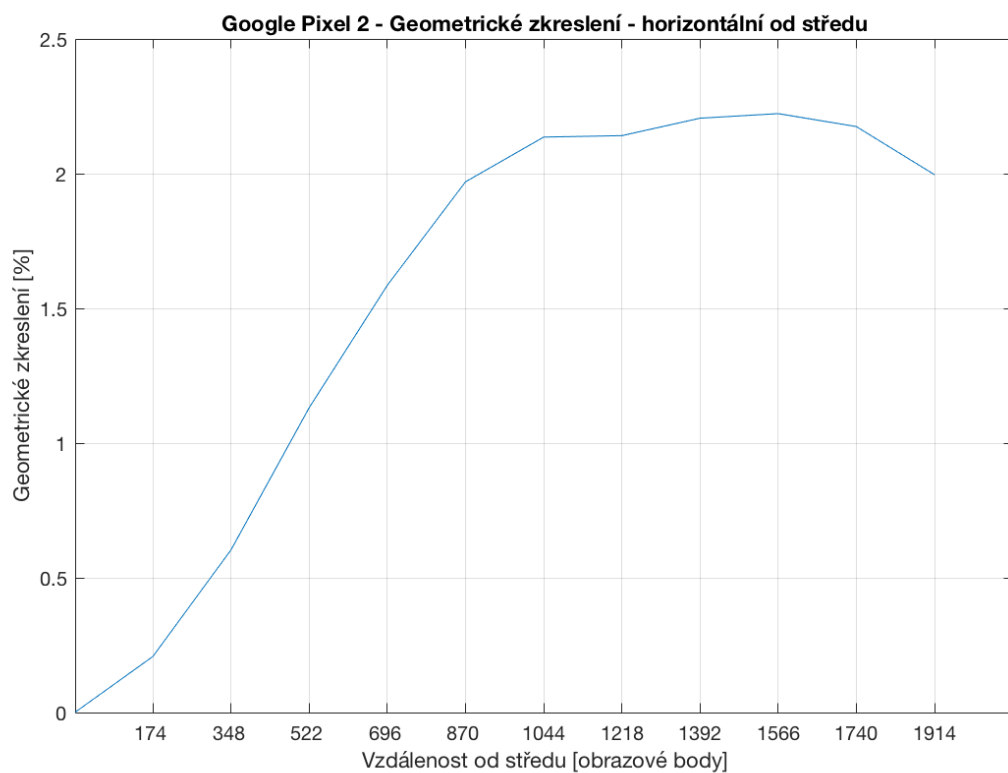
Konvenční fotoaparát Nikon D700 s objektivem Nikon 24-70 mm f/2,8 AF-S G ED dosáhl zkreslení téměř identickému jako v automatickém režimu v JPEG. Jeho zkreslení je ze všech měřených zařízení největší. Pravděpodobně se jedná o zkreslení objektivu, ale stejně jako u telefonů považujeme při tomto měření objektiv s tělem a senzorem za jednu sestavu. Výsledné grafy zkreslení všech přístrojů lze nalézt v příloze.

Tabulka 9.4 – Geometrické kreslení – manuální režim (RAW)

Zařízení	Celkové zkreslení horizontálně [%]	Celkové zkreslení vertikálně [%]	Celkové zkreslení úhlopříčně [%]
Apple iPhone 7	1,08	1,44	1,73
Google Pixel 2	1,99	1,91	2,33
Huawei P20	0,95	1,48	0,64
Nokia 5	1,33	2,17	1,32
Nikon D700	-0,92	-0,08	-5,38



Graf 9.3 – Geometrické zkreslení u telefonu Google Pixel 2 – manuální režim - vertikální od středu

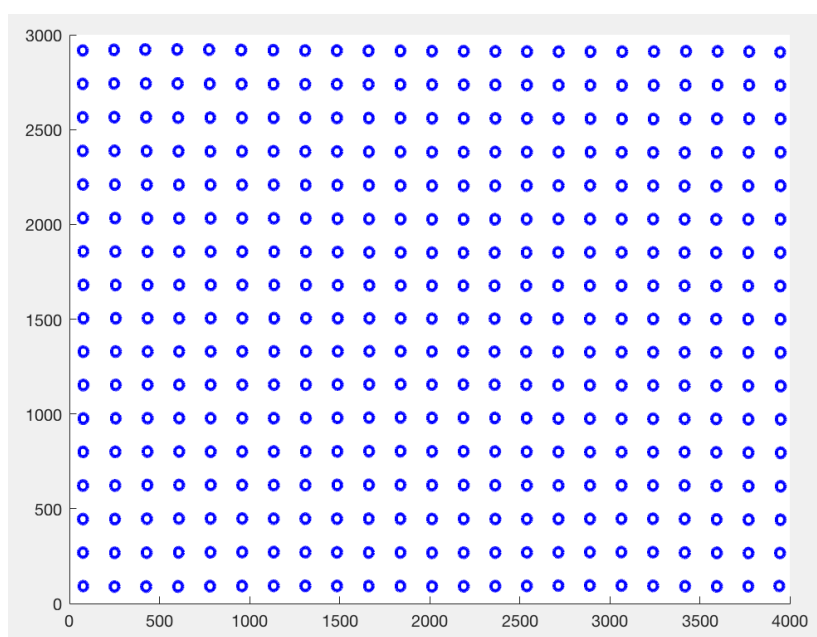


Graf 9.4 – Geometrické zkreslení u telefonu Google Pixel 2 – manuální režim – horizontální od středu

### 9.4.2 Způsob vyhodnocení

Některé vyfocené snímky jsou upraveny ve fotoeditoru, tak že je upraven jejich jas, kontrast anebo je odstraněna jejich vinětace. To je provedeno pro lepší zpracování a detekci v MATLABu. Tato úprava nemá vliv na měření geometrického zkreslení, a proto ji při tomto měření můžeme provést.

Výpočty a zpracování jsou prováděny v programu MATLAB pomocí vlastnoručně napsaného skriptu. Obrázek ve standardu JPG nebo TIF je nahrán do programu pomocí příkazu *imread*. Pro výpočty a analýzu je potřeba obrázek převést nejprve do černobílé podoby, invertovat a převést na binární. Invertování obrázku je nutné z důvodu správné detekce bodů pomocí funkce *imfindcircles*. Tato funkce detekuje všechny kruhové objekty na obrázku a vytvoří matici *centers* se souřadnicemi středu každého bodu. Před detekcí je třeba definovat této funkci poloměr hledaných kruhových objektů. V prvním okně je vykreslena detekce bodů z fotografie, jak můžeme vidět na obrázku 9.6.



Obrázek 9.6 – Ukázka detekce bodů z fotografie pomocí funkce *imfindcircles*

Poté probíhá nalezení bodu ve středu obrázku. Je nalezen skutečný střed fotografie a posléze střed nejbližší tečky skutečného středu. V ideálním případě se tyto body překrývají. Referenční vzdálenost, která je potřeba pro výpočet zkreslení, je změřena a vypočtena ze vzdálenosti dvou bodů uprostřed obrazce. Zde je nutné zadat manuálně číslo řádku tečky, která je umístěna ve středu z matice *centers*. V druhém okně je vykreslena fotografie, se

kteřou se pracuje, a na ní jsou vykresleny čtyři body pro ověření, že algoritmus opravdu funguje a ujištění, jak moc se liší vypočtený střed od skutečného středu prostředního bodu.

V dalších krocích je počítáno geometrické zkreslení horizontálně od středu. Z matice *centers* jsou vybrány požadované body. Poté je vypočtena referenční vzdálenost každého bodu. Nakonec dojde k výpočtům geometrického zkreslení a vykreslení grafu. To samé je posléze provedeno ve vertikálním směru nahoru od středového bodu.

Pro fotoaparát Nikon D700 musel být skript výrazněji upraven, jelikož tento fotoaparát fotí ve formátu 3:2 a tak sejmul méně bodů než ostatní zařízení s poměrem stran 4:3. Konkrétně došlo ke změně vybraných bodů při kreslení grafů.

## 9.5 Vinětace

Pro změření vinětace je nezbytné zajistit homogenní osvětlení bílé plochy. Jelikož stojan dostupný na katedře nenabízí na celé ploše po změření luxmetrem dostatečnou homogenitu, je fotoaparát umístěn velmi blízko tomuto stojanu s podsvícením, zhruba 1 centimetr. Na této menší ploše je již homogenita osvětlení dostačující pro naše měření a to konkrétně 520 lx. Zvolena byla takto nízká hodnota proto, že při vysoké intenzitě osvětlení se při prvních měřeních žádná vinětace neprojevila.

Fotoaparát není schopný zaostřit na takto blízko vzdálenost, to ale pro účel měření vinětace nevádí. Vypneme také automatické ostření. Při prvním měření je necháno vše na automatickém nastavení, což může zanechat menší chybu měření z důvodu blikající zářivky (podsvícení). V manuálním režimu je nastavena delší expoziční čas, který by toto měl eliminovat.

Jelikož není možné odebrat u mobilních telefonů objektiv, je vinětace měřena jako celková celé optické soustavy a obrazového senzoru. Pro korektní srovnání je uvažováno při měření vinětace na klasickém fotoaparátu stejná soustava (objektiv + obrazový senzor).

### 9.5.1 Vyhodnocení

Na obrázcích zobrazující vinětaci z našeho měření osa  $z$  symbolizuje jasovou intenzitu, která je v našem případě ve všech měřeních od 0 do 256. Maximální odchylka  $D_{max}$  by měla být v ideálním případě nulová. Osa  $x$  a  $y$  jsou bloky, na kterých je počítána střední hodnota.



Tabulka 9.5 – Vinětace

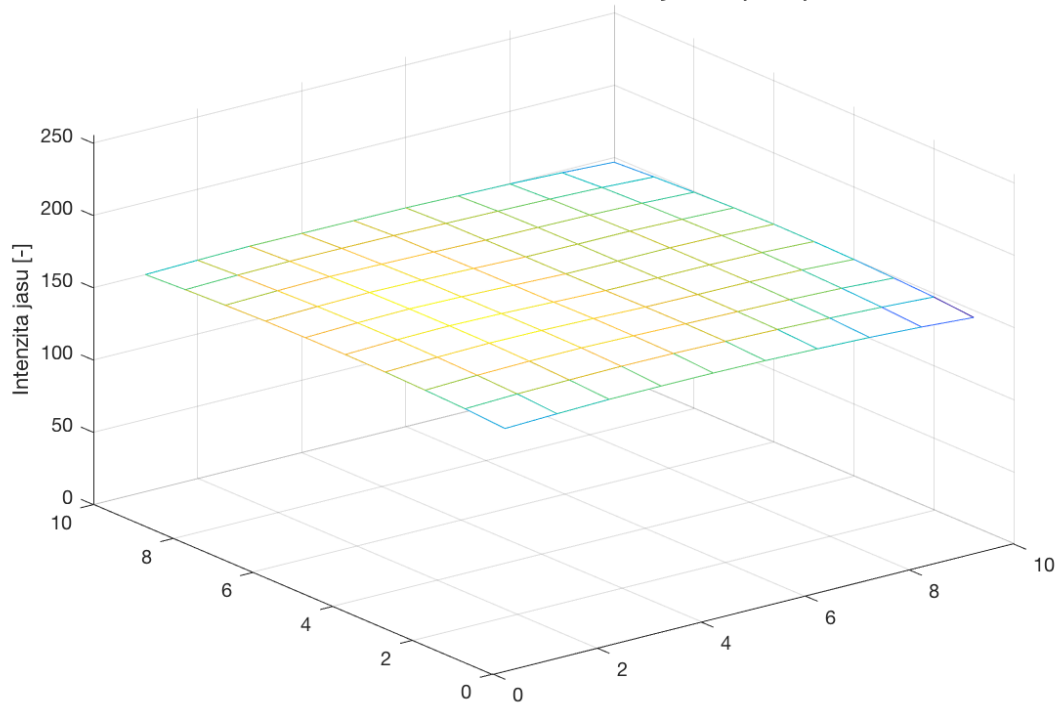
Zařízení	Maximální odchylka automatický režim JPEG [v jasových bodech]	Maximální odchylka manuální režim RAW [v jasových bodech]
Apple iPhone 7	15,79	15,92
Google Pixel 2	8,06	6,53
Huawei P20	7,08	49,45
Nokia 5	3,96	14,36
Nikon D700	30,29	35,25

Při pohledu do tabulky výše je vidět, že rozdíl mezi automatickým režimem (JPEG) a manuálním režimem (RAW) je na telefonu Huawei P20 a Nokia 5 velmi výrazný. Patrně je vinětace odstraňována softwarově. Na telefonech Apple iPhone 7 a Google Pixel 2 není v hodnotách vinětace mezi automatickým režimem a manuálním režimem příliš velký rozdíl. Tento rozdíl v případě iPhone 7 může být chyba měření. Konvenční fotoaparát má v automatickém režimu největší vinětaci. V manuálním režimu je vinětace u konvenčního fotoaparátu skoro stejná. Obrázky vinětace všech přístrojů lze nalézt v příloze B.

### 9.5.1 Způsob vyhodnocení

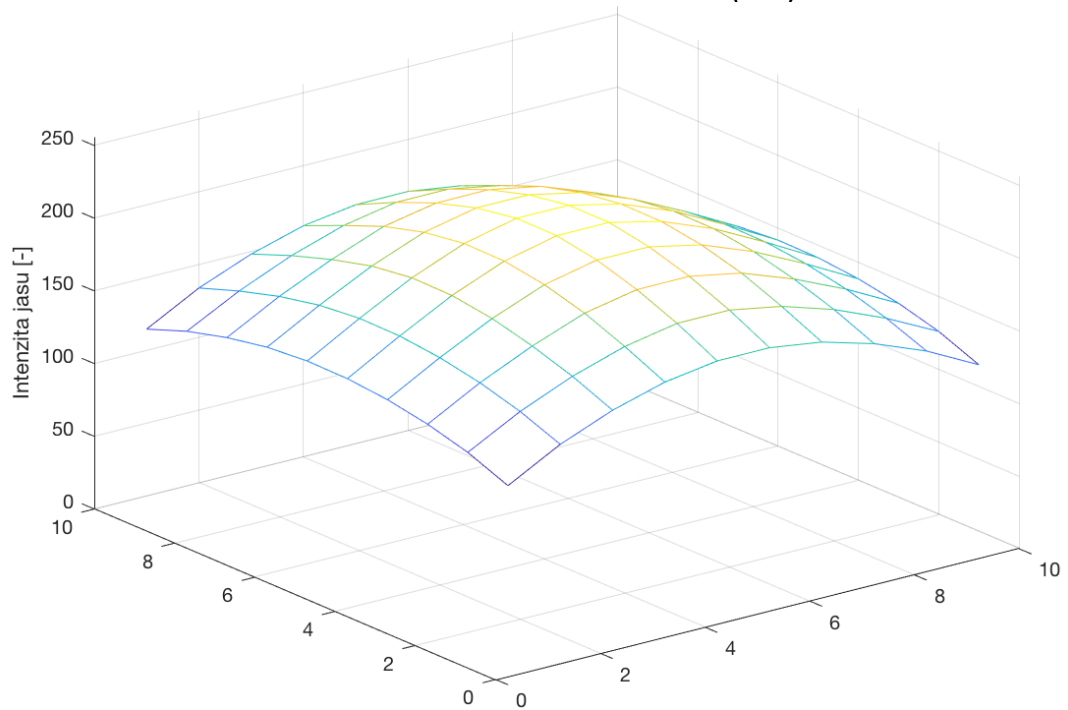
Výpočty a zpracování jsou prováděny v programu MATLAB pomocí vlastnoručně napsaného skriptu. Obrázek ve formátu JPG nebo DNG je nahrán do programu pomocí příkazu *imread*. Dále je převeden na černobílý obrázek pomocí příkazu *img2gray*. Střední hodnota celého snímku je spočtena příkazem *mean*. Příkaz *blockproc* poté rozdělí nahraný obrázek na matici 10x10 rovnoměrných bloků, vypočítá střední hodnotu každého z nich a vloží tyto hodnoty do matice. Při každém vyhodnocení je třeba změnit velikost bloku dle velikosti snímku. Nyní lze pomocí příkazu *mesh* vykreslit vinětaci na grafu ve 3D prostoru. Nakonec je pomocí vzorce číslo (x) vypočítána odchylka RMSe a je zjištěna její maximální hodnota *Dmax*.

**Huawei P20 - vinětace - automatický režim (JPEG)**



*Obrázek 9.7 – Huawei P20 vinětace v automatickém režimu JPEG*

**Huawei P20 - vinětace - manuální režim (RAW)**



*Obrázek 9.8 – Huawei P20 vinětace v manuálním režimu RAW*

## 10 Závěr

Tato práce popsala parametry fotoaparátů v mobilních telefonech, přičemž nejprve je zmíněna krátká historie vývoje těchto miniaturních fotoaparátů. Následující část popsala obecně parametry fotoaparátů v mobilech, přičemž jejich konkrétní specifikace v současných mobilních telefonech jsou dále popsány. Obrazový senzor je dnes ve většině případech typu CMOS, a tak byla tato technologie podrobněji rozebrána. V kapitole o výrobcích obrazových senzorů do mobilů jsou mimo samotných výrobců uvedeny i specifikace několika z nich. V práci jsou uvedeny i artefakty související s CMOS senzory.

Jelikož ve fotoaparátu v mobilním telefonu nelze oddělit optický systém od senzoru, je v práci uveden popis dnes používaných kombinací čoček a jejich výrobců. Senzory a obdobné moduly fotoaparátů z telefonů naleznou uplatnění i v dalších oblastech jako třeba v dronech. I tomu byla krátká kapitola věnována. Aby bylo možné provést srovnání fotoaparátů v mobilech s konvenčním fotoaparátem, byla sepsána metodika měření několika parametrů dle dostupných standardů.

V praktické části jsem se věnoval porovnání čtyř vybraných fotoaparátů v mobilních telefonech s jedním konvenčním fotoaparátem. Pro měření byly vybrány tři telefony, které patří mezi top modely daných výrobců a jeden telefon střední třídy. Měřeny byly čtyři parametry – modulační přenosová funkce, vizuální šum, geometrické zkreslení a vinětace. Všechna tato měření proběhla kromě standardu v podobě automatického režimu formátu JPEG také v manuálním v nekomprimovaném digitálním negativu. Proměření geometrického zkreslení byl navrhnout vlastní testovací obrazec dle standardu IEEE CPIQ.

Vyhodnocení modulační přenosové funkce ukazuje, že fotoaparáty v mobilních telefonech ve velké míře doostřují fotografie při zpracování obrazu během focení. Z tohoto důvodu v automatickém režimu dopadl konvenční fotoaparát nejhůře, jelikož tuto činnost neprovádí (v tak velké míře). V manuální režimu jsou již křivky modulační přenosové funkce podobné a nejhůře dopadl nejlevnější vzorek z testovaných zařízení. U všech mobilních telefonů se projevil také artefakt aliasing na vysokém prostorovém kmitočtu, zatímco na konvenčním fotoaparátu tento jev nebyl zaznamenán. Výsledky měření vizuálního šumu podávají nejsou optimální v případě dvou zařízení. Zde mohlo dojít k určité chybě měření a další příčiny jsou uvedeny v kapitole vyhodnocení vizuálního šumu.

Geometrické zkreslení všech telefonů se ukázalo jako malé, jelikož u všech bylo do 2,4 procenta. Nejhorší výsledek z našeho měření podal konvenční fotoaparát se zkreslením okolo pěti procent. Efekt vinětace se nejvíce projevil u telefonu Huawei P20 v manuálním režimu. Zde byl nalezen obrovský rozdíl mezi automatickým režimem a manuálním u právě zmíněného telefonu a jednoho dalšího vzorku. U jiných dvou telefonů nebyl zaznamenán tak velký rozdíl a ani u konvenčního fotoaparátu.

Pro vyhodnocení všech parametrů byly napsány skripty v programu Matlab. Skripty na vyhodnocení modulační přenosové funkce a vizuálního šumu by zcela jistě bylo možné vylepšit a minimalizovat ruční práci uživatele. Skript pro vyhodnocení geometrického zkreslení funguje spolehlivě, jen nutné hlídat správnou detekci teček nastavením korektních parametrů pro jejich detekci a zadáním středu v jednom kroku. Pokud by bylo více času, jistě mohlo být i toto vylepšeno. Skript na vyhodnocení vinětace funguje spolehlivě.

Celkově je vidět, že na výslednou kvalitu fotoaparátů v mobilních telefonech má značný vliv zpracování snímku během focení. Tuto část konvenční fotoaparát příliš neaplikuje, jelikož se jednalo v našem měření o digitální zrcadlovku, kde se předpokládá další zpracování snímku uživatelem.

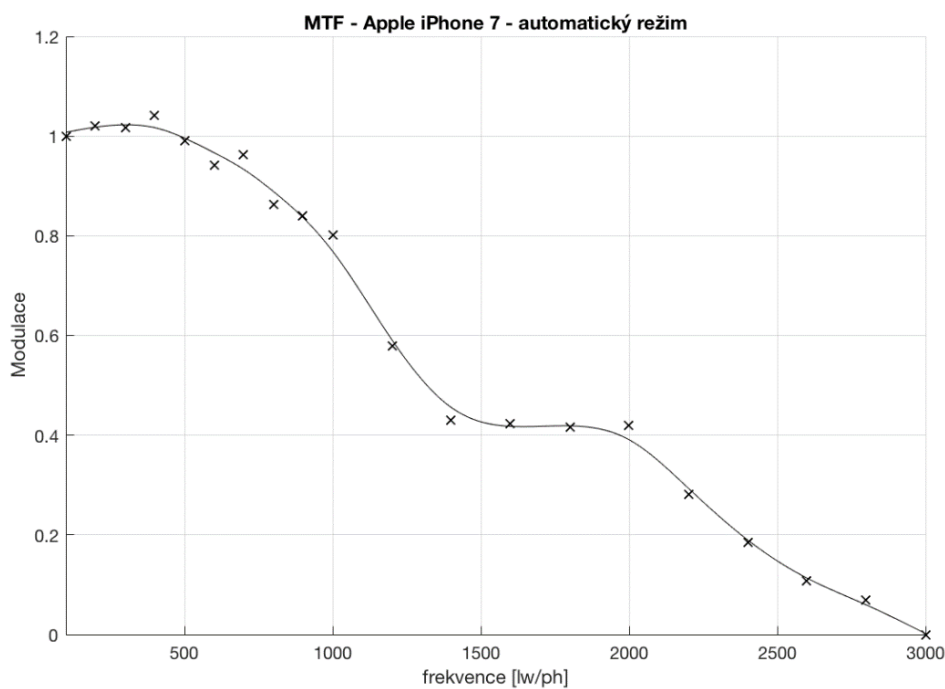
## 11 Literatura

- [1] IEEE Standard for Camera Phone Image Quality. *IEEE Std 1858-2016 (Incorporating IEEE Std 1858-2016/Cor 1-2017)* [online]. 2017, 1–146. Dostupné z: doi:10.1109/IEEESTD.2017.7921676
- [2] ELIASSON, H. a J.B. PHILLIPS. *Camera image quality benchmarking*. Wiley. 2017.
- [3] *Modulační přenosová funkce digitálního fotoaparátu*. Laboratorní úloha z předmětu Fotonika, ČVUT FEL
- [4] PELTOKETO, Veli-Tapani. Evaluation of mobile phone camera benchmarking using objective camera speed and image quality metrics. *Journal of Electronic Imaging*. 2014, **23**(6), 61102. ISSN 1017-9909.
- [5] NAKAMURA, Junichi. *Image sensors and signal processing for digital still cameras*. B.m.: CRC press, 2006. ISBN 0-8493-3545-7.
- [6] *ISO 12233, Photography — Electronic still picture imaging — Resolution and spatial frequency responses*
- [7] *Industry's First Camera-Equipped Mobile Phone* [online]. [vid. 2018-04-02]. Dostupné z: [http://www.sharp-world.com/corporate/info/his/only\\_one/item/t34.html](http://www.sharp-world.com/corporate/info/his/only_one/item/t34.html)
- [8] PELTOKETO, VELI-TAPANI. *Benchmarking of Mobile Phone Cameras* [online]. 2016. Dostupné z: [https://www.univaasa.fi/materiaali/pdf/isbn\\_978-952-476-685-2.pdf](https://www.univaasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-685-2.pdf). PhD thesis
- [9] HILL, Simon. From J-Phone to Lumia 1020: A complete history of the camera phone. *Digital Trends* [online]. 11. srpen 2013 [vid. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com/mobile/camera-phone-history/>
- [10] THORN, Thomas. Flashback: the past, present and future of the camera phone. *TechRadar* [online]. 28. prosinec 2013 [vid. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://www.techradar.com/news/phone-and-communications/mobile-phones/flashback-the-past-present-and-future-of-the-camera-phone-1209860>
- [11] HASLAM, Karen. Why more megapixels is a smartphone con. *Macworld UK* [online]. [vid. 2018-01-15]. Dostupné z: <https://www.macworld.co.uk/opinion/iphone/why-more-megapixels-is-smartphone-con-3502115/>
- [12] Making (some) sense out of sensor sizes. *DPRReview* [online]. [vid. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.dpreview.com/articles/8095816568/sensorsizes>
- [13] KREJČÍ, Martin. *Fázový vs. kontrastní autofokus - význam pro praxi - Online fotoškola* [online]. [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://www.onlinefotoskola.cz/clanky/fazovy-vs-kontrastni-autofokus-vyznam-pro-praxi.html>
- [14] Smartphones that feature OIS for better, stable photos. <https://www.deccanchronicle.com/> [online]. 4. květen 2017 [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: <https://www.deccanchronicle.com/technology/in-other-news/040517/smartphones-that-feature-ois-for-better-stable-photos.html>
- [15] Sony Ericsson K700, S700 and Z500. *GSMarena.com* [online]. [vid. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://www.gsmarena.com/sony\\_ericsson\\_k700\\_s700\\_and\\_z500-news-18.php](https://www.gsmarena.com/sony_ericsson_k700_s700_and_z500-news-18.php)
- [16] JIRSA, Jakub. *Nová technologie kamerových systémů na obzoru* [online]. [vid. 2018-03-31]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2017\\_21\\_kub.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_21_kub.php)

- [17] *Bayerova maska* [online]. 2017 [vid. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Bayerova\\_maska&oldid=15570156](https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Bayerova_maska&oldid=15570156)
- [18] Sony develops back-illuminated CMOS image sensor, realizing high picture quality, nearly twofold sensitivity(\*1) and low noise. *Sony Global - Sony Global Headquarters* [online]. [vid. 2018-03-31]. Dostupné z: <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200806/08-069E/index.html>
- [19] *Scanners and sharpening: resolution and MTF* [online]. [vid. 2018-03-18]. Dostupné z: <http://www.normankoren.com/Tutorials/MTF2.html>
- [20] ExmorR Image Sensor for Mobile. *Sony Semiconductor Solutions Corporation* [online]. [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: [https://www.sony-semicon.co.jp/products\\_en/IS/sensor1/technology/exmor-r.html](https://www.sony-semicon.co.jp/products_en/IS/sensor1/technology/exmor-r.html)
- [21] ExmorRS Image Sensor for Mobile. *Sony Semiconductor Solutions Corporation* [online]. [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: [https://www.sony-semicon.co.jp/products\\_en/IS/sensor1/technology/exmor-rs.html](https://www.sony-semicon.co.jp/products_en/IS/sensor1/technology/exmor-rs.html)
- [22] *Top OEM Camera Chipset Manufacturers: Sony/ OmniVision/Samsung -White-Labeling Yours* [online]. [vid. 2017-11-07]. Dostupné z: <http://cnoemphone.net/industry/industry-chain/camera-chipset-manufacturer>
- [23] *Who's who in the smartphone camera business* [online]. [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://www.androidauthority.com/smartphone-camera-guide-sony-samsung-623791/>
- [24] *Get the Big Picture: CMOS Image Sensors and ISOCELL* [online]. [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://news.samsung.com/global/get-the-big-picture-cmos-image-sensors-and-isocell>
- [25] HO, Joshua. *The Samsung Galaxy S7 and S7 edge Review: Part 2* [online]. [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://www.anandtech.com/show/10196/the-samsung-galaxy-s7-and-s7-edge-review-part-2>
- [26] *Samsung ISOCELL vs Sony CMOS v Samsung Galaxy S7: plichta* [online]. [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://diit.cz/clanek/samsung-isocell-vs-sony-cmos-v-samsung-galaxy-s7-plichta>
- [27] Sony and Toshiba Sign Definitive Agreements for the Transfer of Semiconductor Fabrication Facilities. *Sony Global - Sony Global Headquarters* [online]. [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/201512/15-1204E/index.html>
- [28] SAMSUNG ELECTRO-MECHANICS. *Camera Module* [online]. [vid. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.samsungsem.com/global/product/module/camera-module/index.jsp>
- [29] Sony Semiconductor Solutions Corporation. *Sony Semiconductor Solutions Corporation* [online]. [vid. 2017-11-07]. Dostupné z: [https://www.sony-semicon.co.jp/index\\_en.html](https://www.sony-semicon.co.jp/index_en.html)
- [30] *OEM Camera Lens Manufacturers for OEM/ODM Android Cell Phone-White-Labeling Yours* [online]. [vid. 2018-02-10]. Dostupné z: <http://cnoemphone.net/industry/industry-chain/camera-lens-manufacturer>
- [31] *iPhone 6 Sensor Size of the Rear (iSight) Camera* [online]. [vid. 2018-01-15]. Dostupné z: <http://www.cameradebate.com/2014/what-is-iphone-6-camera-image-sensor-size-rear-main-camera/>
- [32] Specifications | Samsung Galaxy S9 and S9+. *The Official Samsung Galaxy Site* [online]. [vid. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.samsung.com/global/galaxy/galaxy-s9/specs/>

- [33] STEINICH, Thomas a Vladan BLAHNIK. Optical design of camera optics for mobile phones. *Advanced Optical Technologies* [online]. 2012, 1(1-2), 51-58. ISSN 2192-8584. Dostupné z: doi:10.1515/aot-2012-0002
- [34] iPhone X - Technical Specifications. *Apple* [online]. [vid. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.apple.com/iphone-x/specs/>
- [35] TSAI, Tsung-Han. Optical lens system for taking image [online]. US7643225B1. 5. leden 2010. Dostupné z: <https://patents.google.com/patent/US7643225B1/en>
- [36] LG Nexus 5X review: Settling down. *GSMarena.com* [online]. 16. listopad 2015 [vid. 2018-04-08]. Dostupné z: [https://www.gsmarena.com/lg\\_nexus\\_5x-review-1338.php](https://www.gsmarena.com/lg_nexus_5x-review-1338.php)
- [37] PRASAD. Xiaomi announces YI 4K Action Camera. *GSMarena.com* [online]. 14. květen 2016 [vid. 2018-04-08]. Dostupné z: [https://www.gsmarena.com/xiaomi\\_announces\\_yi\\_4k\\_action\\_camera-blog-18232.php](https://www.gsmarena.com/xiaomi_announces_yi_4k_action_camera-blog-18232.php)
- [38] Mobile Reviews. *DxOMark* [online]. [vid. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.dxomark.com/category/mobile-reviews/>
- [39] *Quick MTF: About resolution* [online]. [vid. 2018-04-11]. Dostupné z: <http://www.quickmtf.com/about-resolution.html>
- [40] *X-Rite ColorChecker Digital SG: Amazon.co.uk: Computers & Accessories* [online]. [vid. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.amazon.co.uk/X-Rite-MSDCCSG-ColorChecker-Digital-SG/dp/B000X9H7HW>
- [41] *Open Camera – Aplikace na Google Play* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://play.google.com/store/apps/details?id=net.sourceforge.opencamera&hl=cs>
- [42] *ProCam 5. App Store Preview* [online]. [vid. 2018-05-19]. Dostupné z: <https://itunes.apple.com/us/app/procam-5/id730712409?mt=8>
- [43] PELTOKETO, Veli-Tapani. Signal to Noise Ratio and Visual Noise of Mobile Phone Cameras. *Journal of Imaging Science and Technology* [online]. 2015, 59. Dostupné z: doi:10.2352/J.ImagingSci.Technol.2015.59.1.010401

## Příloha A – MTF všech měřených vzorků

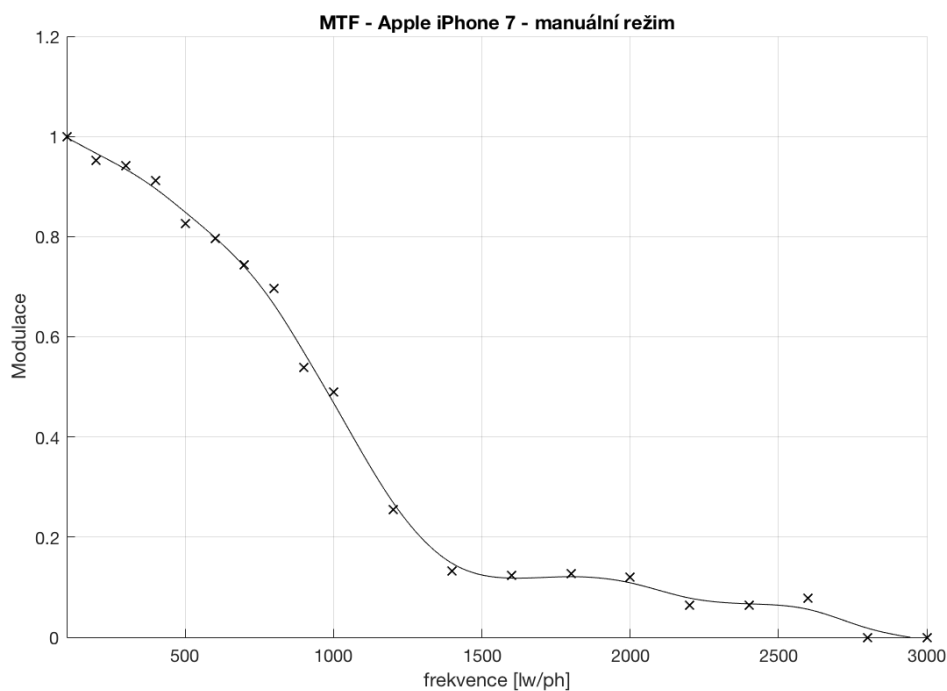


Obrázek A.1 – MTF – Apple iPhone 7 – automatický režim

Tabulka A. 1 – MTF – Apple iPhone 7 – automatický režim

f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	188,1	28	0,74086071	1
200	192,3	26,7	0,75640499	1,02098137
300	193,6	27,3	0,75282933	1,01615502
400	198,1	25,5	0,77191413	1,04191533
500	194,6	29,9	0,73363029	0,99024051
600	196,5	35	0,69762419	0,94164015
700	191	32	0,71300448	0,96240018
800	191	42	0,63948498	0,86316492
900	172	40	0,62264151	0,84042992
1000	165	42	0,5942029	0,80204401
1200	212,9	85,1	0,42885906	0,57886598
1400	197,3	101,9	0,31885027	0,43037816
1600	195	102	0,31313131	0,42265882
1800	193,1	102	0,30870891	0,41668954
2000	190,7	100,3	0,31065292	0,41931353
2200	176,4	115,7	0,20780555	0,28049206
2400	167,5	127	0,13752122	0,18562359
2600	159,3	135,9	0,07926829	0,10699487
2800	156,7	141,6	0,05062018	0,06832618
3000	-	-	-	0

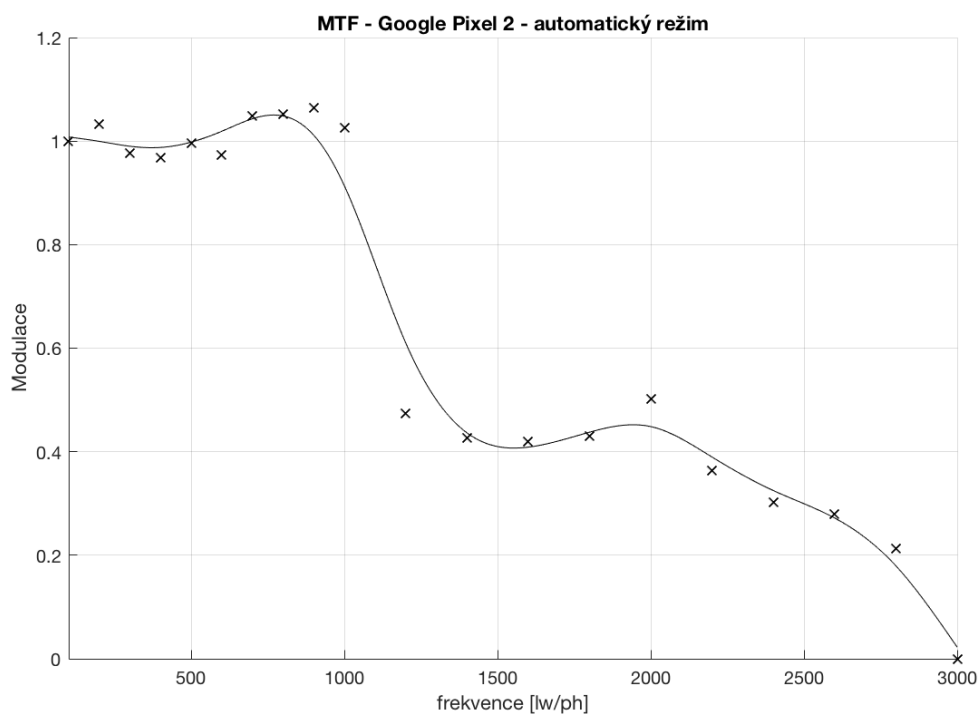




Obrázek A.2 – MTF – Apple iPhone 7 – manuální režim

Tabulka A. 2 - MTF – Apple iPhone 7 – manuální režim

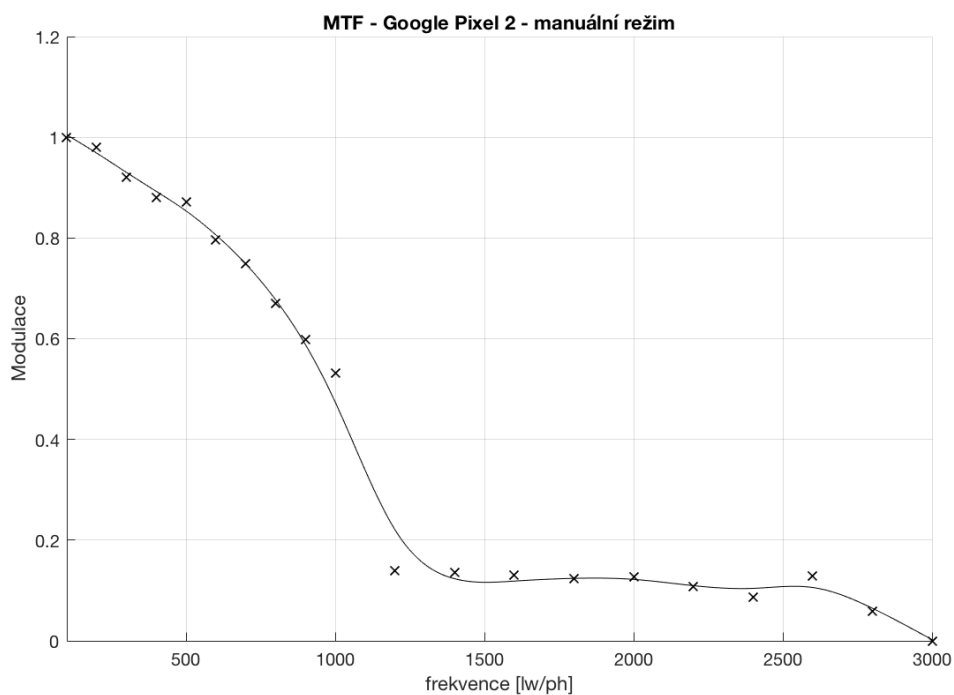
f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	185	21	0,7961165	1
200	189	26	0,75813953	0,95229722
300	189	27	0,75	0,94207317
400	189	30	0,7260274	0,91196124
500	184	38	0,65765766	0,82608218
600	183	41	0,63392857	0,79627613
700	172	44	0,59259259	0,74435411
800	171	49	0,55454545	0,69656319
900	155	62	0,42857143	0,53832753
1000	146	64	0,39047619	0,49047619
1200	205	136	0,20234604	0,25416637
1400	195	158	0,10481586	0,13165895
1600	195	160	0,09859155	0,1238406
1800	196	160	0,1011236	0,1270211
2000	194	160	0,0960452	0,12064214
2200	188	170	0,05027933	0,06315574
2400	188	170	0,05027933	0,06315574
2600	190	168	0,06145251	0,07719035
2800	-	-	-	0
3000	-	-	-	0



Obrázek A.3 – MTF – Google Pixel 2 – automatický režim

Tabulka A. 3 - MTF – Google Pixel 2 – automatický režim

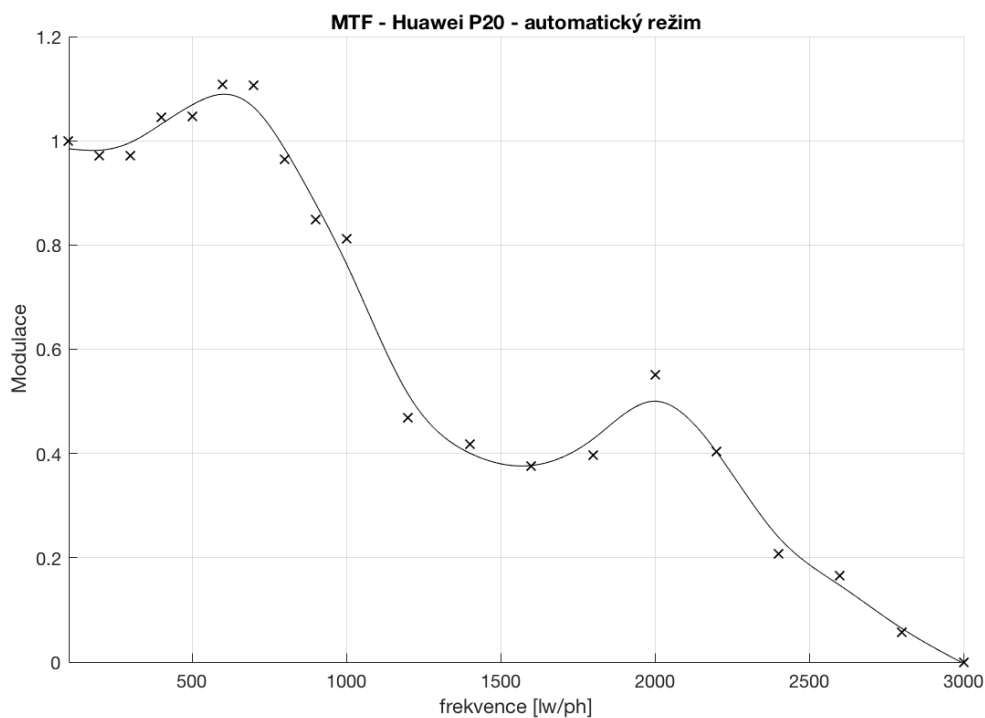
f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	159,8	5	0,93932039	1
200	162,4	2,5	0,96967859	1,03231933
300	161,4	6,9	0,91800357	0,97730612
400	167,3	7,9	0,90981735	0,96859108
500	166,5	5,5	0,93604651	0,99651463
600	163	7,3	0,91426894	0,97333024
700	165,2	1,3	0,98438438	1,04797511
800	171	1	0,98837209	1,05222042
900	161	0	1	1,06459948
1000	162	3	0,96363636	1,02588677
1200	194,2	74,7	0,44440312	0,47311134
1400	194,4	83,2	0,40057637	0,4264534
1600	191,9	83,5	0,3936093	0,41903625
1800	192,5	81,6	0,40459686	0,43073361
2000	200,7	72,1	0,47140762	0,50186031
2200	190,5	93,5	0,3415493	0,3636132
2400	185,8	103,5	0,28447978	0,30285703
2600	182,7	106,8	0,26217617	0,27911261
2800	180,2	120,18	0,19981357	0,21272142
3000	-	-	-	0



Obrázek A.4 – MTF – Google Pixel 2 – manuální režim

Tabulka A. 4 - MTF – Google Pixel 2 – manuální režim

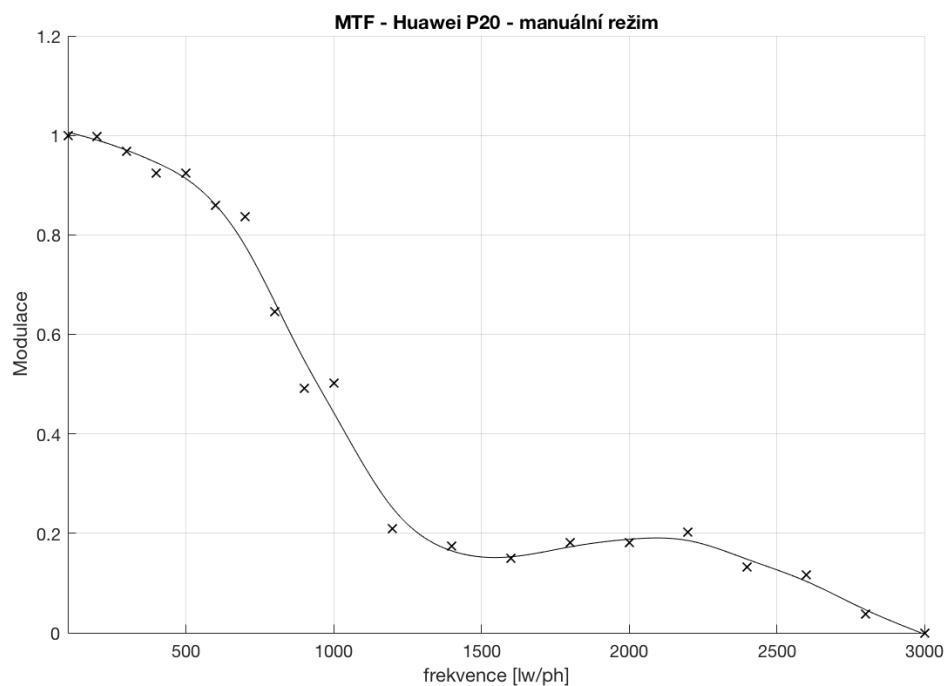
f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	212	36	0,70967742	1
200	212	38	0,696	0,98072727
300	210	44	0,65354331	0,92090193
400	212	49	0,62452107	0,88000697
500	212	50	0,61832061	0,87126995
600	209	58	0,56554307	0,7969016
700	206	63	0,53159851	0,74907063
800	200	71	0,47601476	0,67074807
900	198	80	0,42446043	0,59810334
1000	190	86	0,37681159	0,53096179
1200	217	178	0,09873418	0,13912543
1400	216	178	0,0964467	0,13590217
1600	217	180	0,09319899	0,13132585
1800	218	183	0,0872818	0,12298798
2000	217	181	0,09045226	0,12745546
2200	217	186	0,07692308	0,10839161
2400	215	190	0,0617284	0,08698092
2600	215	179	0,09137056	0,12874942
2800	212	195	0,04176904	0,05885638
3000	-	-	-	0



Obrázek A.5 - MTF - Huawei P20 - automatický režim

Tabulka A. 5 - MTF - Huawei P20 - automatický režim

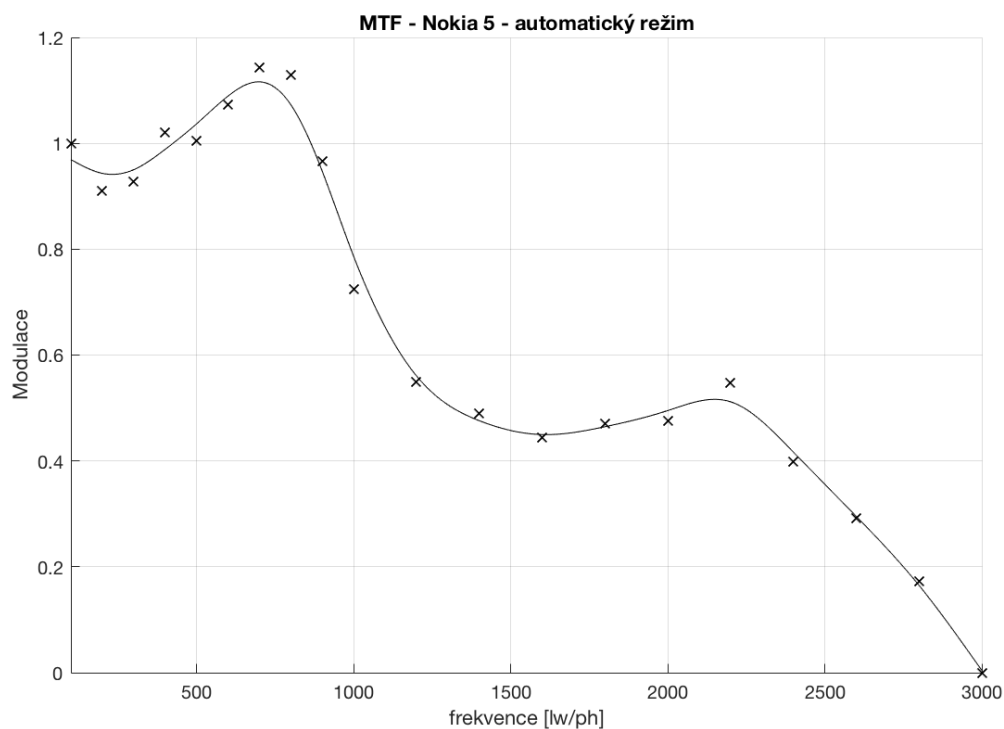
f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	137	8	0,88965517	1
200	137	10	0,86394558	0,97110162
300	137	10	0,86394558	0,97110162
400	138	5	0,93006993	1,04542744
500	141	5	0,93150685	1,04704258
600	140	1	0,9858156	1,10808731
700	132	1	0,98496241	1,10712829
800	118	9	0,85826772	0,96471953
900	115	16	0,75572519	0,84945855
1000	112	18	0,72307692	0,81276088
1200	161,3	66,5	0,41615452	0,46777059
1400	162,3	74,4	0,37135615	0,41741582
1600	158,2	79	0,33389545	0,37530884
1800	160,2	76,7	0,3524694	0,39618653
2000	174,4	59,7	0,48996155	0,55073198
2200	167,3	79	0,35850589	0,40297173
2400	143,3	98,7	0,18429752	0,20715613
2600	135,9	100,9	0,14780405	0,16613634
2800	125,5	113,4	0,05064881	0,05693083
3000	-	-	-	0



Obrázek A.6 - MTF – Huawei P20 – manuální režim

Tabulka A. 6 - MTF – Huawei P20 – manuální režim

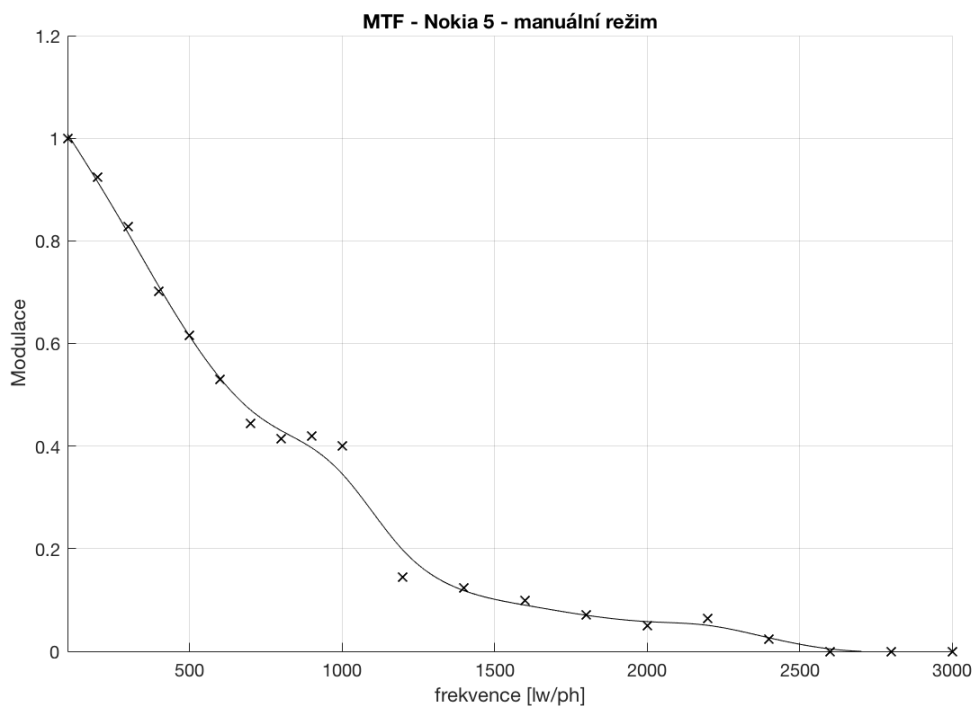
f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	134	19	0,75163399	1
200	140	20	0,75	0,99782609
300	146	23	0,72781065	0,96830461
400	150	27	0,69491525	0,92453943
500	150	27	0,69491525	0,92453943
600	144	31	0,64571429	0,85908075
700	136	31	0,62874251	0,83650091
800	121	42	0,48466258	0,64481195
900	102	47	0,36912752	0,49110009
1000	93	42	0,37777778	0,5026087
1200	147	107	0,15748031	0,20951729
1400	156	120	0,13043478	0,17353497
1600	158	126	0,11267606	0,14990814
1800	163	124	0,1358885	0,18079079
2000	167	127	0,13605442	0,18101154
2200	167	123	0,15172414	0,20185907
2400	160	131	0,09965636	0,13258628
2600	156	131	0,08710801	0,11589153
2800	148	140	0,02777778	0,03695652
3000	-	-	-	0



Obrázek A.7 - MTF - Nokia 5 - automatický režim

Tabulka A. 7 - MTF - Nokia 5 - automatický režim

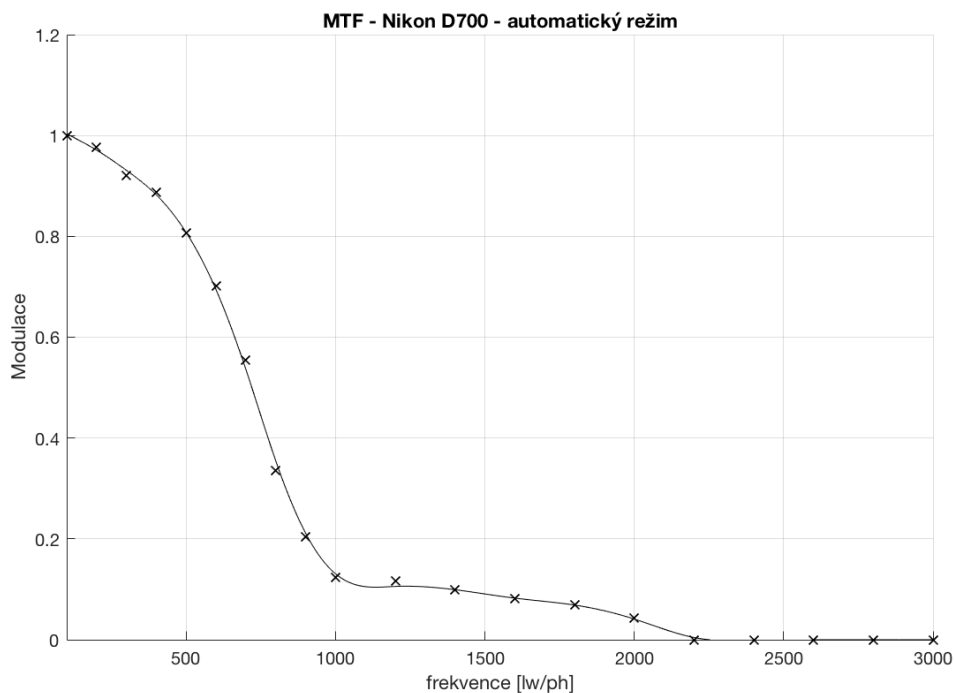
f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	149	10	0,87421384	1
200	149	17	0,79518072	0,90959522
300	153	16	0,81065089	0,9272913
400	158	9	0,89221557	1,02059191
500	155	10	0,87878788	1,00523218
600	155	5	0,9375	1,07239209
700	156	0	1	1,14388489
800	156	1	0,98726115	1,12931311
900	143	12	0,84516129	0,96676723
1000	125	28	0,63398693	0,72520807
1200	175,4	61,7	0,4795445	0,5485437
1400	177,4	71	0,42834138	0,48997324
1600	174,6	77	0,38791733	0,44373277
1800	177,2	73,9	0,41138988	0,47058267
2000	178,3	73,7	0,41507937	0,47480301
2200	179,6	63,3	0,47879786	0,54768964
2400	171	82,6	0,34858044	0,3987359
2600	158,4	93,9	0,25564804	0,29243193
2800	153,3	113	0,15133308	0,17310763
3000	-	-	-	0



Obrázek A.8 - MTF - Nokia 5 - manuální režim

Tabulka A. 8 - MTF - Nokia 5 - manuální režim

f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	160	19	0,7877095	1
200	159	25	0,72826087	0,92452976
300	157	33	0,65263158	0,8285181
400	156	45	0,55223881	0,70106912
500	153	53	0,48543689	0,61626386
600	146	60	0,41747573	0,52998692
700	139	67	0,34951456	0,44370998
800	138	70	0,32692308	0,41503001
900	131	66	0,32994924	0,41887173
1000	121	63	0,31521739	0,4001696
1200	176	140	0,11392405	0,14462699
1400	174	143	0,0977918	0,12414703
1600	174	149	0,07739938	0,09825879
1800	172	154	0,05521472	0,07009529
2000	171	158	0,03951368	0,05016275
2200	169	153	0,04968944	0,06308092
2400	169	163	0,01807229	0,02294284
2600	-	-	-	0
2800	-	-	-	0
3000	-	-	-	0

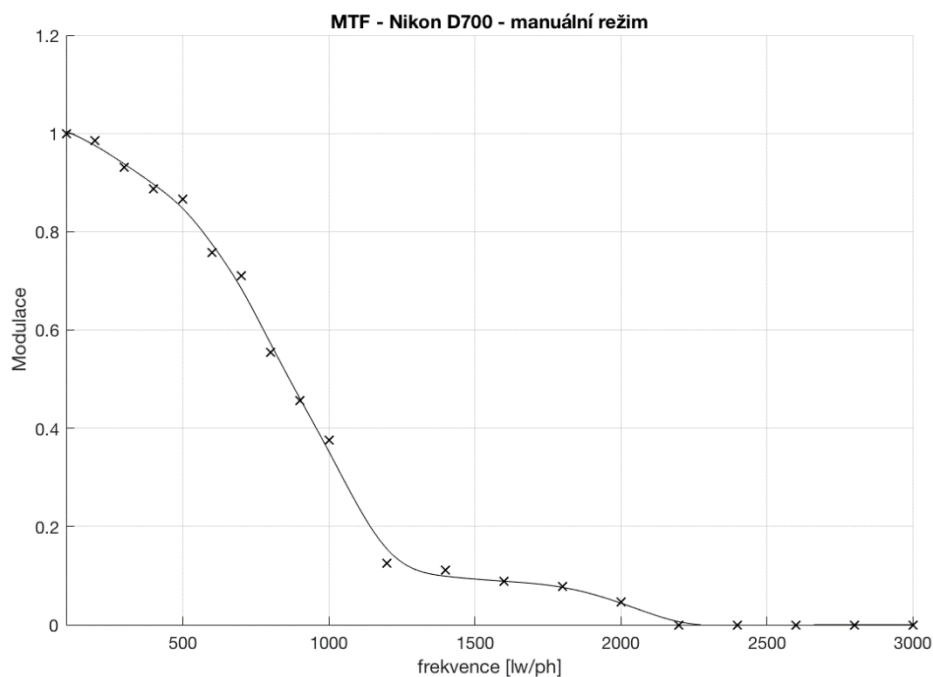


Obrázek A.9 - MTF – Nikon D700 – automatický režim

Tabulka A. 9 - MTF – Nikon D700 – automatický režim

f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	212	25	0,78902954	1
200	216	28	0,7704918	0,97650565
300	215	34	0,72690763	0,92126796
400	215	38	0,69960474	0,88666483
500	212	47	0,63706564	0,80740404
600	205	59	0,5530303	0,70089937
700	197	77	0,4379562	0,55505679
800	186	108	0,26530612	0,33624359
900	170	123	0,16040956	0,20329981
1000	163	134	0,0976431	0,12375088
1200	165,5	137,8	0,09132872	0,11574816
1400	166,5	142,3	0,07836788	0,09932185
1600	166,3	146,4	0,06363927	0,08065512
1800	166	148,7	0,05497299	0,06967165
2000	165	154	0,03448276	0,04370275
2200	-	-	-	0
2400	-	-	-	0
2600	-	-	-	0
2800	-	-	-	0
3000	-	-	-	0



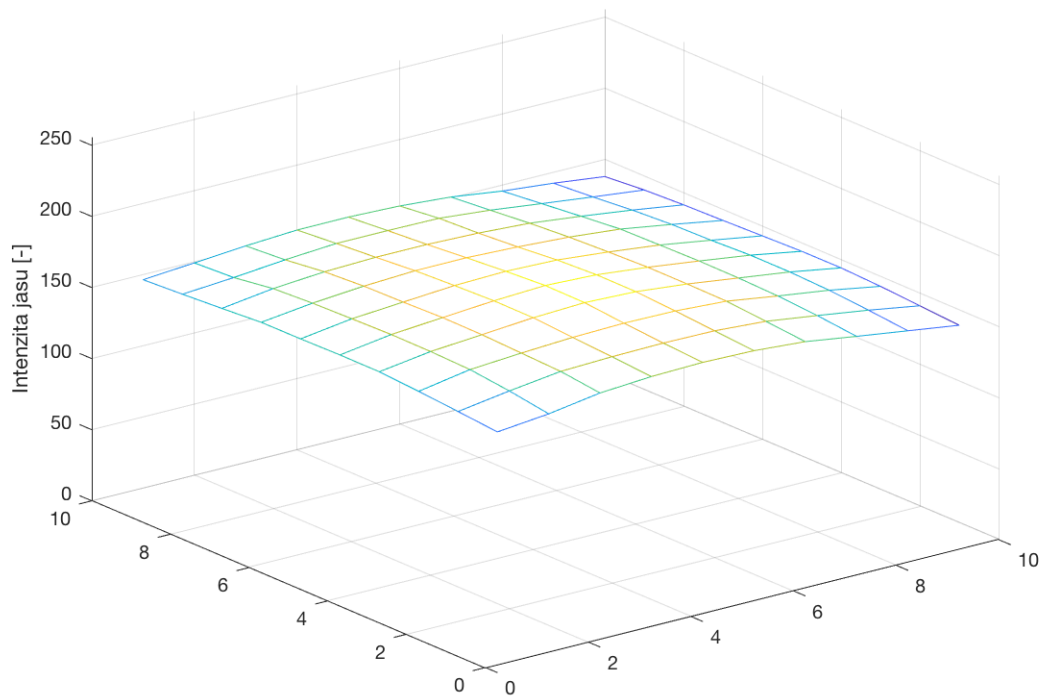


Obrázek A.10 - MTF - Nikon D700 - manuální režim

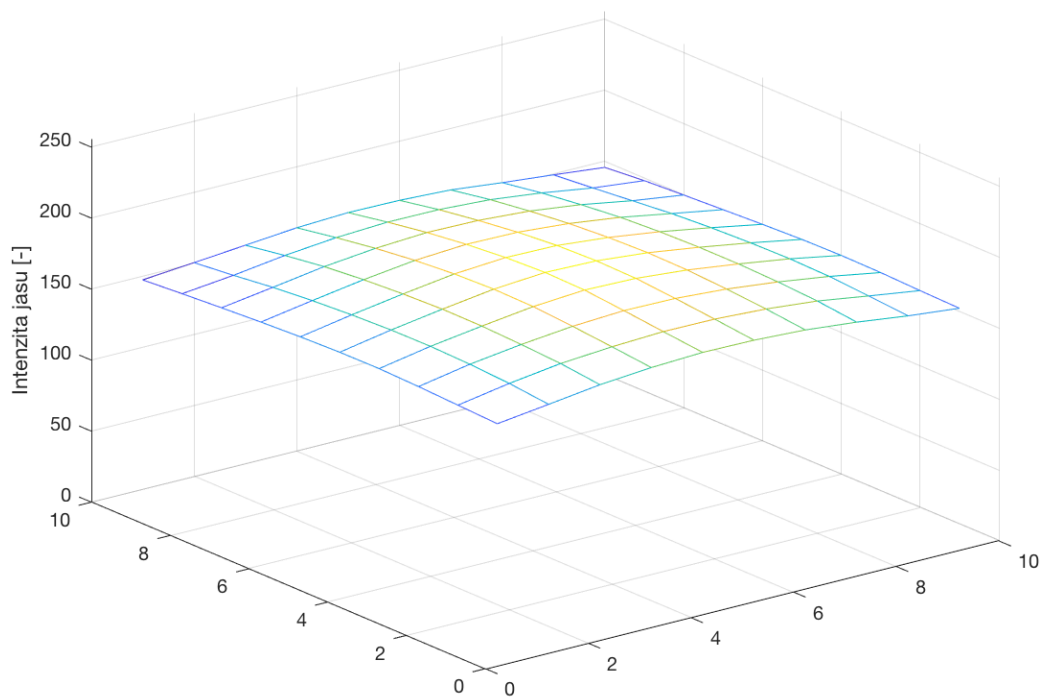
Tabulka A. 10 - MTF - Nikon D700 - manuální režim

f (lw/ph)	Lmax	Lmin	C(f)	MTF
100	225	35	0,73076923	1
200	227	37	0,71969697	0,98484848
300	226	43	0,6802974	0,93093328
400	225	48	0,64835165	0,88721805
500	227	51	0,63309353	0,86633851
600	223	64	0,55400697	0,7581148
700	221	70	0,51890034	0,71007415
800	215	91	0,40522876	0,55452356
900	204	102	0,33333333	0,45614035
1000	186	106	0,2739726	0,37490988
1200	166	138	0,09210526	0,12603878
1400	167	142	0,08090615	0,11071368
1600	166	146	0,06410256	0,0877193
1800	166	148	0,05732484	0,07844452
2000	165	154	0,03448276	0,04718693
2200	-	-	-	0
2400	-	-	-	0
2600	-	-	-	0
2800	-	-	-	0
3000	-	-	-	0

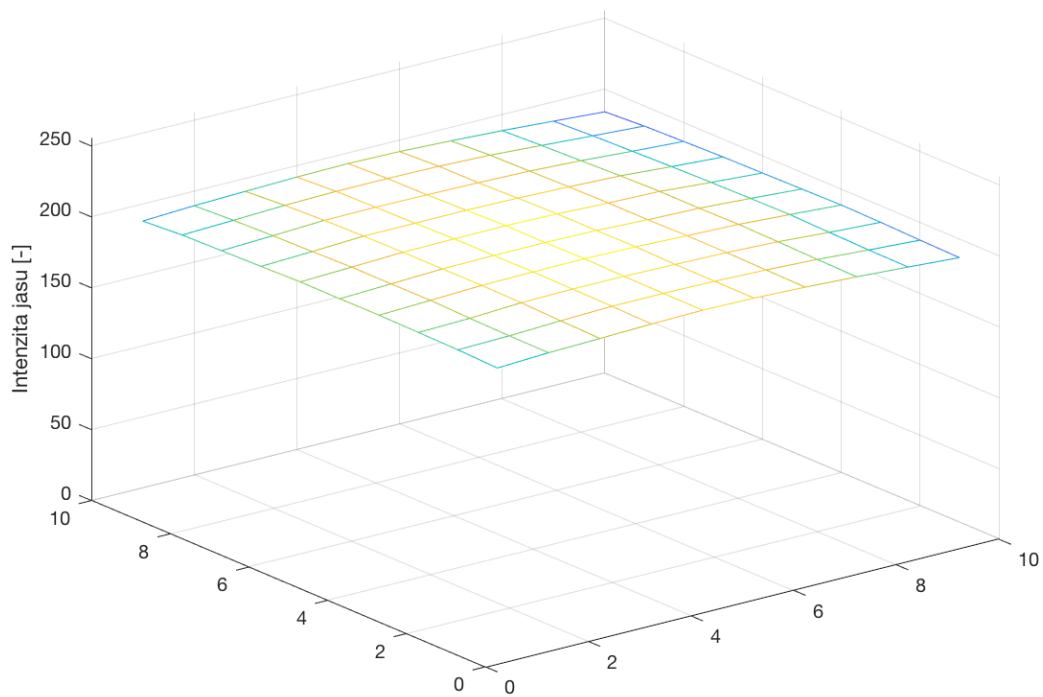
## Příloha B – Vinětace všech měřených vzorků



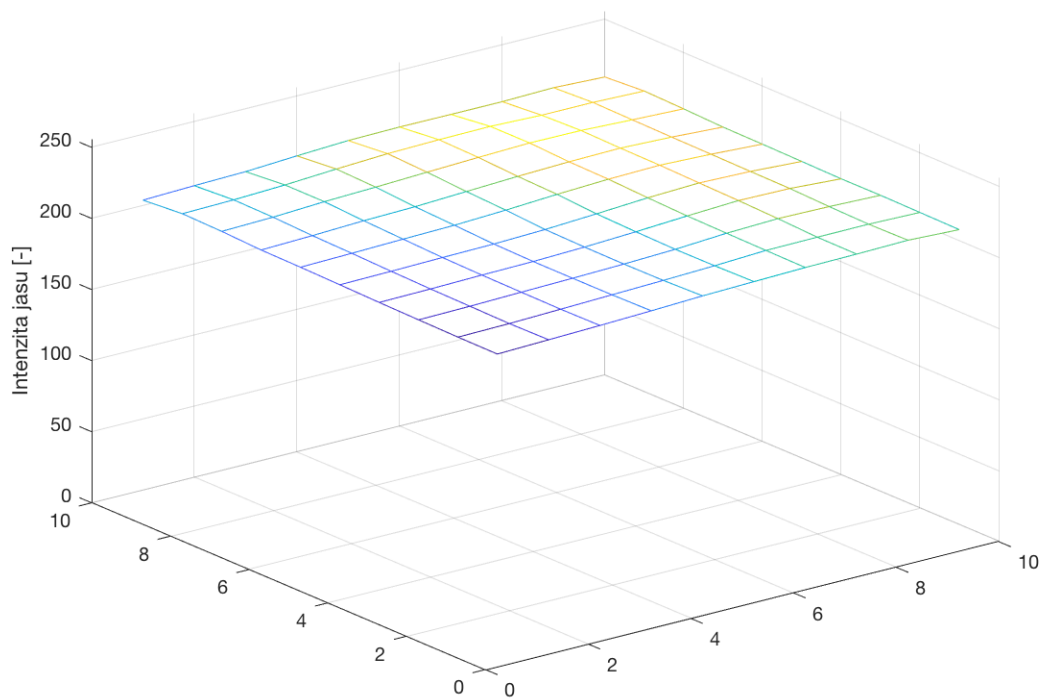
Obrázek B.1 – vinětace – Apple iPhone 7 – automatický režim



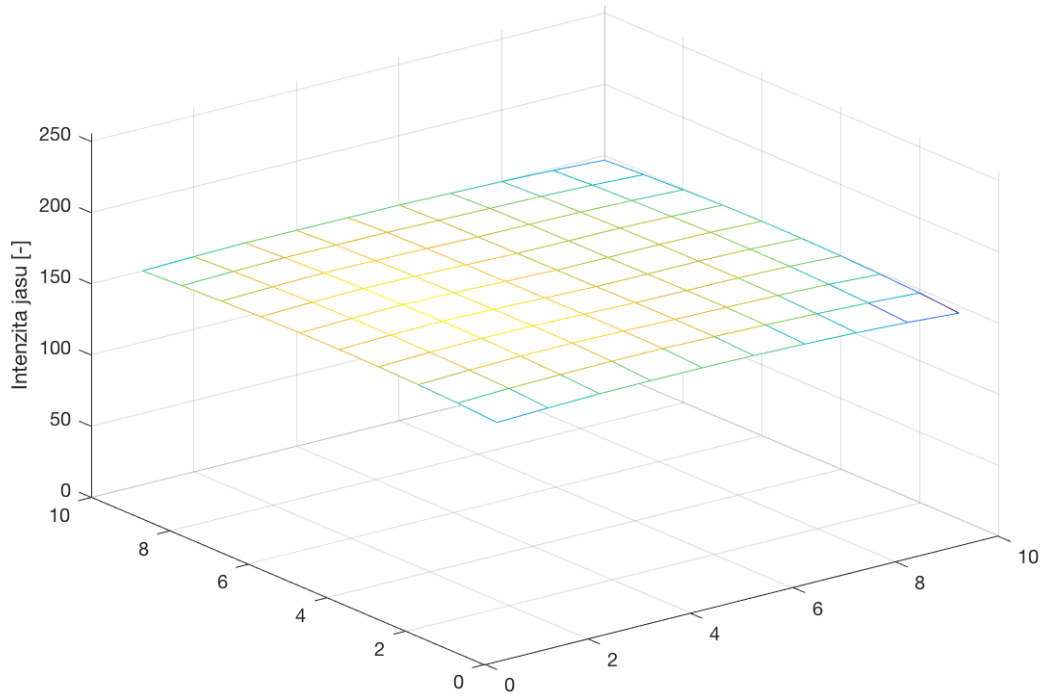
Obrázek B.2 – vinětace – Apple iPhone 7 – manuální režim



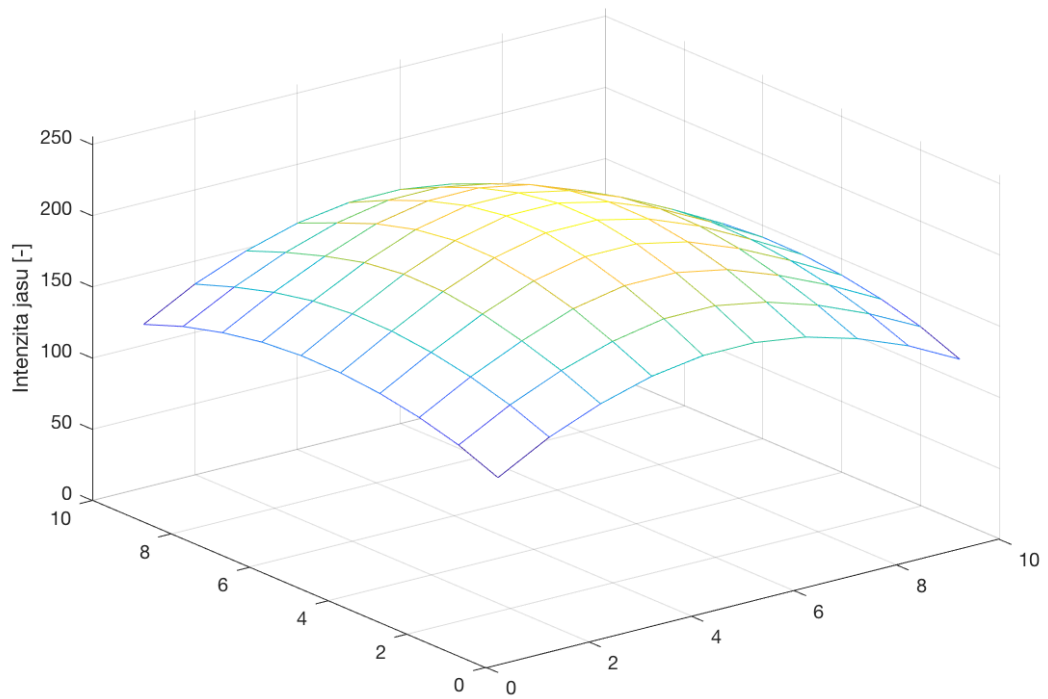
Obrázek B.3 – vinětace – Google Pixel 2 – automatický režim



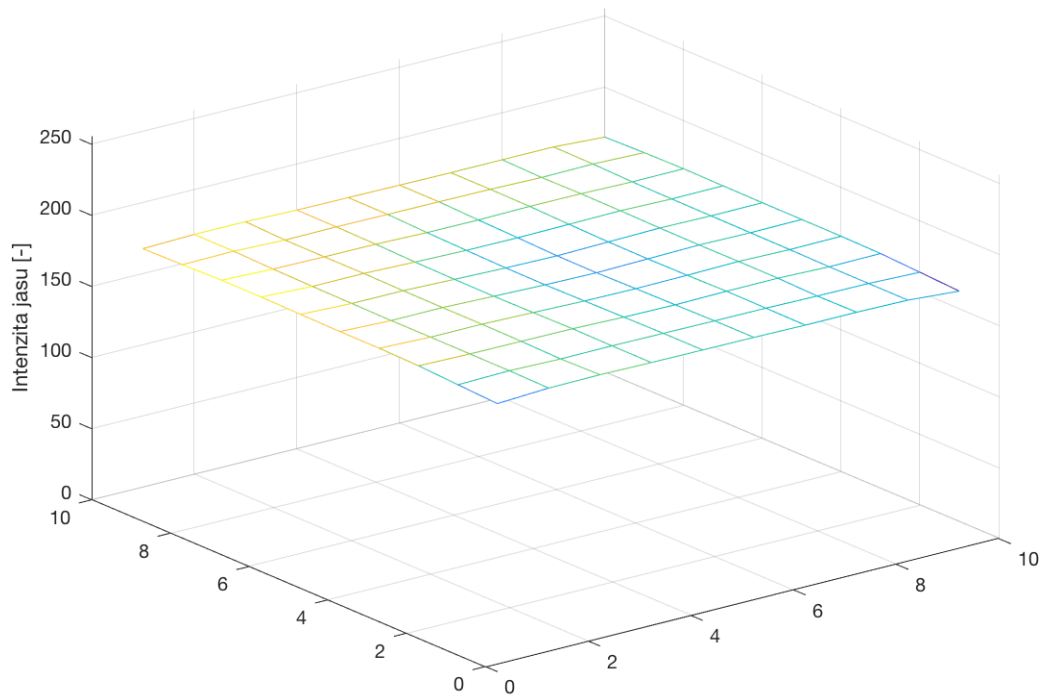
Obrázek B.4 – vinětace – Google Pixel 2 – manuální režim



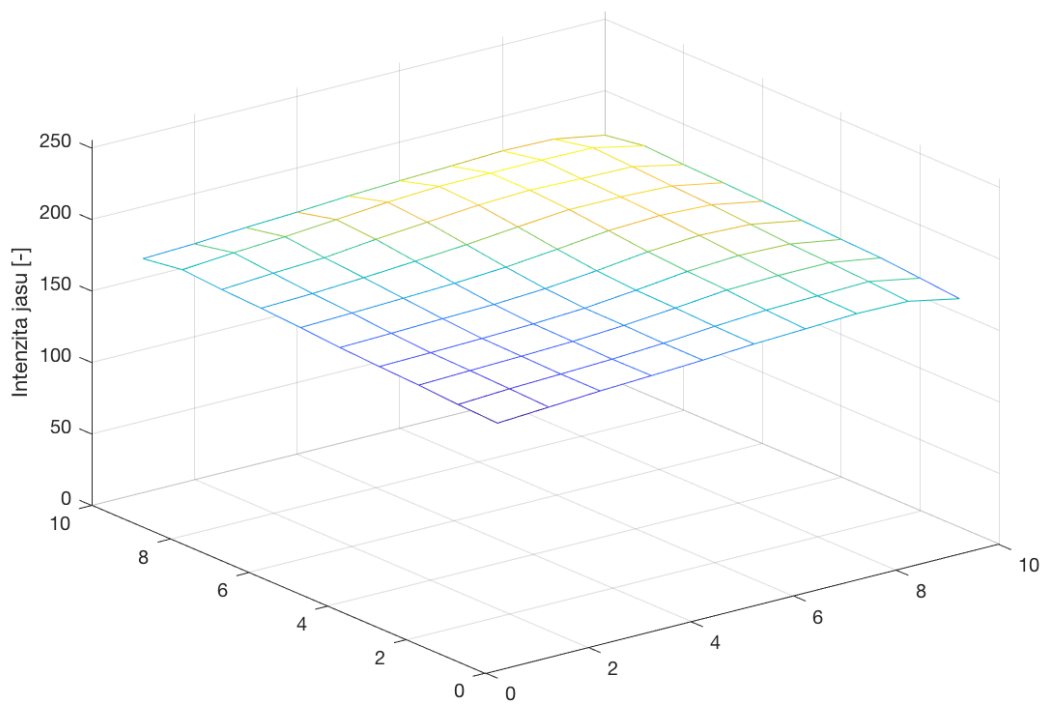
Obrázek B.5 – vinětace – Huawei P20 – automatický režim



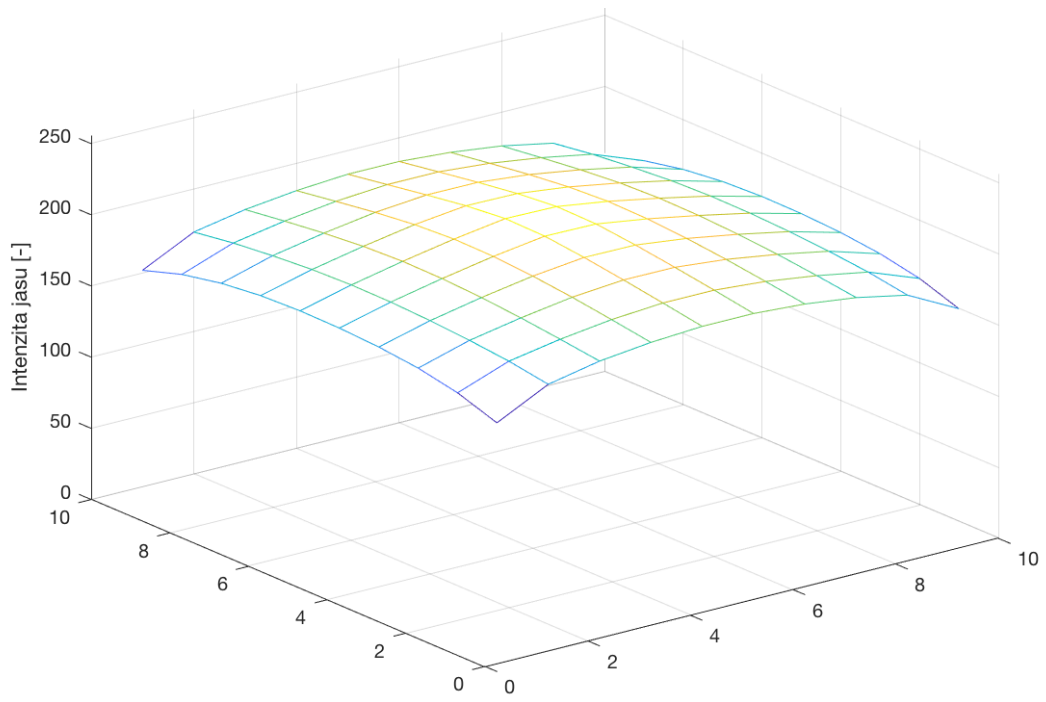
Obrázek B.6 – vinětace – Huawei P20 – manuální režim



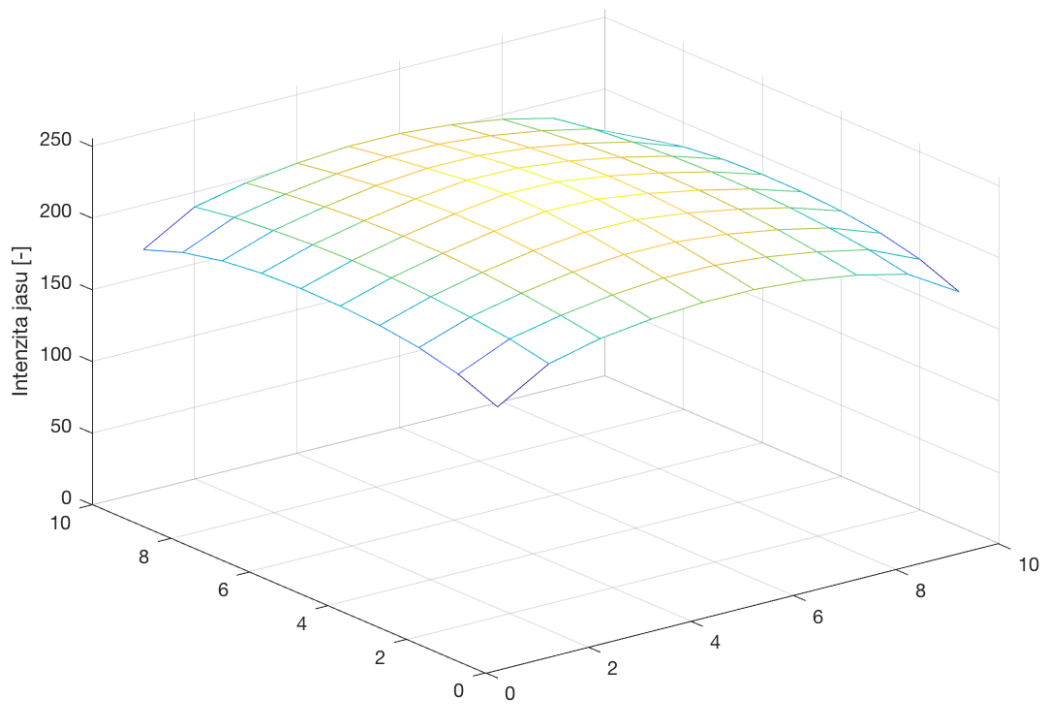
Obrázek B.7 – vinětace – Nokia 5 – automatický režim



Obrázek B.8 – vinětace – Nokia 5 - manuální režim



Obrázek B.9 – vinětace – Nikon D700 – automatický režim



Obrázek B.10 – vinětace – Nikon D700 – manuální režim

## Příloha C – Obsah přiloženého DVD

- Složka „Vinětace“ obsahuje fotografie z měřených vzorků a všechny grafy vyhodnocení týkající se vinětace
- Složka „Geometrické zkreslení“ obsahuje fotografie z měřených vzorků a všechny grafy vyhodnocení týkající se geometrického zkreslení
- Složka „MTF“ obsahuje fotografie z měřených vzorků a všechny grafy vyhodnocení týkající se MTF
- Složka „Šum“ obsahuje fotografie z měřených vzorků
- Složka „Skripty“ obsahuje všechny skripty napsané a použité pro vyhodnocení parametrů
- Soubor Excel s výpočtem MTF
- Testovací obrazec na měření geometrického zkreslení ve formátu PDF
- Samotná práce ve formátu PDF