



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky**

Měření parametrů televizních kamer

Measurement of the TV cameras parameters

Diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D

Bc. Jan Čermák

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra radioelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: Jan Čermák

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Multimediální technika

Název tématu: Měření parametrů televizních kamer

Pokyny pro vypracování:

Seznamte s teoretickými základy činnosti televizních kamer, jejich parametry a popisy digitálního videosignálu. Podejte přehled metod měření uvedených parametrů a navrhnete metodiku měření vhodnou pro využití v České televizi. Po dohodě s vedoucím vybrané postupy realizujte a ověřte.

Seznam odborné literatury:

- [1] Junichi Nakamura; Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras; ISBN 9780849335457; 2005; CRC Press
- [2] Janos Schanda; Colorimetry: Understanding the CIE System; ISBN 9780470175620; 2008.
- [3] Petr Kuba, Vladimír Vit; Televizní technika: studiové zpracování televizního signálu; ISBN 8086056880; 2000.
- [4] Sony Electronics Inc., Sony Guides and specifications. [online] 2015;

Vedoucí: doc.Mgr. Petr Páta, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



doc. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pável Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 10. 2. 2015

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.“

Datum: 11. 5. 2015

.....

podpis autora

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem metodiky měření televizních kamer s ohledem na potřeby České televize. Tato organizace je mezi ostatními tuzemskými televizemi největším subjektem se specifickými finančními a technickými možnostmi. Mezi ně patří útvar videoinženýringu, který vlastní vybavení k měření parametrů televizních kamer. Pracovní postupy a metodika práce v této oblasti jsou detailně pozorovány s důrazem na kompatibilitu s normami a doporučeními organizací ITU (International Telecommunication Union) a EBU (European Broadcasting Union). V případě nevyhovující metodiky je upřesněn či navržen nový postup. Navržená metodika je prakticky realizována na různých modelech televizních kamer a je obecně platná i mimo půdu České televize.

Klíčová slova

Kamera, měření, metodika, SDI, digitální video, Česká televize, EBU, ITU, parametry, gama, jitter, rozlišení, kolorimetrie, citlivost, šum

Abstract

The objective of this master thesis is to design a methodology for measurement of the TV cameras parameters with regards to requirements stated by Czech Television. The organization is the largest subject among Czech broadcasting companies with its specific facilities such as department of video-engineering. The department is beside other processes, responsible for measuring the specific parameters of the TV cameras. Working procedures and methodology of such measurements are closely observed and critically compared to standards and recommendations by ITU (International Telecommunication Union) and EBU (European Broadcasting Union). In cases of inappropriate methodology, this thesis offers new specifications or an entirely new procedure. The newly designed methodology is implemented in the process and verified on different models of TV cameras. Moreover, this methodology of measurement is possible to apply widely.

Keywords

Video Camera, measurement, methodology, SDI, digital video, Czech television, EBU, ITU, parameters, gama, jitter, resolution, colorimetry, sensitivity, noise

Poděkování

Děkuji zejména Zdeňkovi Linzmajerovi a Martinovi Štulíkovi za zapůjčené vybavení, jejich čas, rady a pomoc při praktickém měření. Děkuji svému vedoucímu práce doc. Mgr. Petru Pátovi, Ph.D za jeho odborné vedení a ochotu při tvorbě této práce. Dále děkuji slečně Bc. Kateřině Indrové, studentce ČVUT Fakulty biomedicínského inženýrství, za její pomoc a rady v oblastech technických a jazykových. Díky patří i mé rodině, která mi umožňuje studovat na ČVUT Fakultě elektrotechnické.

Obsah

OBSAH	1
SEZNAM OBRÁZKŮ	3
SEZNAM TABULEK	4
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	5
1. POPIS FUNGOVÁNÍ KAMERY	8
1.1. HISTORIE.....	8
1.2. CAMERA OBSCURA.....	8
1.3. ZÁKLADNÍ OPTICKÉ PARAMETRY	9
1.3.1. <i>Fermatův princip</i>	9
1.3.2. <i>Geometrická optika</i>	10
1.3.3. <i>Vlnová optika</i>	11
1.4. POPIS BAREVNÉHO SVĚTLA.....	12
1.4.1. <i>CIE XYZ</i>	13
1.5. OBRAZOVÉ SNÍMAČE	15
1.5.1. <i>CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)</i>	15
1.5.2. <i>CCD (Charge coupled device)</i>	17
1.5.3. <i>Snímání barevného světla obrazovými senzory</i>	19
1.5.4. <i>Velikosti obrazových senzorů</i>	20
2. POPIS VIDEO SIGNÁLU	21
2.1. ANALGOVÉ SIGNÁLY	21
2.1.1. <i>NTSC (National Television System Committee)</i>	25
2.1.2. <i>PAL (Phase Alternating Line)</i>	25
2.2. DIGITÁLNÍ SIGNÁLY	26
2.2.1. <i>SDI (Serial Digital Interface)</i>	27
2.2.2. <i>HDMI (High-Definition Multimedia Interface)</i>	32
3. PARAMETRY VHODNÉ PRO MĚŘENÍ TELEVIZNÍCH KAMER	33
3.1. PARAMETRY DIGITÁLNÍHO SÉRIOVÉHO SIGNÁLU	33
3.1.1. <i>Časový neklid (Jitter)</i>	35
3.2. PARAMETRY OBRAZOVÉHO SIGNÁLU.....	37
3.2.1. <i>Gama opto-elektronická přenosová funkce</i>	37
3.2.2. <i>Kolorimetrie v měření</i>	40
3.2.3. <i>Šumové vlastnosti</i>	42
3.2.4. <i>Rozlišení, aliasing</i>	43
4. NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ PARAMETRŮ TELEVIZNÍCH KAMER	45
4.1. MĚŘICÍ VYBAVENÍ.....	45
4.1.1. <i>Obrazový monitor TVLogic LVM-242W</i>	45
4.1.2. <i>Prosvětlovací testy</i>	45
4.1.3. <i>Prosvětlovací skříň LE 6-100</i>	46
4.1.4. <i>Tektronix WFM 8300</i>	46
4.1.5. <i>Tektronix WM 700A</i>	47
4.1.6. <i>AJA HA5</i>	48
4.1.7. <i>Teranex 3D</i>	48
4.2. PODMÍNKY MĚŘENÍ.....	49
4.3. PARAMETRY DIGITÁLNÍHO SÉRIOVÉHO SIGNÁLU	50
4.4. KOLORIMETRICKÉ PARAMETRY	53
4.5. CITLIVOST	56
4.6. PŘENOSOVÁ FUNKCE GAMA	57
4.7. HORIZONTÁLNÍ ROZLIŠENÍ.....	59
4.8. DEFEKTY	62
4.9. ŠUMOVÉ VLASTNOSTI	63
4.10. NEROVNOMĚRNOST V BÍLÉ	65

4.11. BLOOMING, SMEARING	66
4.12. INFRAČERVENÁ ODEZVA	67
5. PRAKTICKÉ MĚŘENÍ PARAMETRŮ TELEVIZNÍCH KAMER	69
5.1. SONY HDC-1700	69
5.2. PANASONIC AG-AC90	72
5.3. CANON XA20	76
6. ZÁVĚR.....	78
SEZNAM ZDROJŮ.....	79
SEZNAM ZDROJŮ OBRÁZKŮ A TABULEK.....	84
PŘÍLOHA A	86
PŘÍLOHA B	90
PŘÍLOHA C	94

Seznam obrázků

OBR. 1 PRINCIP FUNGOVÁNÍ DÍRKOVÉ KOMORY [25].....	9
OBR. 2 DIFRAKCE VLNĚNÍ NA ŠTĚRBINĚ A NA TENKÉ HRANĚ [1].....	12
OBR. 3 BAREVNÝ MODEL CIE 1931 [2]	14
OBR. 4 BLOKOVÉ SCHÉMA DIGITÁLNÍ KAMERY S PRVKY CCD [3].....	15
OBR. 5 AKTIVNÍ ELEMENT CMOS [4].....	16
OBR. 6 PRINCIP PŘESUNU NÁBOJE CCD [4]	17
OBR. 7 SCHÉMA VYČÍTÁNÍ FULL FRAME TRANSFER [4].....	18
OBR. 8 BARVO-DĚLÍCI HRANOL SE TŘEMI SENZORY; UPRAVENO [5]	19
OBR. 9 ELEMENTÁRNÍ ZNÁZORNĚNÍ BAYEROVA FILTRU; UPRAVENO [6].....	20
OBR. 10 KOMPONENTNÍ SIGNÁL (NAHOŘE) A KOMPOZITNÍ SIGNÁL (DOLE) [7]	22
OBR. 11 STRUKTURA TELEVIZNÍHO ŘÁDKU NTSC [7].....	23
OBR. 12 POSTUP DIGITALIZACE SIGNÁLU [8].....	26
OBR. 13 KONEKTOR BNC (VLEVO) A MUSA (VPRAVO) [9].....	27
OBR. 14 STRUKTURA ANCILLARY DAT SDI [10]	28
OBR. 15 SCHÉMA SCRAMBLER KÓDOVÁNÍ [10].....	29
OBR. 16 KODÉRY NON RETURN TO ZERO (NAHOŘE) A NON RETURN TO ZERO INVERTED (DOLE)	30
OBR. 17 DETEKČNÍ OKO ROZHODNUTÍ (EYE DIAGRAM); UPRAVENO [13].....	34
OBR. 18 PRINCIP VZNIKU ČASOVÉHO NEKLIDU; UPRAVENO [13]	36
OBR. 19 A) ORIGINÁL B) LINEÁRNÍ KVANTIZACE (5BITOVÁ) C) NELINEÁRNÍ KVANTIZACE (5BITOVÁ)	38
OBR. 20 OBECNÝ PRINCIP GAMY U LCD (NAHOŘE) A CRT (DOLE); UPRAVENO [15].....	39
OBR. 21 TRANSFORMAČNÍ FUNKCE PODLE DOPORUČENÍ REC.709; UPRAVENO [15]	40
OBR. 22 ZOBRAZENÍ SIGNÁLU NA VEKTORSKOPU [8]	40
OBR. 23 ZOBRAZENÍ SIGNÁLU NA LIGHTNING DISPLEJI [8].....	41
OBR. 24 PROSVĚTLOVACÍ SKŘÍŇ LE 6-100, POHLED Z BOKU VPRAVO; UPRAVENO [16]	46
OBR. 25 TEKTRONIX WFM8300 [17].....	47
OBR. 26 TEKTRONIX WM 700A [18].....	48
OBR. 27 BLACKMAGIC TERANEX 3D [19].....	48
OBR. 28 USPOŘÁDÁNÍ STANOVIŠTĚ PRO MĚŘENÍ; UPRAVENO [20]	49
OBR. 29 PARAMETRY DIGITÁLNÍHO SIGNÁLU – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST [21].....	51
OBR. 30 KOLORIMETRIE – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST [21].....	53
OBR. 31 PŘÍKLAD NASTAVENÍ UŽIVATELSKÉ MATICE V KAMEŘE SONY	55
OBR. 32 CITLIVOST – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST; UPRAVENO [21].....	56
OBR. 33 GAMA – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST, VARIANTA A [21].....	57
OBR. 34 GAMA – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST, VARIANTA B [21].....	58
OBR. 35 HORIZONTÁLNÍ ROZLIŠENÍ – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST [21].....	60
OBR. 36 ZONÁLNÍ TEST [21]	61
OBR. 37 DEFEKTY – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST; UPRAVENO [21]	62
OBR. 38 NEROVNOMĚRNOST – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST; UPRAVENO 21	65
OBR. 39 BLOOMING, SMEARING – NASTAVENÍ KAMERY A POUŽITÝ OBRAZOVÝ TEST [21].....	66
OBR. 40 SONY HDC-1700 A CCU HDCU-1700 [22]	69
OBR. 41 SONY HDC-1700 – PŮVODNÍ (VLEVO) A DOCÍLENÉ BAREVNÉ PODÁNÍ	70
OBR. 42 SONY HDC-1700 – FREKVENČNÍ ODEZVA NA ZONÁLNÍ TEST (VLEVO) S ROVNOMĚRNÝM ROZLOŽENÍM A ODEZVA KAMERY NA LINEÁRNÍ TEST S NASTAVENOU HODNOTOU GAMY 0,45 (VPRAVO).....	71
OBR. 43 PANASONIC AG-AC90 [23].....	72
OBR. 44 PANASONIC AG-AC90 – PŮVODNÍ (VLEVO) A DOCÍLENÉ BAREVNÉ PODÁNÍ.....	73
OBR. 45 PANASONIC AG-AC90 – INFRAČERVENÁ ODEZVA (VLEVO) A SIGNÁLOVÁ INTERPRETACE (VPRAVO). 74	
OBR. 46 PANASONIC AG-AC90 – SD FREKVENČNÍ ODEZVA S GAMA <i>LOW</i> (VLEVO) A GAMA <i>HD NORM</i> (VPRAVO)	74
OBR. 47 GRAF ZMĚŘENÝCH HODNOT (ČERVENÝ), PRŮBĚHU APROXIMOVANÉ GAMY (MODRÝ) A IDEÁLNÍHO PRŮBĚHU PRO 0,45 (ČERNÝ)	75
OBR. 48 CANON XA20 [24].....	76
OBR. 49 CANON XA20 – ODEZVA NA ZONÁLNÍ TEST (VLEVO) A KOLORIMETRICKÉ VLASTNOSTI.....	77
OBR. 50 CANON XA20 – SKLENUTÍ OBJEKTIVU (VLEVO) A MĚŘENÍ ŠUMU	77

Seznam tabulek

TAB. 1 PARAMETRY SYSTÉMU NTSC A PAL [12]	25
TAB. 2 SPECIFIKACE DIGITÁLNÍCH SERIOVÝCH SIGNÁLŮ SD SDI A HD SDI [12]	32
TAB. 3 PŘEHLED NORMOVANÝCH PARAMETRŮ DIGITÁLNÍHO SIGNÁLU [12]	52
TAB. 4 ŠUMOVÉ VLASTNOSTI – NASTAVENÍ KAMERY	65
TAB. 5 INFRAČERVENÁ ODEZVA – NASTAVENÍ KAMERY	67

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
A/D	Analog-to-Digital (Converter)	Analogově digitální (převodník)
A/V	Audio/Video	Audio/Video
ADF	Ancillary Data Flag	Úvod ancillary dat
APS	Active Pixel Sensors	Senzory s aktivním pixelem
AUX	Auxiliary Channel	Pomocný kanál
AVCHD	Advanced Video Coding High Definition	Pokročilé kódování videosignálu s vysokým rozlišením
BE	Blanking End	Konec vertikálního zatemnění
BER	Bit Error Rate	Bitová chybovost
BNC	Bayonet Neill–Concelman	Konektor s bajonetovým spojením
bpp	Bits per pixel	Bity na pixel
BS	Blanking Start	Začátek vertikálního zatemnění
BSI	Back Side Illumination	Zpětné osvětlování
CCD	Charge-coupled device	Snímač s vázaným nábojem
CCU	Camera Control Unit	Kamerová řídicí jednotka
cd	Candela	Kandela (jednotka svítivosti)
CDR	Clock and Data Recovery	Obnova dat a hodinového signálu
CIE	International Commission on Illumination	Mezinárodní komise pro osvětlování
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor	Doplňující se kov-oxid-polovodič
CRC	Cyclic Redundancy Check	Cyklický redundantní součet
CRT	Cathode Ray Tube	Obrazovka CRT
CTF	Contrast Transfer Function	Přenosová funkce kontrastu
dB	Decibel	Logaritmická jednotka decibel
DBN	Data Block Number	Pořadí datového bloku
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
DC	Data Count	Počet uživatelských slov
DID	Data Identifier	Identifikátor dat
DVI	Digital Visual Interface	DVI - standard pro zobrazovací techniku
E	Electric Field Intensity	Intenzita elektrického pole
EAV	End of Active Video	Konec aktivního videosignálu
EBU	European Broadcasting Union	Evropská vysílací unie
ECC	Error Checking and Correcting	Kontrola a oprava chyb
EDH	Error Electronic Data Handling	Parametr chybových sekund
FC	Fiber Cable	Optický kabel
FFT	Fast Fourier Transform	Rychlá Fourierova transformace
FPS	Frames Per Second	Snímků za sekundu
H	Magnetic Field Intensity	Intenzita magnetického pole
H/V	Horizontal/Vertical	Horizontální/Vertikální
HD	High-Definition	Vysoké rozlišení (obrazu)
HDD	Hard Disk Drive	Pevný disk
HDMI	High-Definition Multimedia Interface	HDMI - standard pro zobrazovací techniku s vysokým rozlišením
HP	High Pass	Horní propust
Hz	Herz	Herz (jednotka frekvence)

I/O	In/Out	Vstup/Výstup
ISI	Intersymbol Interference	Mezi-symbolové rušení
ISO/OSI	International Organization for Standardization	Mezinárodní standardizační organizace
ITU	International Telecommunication Union	Mezinárodní telekomunikační unie
K	Kelvin	Kelvin (jednotka teploty)
LCD	Liquid Crystal Display	Displej z tekutých krystalů
LED	Light-Emitting Diode	Dioda emitující světlo
LPCM	Pulse-code modulation with linear quantization	Pulzně kódová modulace s lineárním kvantováním
LSB	Least Significant Bit	Nejméně významný bit
LUT	Look-Up Table	Převodní tabulka
Lx	Lux	Lux - Jednotka intenzity osvětlení
m	Meter	Metr (jednotka délky)
MOS	Metal–Oxide–Semiconductor	Kov-oxid-polovodič
MSB	Most Significant Bit	Nejvýznamnější bit
MSE	Mean Squared Error	Metoda průměrné čtvercové chyby
MTF	Modulation Transfer Function	Modulační přenosová funkce
MUSA	Multiple Unit Steerable Antenna	Konektor pro přepojování signálových linek
NRZI	Non Return to Zero Inverted	Invertované kódování bez návratu k nule
NTSC	National Television Systems Committee	NTSC - standard pro vysílání analogové televize např. v USA
OTF	Optical Transfer Function	Optická přenosová funkce
PAL	Phase Alternating Line	PAL - standard pro vysílání analogové televize např. v Německu
PC	Personal Computer	Osobní počítač
PLL	Phase Locked Loop	Fázová smyčka
PPS	Passive Pixel Sensors	Senzory s pasivním pixelem
PSNR	Peak Signal to Noise Ratio	Poměr špičkového signálu k šumu
RCU	Remote Control Unit	Řídicí jednotka kamery (dálková)
RGB	Red - Green - Blue	Červená - zelená - modrá
RL	Return Loss	Ztráta při návratu
RMS	Root Mean Square	Efektivní úroveň výkonu šumu
ROI	Region of Interest	Oblast zájmu
s	Second	Sekunda (jednotka času)
SAV	Start of Active Video	Začátek aktivního videosignálu
SD	Standard-Definition	Standardní rozlišení (obrazu)
SDI	Serial Digital Interface	Seriové digitální rozhraní
SECAM	z fr. Séquentiel couleur à mémoire	SECAM - standard pro vysílání analogové televize např. ve Francii
SMPTE	The Society of Motion Picture and Television Engineers	Sdružení filmových a televizních inženýrů
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Odstup signálu od šumu
Sr	Steradian	Steradián (jednotka prostorového úhlu)
sRGB	Standard Red - Green - Blue	Standardní červená - zelená - modrá
S-Video	Separate Video	S-Video - standard pro zobrazovací techniku
TB	Thunderbolt	Thunderbolt - standard pro datové rozhraní

TFT	Thin Film Transistor	Tenkovrstvé tranzistory
TRS	Timing Reference Signal	Časový referenční signál
TU	Transfer Unit	Přenosová jednotka
TV	Television	Televize
UDW	User Data Words	Uživatelská data
UHD	Ultra High Definition	Ultra vysoké rozlišení (obrazu)
USB	Universal Serial Bus	Univerzální sériová sběrnice
V	Volt	Volt (jednotka napětí)
VCO	Voltage controlled oscillator	Napětím řízený oscilátor
W	Watt	Watt (jednotka výkonu)
Y	Luminance	Jas
YCbCr	Luma, the blue & red difference chroma components	Barevný model s komponenty: jas, modrý, červený
YPbPr	Analog luma, the blue & red difference chroma components	Barevný analogový model s komponenty: jas, modrá, červená
Ω	Ohm	Ohm (jednotka elektrického odporu/impedance)

1. Popis fungování kamery

Na počátku této práce budou vyloženy základní technické i optické principy fungování kamery/fotoaparátu. V první kapitole budou definovány základní termíny a čtenář se seznámí s principy a technickými aspekty, kterých bude dále v této práci využito. Rozebrány budou také obrazové snímače digitální kamery/fotoaparátu. Po nastudování této kapitoly by měl být čtenář seznámen se základní terminologií týkající se fungování digitálních kamer.

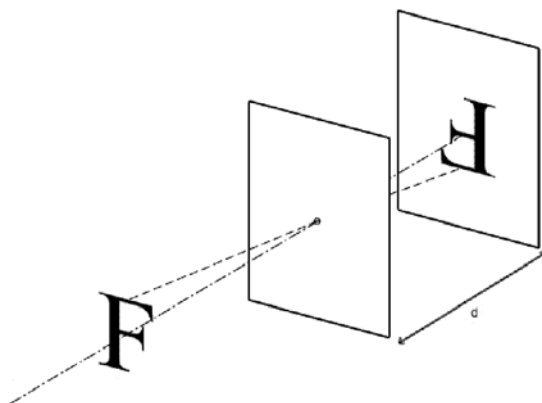
1.1. Historie

Předchůdcem dnešních digitálních kamer a optických zařízení, z kterého tyto kamery vycházejí, je tzv. Camera obscura (z lat. camera – pokoj; obscura – tma). První dochovaný záznam jejího principu je z 5. st. př. n. l. od čínského filozofa jménem Mo Ti. Ve 4. st. př. n. l. se otázkami průchodu světla malým otvorem zabývá také Aristoteles. V 10. století pomocí dírkové komory arabský fyzik a matematik Abu Ali al-Hasan zjistil, že se světlo šíří přímočaře. První ucelené fungování bylo popsáno až v 16. století italským matematikem jménem Giovanni Battista della Porta. K masivnímu rozšíření došlo v 17. století, kdy byl vstupní otvor opatřen čočkou, která přispěla k větší mobilitě a menším rozměrům celé komory, a ta se tak stala vyhledávaným zařízením malířů. Při zmenšených rozměrech a použití fotocitlivého materiálu na počátku 19. století můžeme poprvé mluvit o pojmu fotoaparát [7]. Camera obscura se v polovině 20. století začala využívat k fotografování rentgenového a gama záření. Umístěna byla v 50. a 60. letech 20. století na palubu vesmírných letů k fotografování slunce. V posledních desetiletích se využívá i na půdě jaderné fyziky k vyobrazení laserového plazmatu. Samotný princip je uveden v kapitole 1.2.

1.2. Camera obscura

Samotný obraz na průmětně vzniká díky přímočarému šíření světla. Osvětlený předmět v obrazové rovině odráží paprsky světla, které následně prochází úzkou štěrbinou kruhového tvaru. Průmět se zobrazí jako převrácený obraz předmětu díky středové souměrnosti. Při správně zvoleném rozměru otvoru se pozorovateli jeví obraz ostrý. Při zmenšení rozměru otvoru se zmenšuje počet procházejících paprsků a dochází k zaostření průmětu. Při rozměrech otvoru podobných vlnové délce světla se ale začíná uplatňovat vlnový charakter světla a difrakce, která způsobí rozostření předmětu. Při zužování štěrbiny také klesá jas průmětu. Naopak při větším rozměru

jas roste, ale kvůli širší štěrbině je obraz rozostřený [7]. Uvedený princip je naznačen na Obr. 1. Oproti klasickým fotoaparátům má dírková komora odlišné vlastnosti. Středová souměrnost zajišťuje nekonečnou hloubku ostrosti a věrné podání perspektivy. Expoziční časy jsou kvůli menší světelnosti a méně fotocitlivým materiálům násobně delší. Typicky se jedná o sekundy, minuty a někdy také o hodiny.



Obr. 1 Princip fungování dírkové komory [25]

1.3. Základní optické parametry

Pro pochopení fungování kamer je nezbytné se seznámit s optickými vlastnostmi světla a fyzikálními principy jeho šíření. Světlo je elektromagnetické vlnění, které je pro lidské oko viditelné v oblasti 380-790 nm. Šíří se přímočaře a dle Fermatova principu (viz 1.3.1). Popis chování světla jen pomocí vlnové teorie není úplný, a proto se pracuje s teorií duality částice a vlnění. Částicový popis světla neboli kvantovou teorií prezentoval německý fyzik Max Planck. Označil světlo za tok vysokorychlostních částic – fotonů. Obě teorie se navzájem doplňují a některé optické jevy lze vysvětlit pouze jednou teorií. Z kvantové teorie plyne, že každému elektromagnetickému vlnění lze přidělit částicové vlastnosti, a také, že částice se v určitých situacích projeví jako vlnění. Bližším popisem kvantové teorie se tato práce nezabývá.

1.3.1. Fermatův princip

Tento zákon je nadřazený k zákonu lomu a odrazu světla. Ve své podstatě říká, že světlo se v prostoru šíří z jednoho bodu do druhého po takové dráze, aby čas potřebný k proběhnutí této dráhy nabýval nejmenší hodnoty. Vyjádřením času jako elementu dráhy děleným rychlostí a následným využitím indexu lomu (vztah rychlosti

světla ve vakuu a v daném prostředí) dostaneme matematický zápis Fermatova principu jako minimální čas, za který paprsek urazí dráhu

$$t_p = \frac{1}{c} \int n(x, y, z) ds, \quad (1)$$

kde t_p je čas, c rychlost světla ve vaku, n index lomu [8].

Z tohoto vyjádření lze vyjít při odvozování zákona odrazu a Snellova zákona, který nám udává vztah mezi vlněními na rozhraní dvou opticky odlišných rozhraní, ve kterých má světlo různou fázovou rychlost a kde dochází k lomu světla. Možné odvození lze nalézt v [8].

1.3.2. Geometrická optika

Zákon přímočarého šíření světla – Zcela základním charakterem světla je jeho přímočaré šíření v opticky stejnorodém prostředí. Tato vlastnost světla byla známa již od starověku. Na jeho principu vznikla camera obscura.

Zákon nezávislosti paprsků – Tento zákon definuje vzájemné neovlivňování se dvou paprsků. Jednotlivé paprsky ve světelném toku se šíří tak, jako kdyby ostatní paprsky neexistovaly. Tento zákon neplatí v případě interference, kterou popisuje vlnová optika (viz 1.3.3).

Zákon záměny směru paprsků – Pokud se paprsek ze světelného zdroje šíří prostředím do koncového bodu, optická dráha bude naprosto shodná jako při umístění zdroje do koncového bodu

Zákon odrazu – Paprsek ze světelného zdroje se na rozhraní dvou optických prostředí vždy alespoň částečně odrazí. Úhel odrazu se rovná úhlu dopadu a odražený paprsek zůstává v rovině dopadu. Množství odraženého světla závisí na druhém prostředí a na charakteru rozhraní.

Zákon lomu paprsků (Snellův zákon) – Část světla dopadajícího na optické rozhraní dvou prostředí se láme do druhého prostředí dle

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (2)$$

kde $n_{1,2}$ jsou tzv. indexy lomu elektromagnetického záření definované jako

$$n = \frac{\text{rychlost světla ve vakuu}}{\text{rychlost světla v daném prostředí}} = \sqrt{\varepsilon_r}, \quad (3)$$

kde ε_r je relativní permitivita prostředí [6].

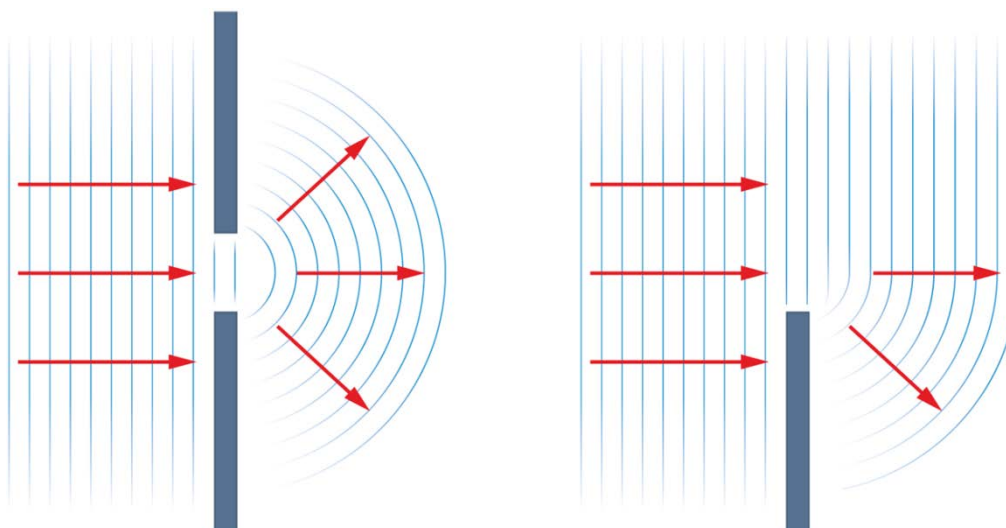
Index lomu – pro vakuum je roven jedné. Pro jiná prostředí je vždy větší než tato hodnota. Prostředí s menším indexem lomu je opticky řidší než prostředí s vyšším indexem lomu. Při přechodu z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí dochází k lomu procházejícího paprsku ke kolmici. Při přechodu z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí pozorujeme naopak lom paprsku od kolmice. Důležitým parametrem při tomto přechodu je mezní úhel dopadu paprsku. Je to maximální úhel dopadu paprsku, při kterém ještě dochází k jeho lomu. Při větším úhlu již nastává absolutní odraz paprsku. Při přechodu mezi dvěma různými optickými prostředí se nemění frekvence, nýbrž vlnová délka záření. Společně s ní se musí změnit také rychlost světla, které se šíří vždy pomaleji než ve vakuu [6].

1.3.3. Vlnová optika

Huygensův princip – Základem vlnové optiky je tvrzení, že každý bod vlnoplochy, do něhož dospělo vlnění v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch. Vlnoplochu chápeme jako množinu bodů kmitajících se stejnou fází.

Interference (skládání) – Tento jev vzniká při složení dvou světelných vlnění a potvrzuje vlnovou povahu světla (Youngův model). Za standardních podmínek je okem neviditelná, protože jednotlivá maxima a minima vzniklá vzájemným působením více záření se mění díky různé frekvenci a nestálému fázovému posunu. Pozorovat interferenci pouhým okem lze při použití koherentních vlnění. Taková světelná vlnění mají stejnou frekvenci a jejich vzájemný fázový rozdíl se v uvažovaném bodě prostoru s časem nemění [6].

Difrakce světla (ohyb) – K difrakci dochází při zastínění části světelného toku velmi malou neprůsvitnou překážkou. Ta musí mít rozměry srovnatelné s vlnovou délkou vlnění. Z Huygensova principu plyne, že bod na vrcholu překážky můžeme pokládat za samostatný zdroj záření. Interferencí s ostatními zdroji dojde k šíření světla i do tzv. geometrického stínu. Difrakce na tenké hraně a na štěrbině je znázorněna na Obr. 2.



Obr. 2 Difrakce vlnění na šěrbině a na tenké hraně [1]

Polarizace – Světlo jako elektromagnetické vlnění obsahuje složku elektrickou (\mathbf{E}) a magnetickou (\mathbf{H}). Vektory intenzity \mathbf{E} a \mathbf{H} jsou kolmé na směr šíření vlny a také vzájemně na sebe. V přirozeném světle vektor \mathbf{E} kmitá ve všech rovinách, kterým náleží vektor šíření vlnění. Pokud vektor kmitá pouze v jedné rovině, mluvíme o polarizovaném světle. Polarizované světlo lze získat odrazem, lomem či dvojlomem. Vektor \mathbf{E} v něm bude v rovině kolmé na šíření vlny opisovat obecně elipsu. Zvláštními případy eliptické polarizace je polarizace lineární a kruhová. Ve fotografii se polarizace využívá při použití tzv. polarizačních filtrů, které po natočení mění intenzitu propouštěného světla a tudíž jas. Omezuje se tak rušivý element přesvětlené oblasti (např. odlesku), zvýší se sytost a živost barev, a dosáhne se tak pro člověka věrnějšího podání barev (např. obloha).

1.4. Popis barevného světla

V lidském oku jsou dva druhy fotocitlivých buněk. Zatímco tyčinky jsou velmi citlivé na intenzitu světla a zachycují obrazovou informaci hlavně za snížených světelných podmínek, čípky jsou buňkami umožňujícími vnímat barvy (za lepšího osvětlení). Lidské oko je různě citlivé na odlišné vlnové délky viditelného světla. Při denním světle jsou čípky nejvíce citlivé na světlo zelenožluté barvy neboli na záření vlnové délky 555 nm. Za šera jsou tyčinky nejcitlivější na vlnové délky kolem hodnoty 500 nm. Pro dosažení stejného zrakového vjemu jasu od světla jiných vlnových délek je zapotřebí většího světelného toku než u této hodnoty. Směrem k okrajům viditelného spektra citlivost oka výrazně klesá [9].

V oku člověka jsou tři typy čípků senzitivní na různé části spektra. První jsou nejvíce citlivé na vlnovou délku asi 570 nm (odpovídající světlu červené barvě), druhé na 530 nm (zelená) a třetí na vlnovou délku 425 nm (modrá) [6]. Skládáním informací ze všech tří druhů čípků dostane mozek informaci o viděné barvě. Samotná vlnová délka (tón barvy) k přesnému určení zrakového vjemu nestačí a je jí nutné doplnit informaci o jasnosti a sytosti barevného světla. Jas je součtem všech energií monochromatických světél, které jsou zastoupeny ve zkoumaném světle. Pod pojmem sytost barvy se rozumí poměrné zastoupení bílé k monochromatickým světélům. Zcela sytá barva neobsahuje bílou složku a naproti tomu ne zcela sytá barva ji logicky obsahuje.

Aditivním skládáním tří základních barev (červená, zelená a modrá) a všech možných kombinací jejich intenzit je možné získat všechny existující barvy. Tohoto způsobu je využito v lidském zrakovém ústrojí. Dalším způsobem skládání barev je tzv. subtraktivní. Jedná se o skládání doplňkových barev (azurová, purpurová a žlutá), kdy se jednotlivé barvy od sebe odečítají a vytváří celé barevné spektrum. Tento princip se využívá například u tiskáren [9]. Pro exaktní popis barev a jednotlivých barevných prostorů slouží kolorimetrické diagramy. Nejrozšířenější varianta je uvedena v kapitole 1.4.1.

1.4.1. CIE XYZ

Tento kolorimetrický, aditivní, barevný model pochází z roku 1931 od komise CIE (International Commission on Illumination). Jedná se o objektivní matematický model, který vzešel ze série fyzikálních měření charakteristik světla a velkého počtu subjektivně hodnotících proškolených pozorovatelů. Vychází ze staršího modelu RGB a je s ním svázán transformační maticí. Pro popis barevného prostoru je potřeba veličin X, Y, Z [2]. Jednotlivé hodnoty jsou získány z RGB

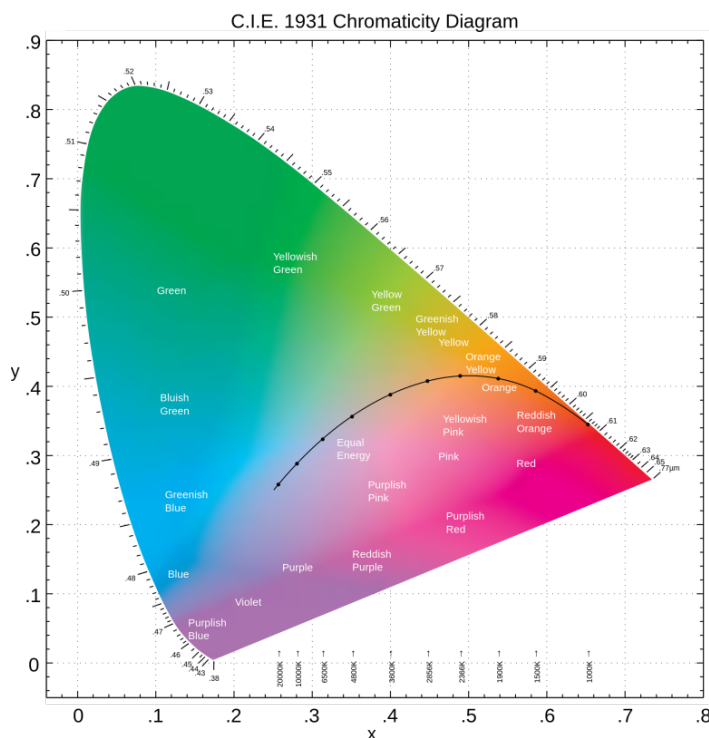
$$\begin{aligned} X &= 2,7690R + 1,7518G + 1,1300B \\ Y &= 1,0000R + 4,5907G + 0,0601B \\ Z &= 0,0000R + 0,0565G + 5,5943B . \end{aligned} \tag{4}$$

Protože je aplikačně náročné pracovat v prostoru a pro pochopení je snazší pracovat v rovině, využívá se pravoúhlé projekce. Na Obr. 3 je znázorněn samotný diagram s osami x a y [2], které jsou získány z veličin XYZ a vyjadřují chromatičnost

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \cdot \quad (5)$$

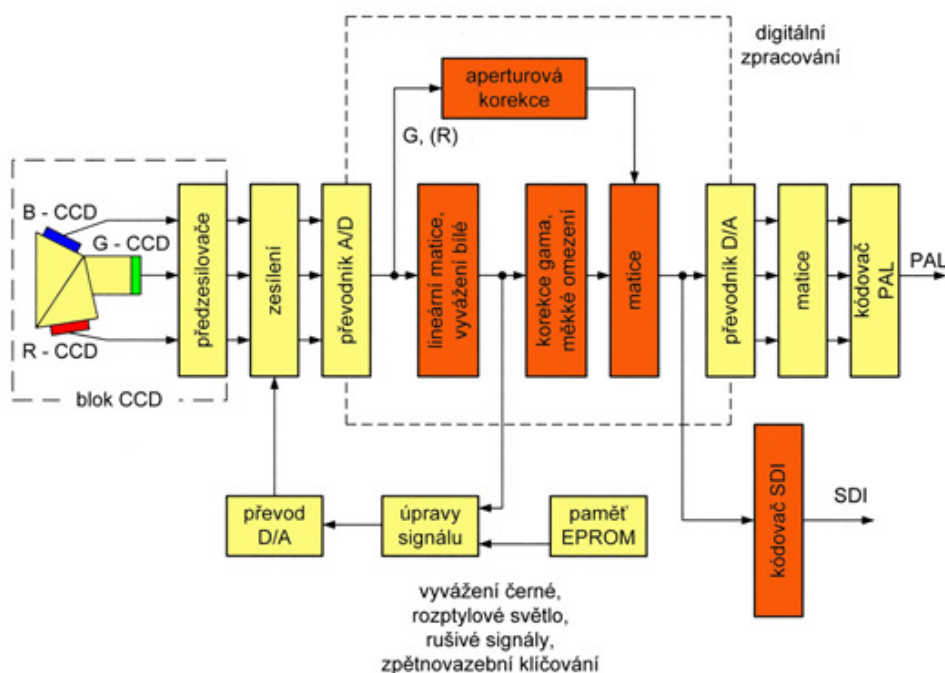
Diagram tedy obsahuje jen barvy s plným jasem a je možné v něm pracovat s tónem a sytostí. Pro práci s jasem již nestačí 2D vyjádření. Na okrajích diagramu jsou jednotlivé vlnové délky viditelného spektra (spektrální barvy) a na černé křivce je vynesena teplota barvy. Na souřadnicích x/3 a y/3 je barva bílá (dokonale nesyťá) [10]. Zajímavou vlastností diagramu je, že na spojnici libovolných dvou bodů leží všechny možné barvy vzniklé z těchto dvou původních. Trojúhelník vzniklý ze tří bodů tvoří barevný prostor vzniklý ze tří barev a nazývá se barevný gamut [5]. K nejrozšířenějším barevným prostorům patří sRGB, Adobe RGB a Pro Photo RGB. Například sRGB je standardem pro práci se softwarem Windows a pokrývá méně plochy na diagramu CIE než například Adobe RGB. Digitální snímek pořízený fotoaparát, který pracuje v prostoru Adobe RGB, se tedy na standardním monitoru sRGB nezobrazí zcela korektně (je potřeba jej transformací přepočítat do jiného prostoru).



Obr. 3 Barevný model CIE 1931 [2]

1.5. Obrazové snímače

Pro pochopení fungování digitální kamery je důležité uvést princip detekce a převodu fotonů na elektrický náboj. K vysvětlení vlastností světla jsou v této práci zahrnuty předchozí kapitoly a detailněji se optickým zákonům již nevěnuje. Schéma na Obr. 4 zobrazuje typické blokové uspořádání částí kamery s vyznačenou polohou obrazových snímačů. Mezi dvě nejrozšířenější technologie patří CMOS a CCD.



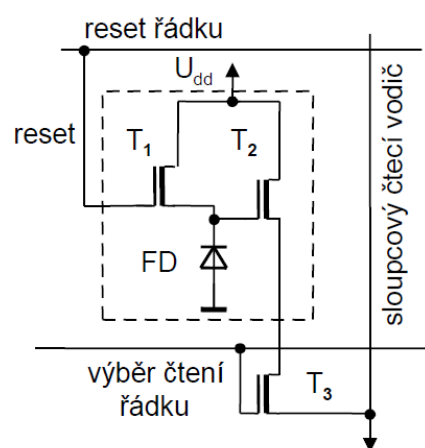
Obr. 4 Blokové schéma digitální kamery s prvky CCD [3]

1.5.1. CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)

Jedním ze dvou nejrozšířenějších typů obrazových senzorů je CMOS senzor. Tyto snímače byly poprvé použity v kamerách v roce 1998. Na počátku to byla levná alternativa k déle vyvíjeným CCD čipům. V současnosti je díky svým vlastnostem již v mnohém předčí [12].

Základem CMOS snímačů je PN přechod, kondenzátor a spínací MOS tranzistor [1]. Dříve byl používán tzv. pasivní prvek PPS (Passive Pixel Sensors), který generoval elektrický náboj odpovídající energii dopadajících fotonů, respektive v něm docházelo k vyhodnocení velikosti náboje, který je třeba k nabití fotodiody. Ta se nejdříve nabíla (reset), poté došlo k akumulaci náboje, respektive vybíjení a nakonec ke čtení, kde velikost náboje k plnému nabití odpovídala expozici. Jednotlivé prvky (elementy) jsou uspořádány do matice a v oblasti sloupcových registrů dochází k zesílení. Kvalita obrazu z pasivních prvků není dostatečná a v dnešní době se namísto nich používají APS (Active Pixel Sensors). Každý element

(pixel) obsahuje mimo fotocitlivé části také část analytickou. Zde jsou umístěny zesilovače, které individuálně mění hodnotu zesílení, a dokážou tak dobře eliminovat šum. Nevýhodou je zmenšení fotocitlivé plochy, a tedy menší citlivost na světlo. Tato vlastnost se vylepšuje zmenšováním plochy vyhodnocovací elektroniky, přidáním čoček nad každý element, které soustřeďují dopadající světlo pouze na fotocitlivou část, nebo technologií zpětného osvětlování BSI (Backside Illumination). Jeden aktivní element je zobrazen na Obr. 5. Obsahuje minimálně tři tranzistory, je rychlejší než pasivní prvek, každý element je přímo adresovatelný a obraz je díky vyšší hodnotě SNR (Signal to Noise Ratio) kvalitnější. U APS dochází ke čtení po řádcích a díky možnosti výběru jednotlivých sloupců není nutné využívat vždy celý čip, ale pouze oblast zájmu ROI (Region of Interest) [1]. K velkému rozšíření technologie CMOS došlo zejména díky podobnému postupu výroby jako u standardních procesorů a tím také nízké ceně. CMOS snímače mají také malou energetickou spotřebu, jejich chování je snadno programovatelné, mají nízké napájecí napětí a je možné integrovat bloky pro zpracování obrazu přímo na čip. Nedochází u nich ani k tzv. bloomingu – rozlévání náboje, jako u CCD snímačů. Mezi nevýhody patří vyšší šumové vlastnosti, menší světelná citlivost či vlastnosti plynoucí z nejvíce používané elektrické závěrky typu rolling shutter. Obraz je vyčítán „snímacím okénkem“ po řádcích, a obraz tedy není exponován ve stejnou chvíli. Může tak docházet k artefaktům „kácení“ pohybujících se předmětů či k odlišné expozici řádků při umělém osvětlení [11].

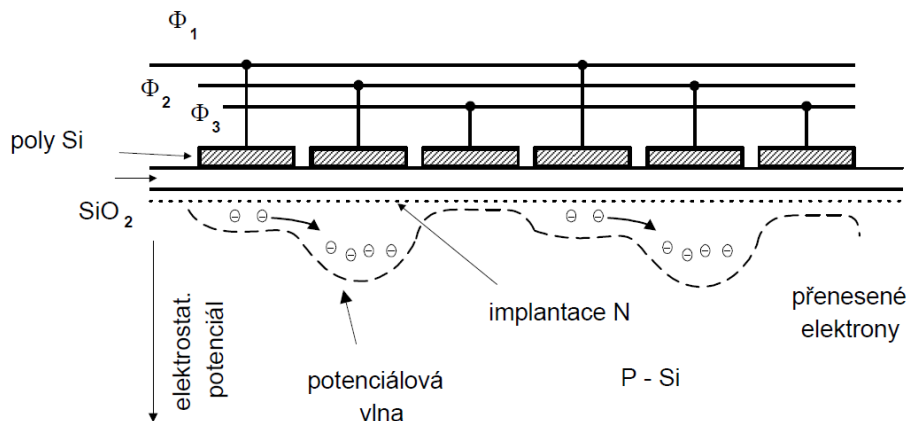


Obr. 5 Aktivní element CMOS [4]

1.5.2. CCD (Charge coupled device)

Druhým typem obrazových snímačů jsou CCD senzory, které byly vytvořeny na konci 60. let minulého století v Bellových laboratořích. Jejich vynálezci Willard Boyle a George E. Smith byli v roce 2009 oceněni Nobelovou cenou za fyziku. První kamera s implementovanými CCD snímači v Bayerově matici a obrazovou kvalitou dostatečnou pro televizní vysílání byla představena v roce 1975 [12].

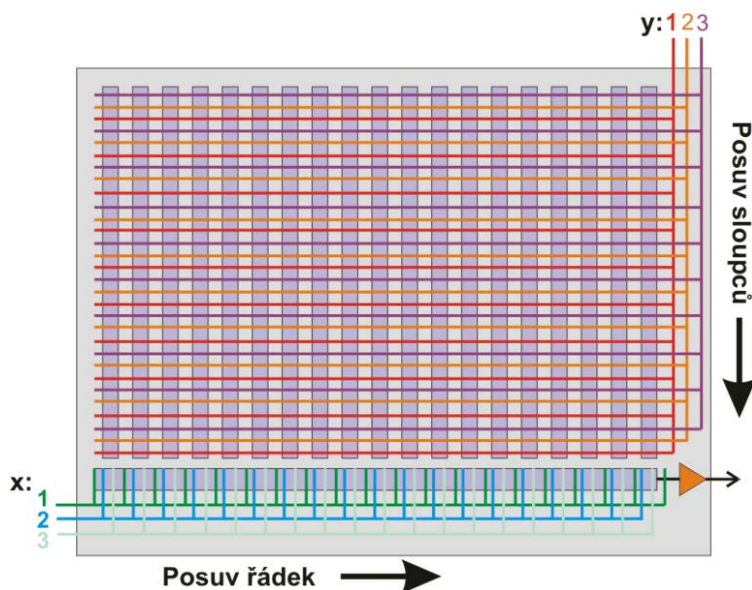
CCD, tedy snímač s vázaným nábojem, je posuvný registr, který je vystaven světlu a funguje na principu fotoefektu. Struktura základního CCD snímače, jehož jádro tvoří MOS kapacitor, je uvedena na Obr. 6.



Obr. 6 Princip přesunu náboje CCD [4]

Základním prvkem je polovodič - destička z čistého křemíku, která je na své dolní straně izolována. Na horní straně je pokryta vrstvou svého oxidu, který má vlastnosti izolantu, na niž jsou přivedeny plošné elektrody. Křemík, v němž se nevyskytují žádné volné nosiče náboje, je umístěn do elektrického pole. Pokud na křemík dopadne foton, pozorujeme fotoelektrický jev. Foton vyrazí z valenční vrstvy atomu křemíku elektron a vznikne pár elektron-díra. Pod aktivní elektrodou se shromáždí náboj, protože každý z párů je uvězněn v polovodiči díky izolační vrstvě oxidu. Díry, které se z elektrického hlediska chovají jako kladný náboj, jsou přitahovány k dolní uzemněné části destičky. Pomocí elektrického napětí lze elektrony posouvat k jednotlivým, kladně nabitým elektrodám. Iterací tohoto cyklu se náboj z každé elektrody dostane až na okraj křemíkové destičky, kde je tento malý proud zesílen a dál přenášen pomocí přiloženého vodiče. Proudový impuls odpovídá jasů, který je získán z několika sousedních elektrod – pixelů. Protože přepínání jednotlivých elektrod je řízené, lze získat informaci o tom, kde se každý z pixelů v matici nachází [12] [11].

CCD prvky dělíme do dvou kategorií – lineární a plošné. Lineární CCD snímače je vhodné používat v případech, kdy je předmětem zájmu např. jednorozměrný obraz (např. čtení čárových kódů, kde je každý řádek obrazu totožný). Plošné CCD snímače v uspořádání do matic jsou přítomny ve velkých zařízeních, jako jsou kamery, digitální fotoaparáty apod. Jedná se o soustavu lineárních CCD snímačů, které na koncích řad vstupují do dalšího lineárního CCD namísto do zesilovače [1]. Snímání obrazu je nejprve realizováno několikafázovým posuvem v y, vysune se tedy první pixel ze všech svislých CCD do spodního vodorovného (Obr. 7). Z toho se poté opakovaným fázovým posunem v x celý řádek vysune k obrazovému zesilovači. Celý proces se obdobně opakuje pro druhý a další sloupce, dokud nejsou vyprázdněny všechny. Tento princip se nazývá Full Frame Transfer. Rychlejšího vyčítání se docílí rozdělením senzoru na více částí a jejich nezávislým vyčítáním. Dalším typem je Frame Transfer, kdy se náboje všech pixelů překlopí do zastíněné paměťové části čipu a poté vyčítají [11].

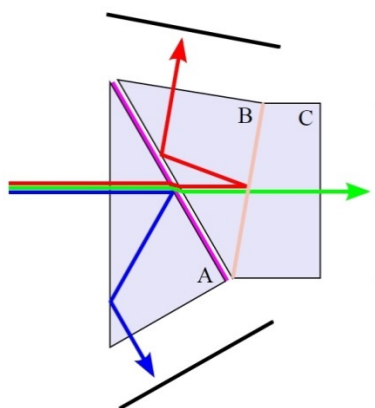


Obr. 7 Schéma vyčítání Full Frame Transfer [4]

Mezi vlastnosti CCD snímače patří vysoká kvalita obrazu s menšími hodnotami šumu než u CMOS. Mají vysoký dynamický rozsah, ale jsou také dražší než CMOS. Další negativní vlastností oproti CMOS je vyšší spotřeba energie a riziko vzniku bloomingu [11]. O obrazových snímačích detailně pojednává publikace [1].

1.5.3. Snímání barevného světla obrazovými senzory

V rámci předchozích dvou kapitol je vysvětlen základní princip činnosti obrazových sensorů. Uvedené principy nezohledňují zpracování chromatického signálu, ale pouze monochromatického (resp. černobílého), protože senzory jsou schopné zaznamenat pouze intenzitu a nikoliv barvu světla.

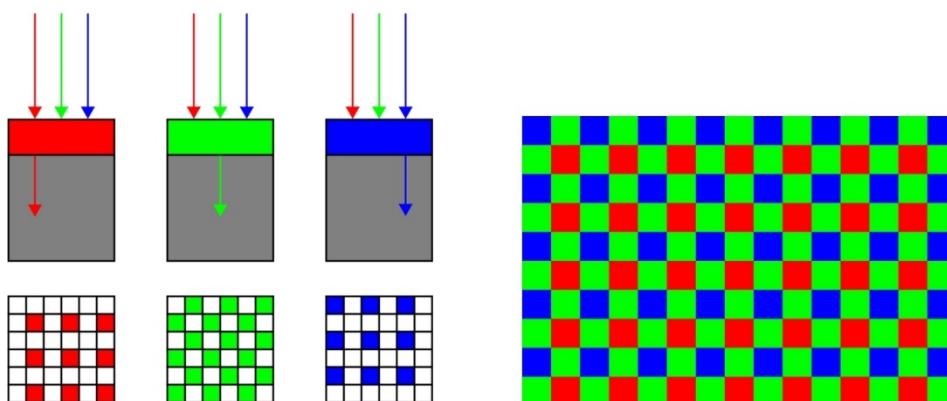


Obr. 8 Barvo-dělicí hranol se třemi senzory; upraveno [5]

První možností zpracování barevného signálu je rozdělení dopadajícího světla na tři základní barevné činitele. Dopadající světlo se láme v barvo-dělicím hranolu (viz Obr. 8) a jednotlivé barevné složky vystupují z hranolu v různých rovinách. Každý svazek paprsků (s danou vlnovou délkou) dále dopadá na samostatný senzor. Jedná se tedy o soustavu tří čipů. Výsledný barevný obraz vznikne součtem těchto RGB signálů. Obrazová kvalita z tří-čipové soustavy je samozřejmě vyšší než z jednočipové. Výsledný obraz má vyšší rozlišení a výrazně nižší šum [11]. Cena je ve srovnání se standardní jednočipovou kamerou přirozeně vyšší, protože musí obsahovat barvo-dělicí hranol a o dva čipy víc. Podle použitých typů senzoru se kamery většinou označují 3CCD respektive 3MOS. Existují také technická řešení, kdy se světlo v hranolu rozdělí na dva paprsky. První monochromatický dopadne na vlastní senzor a zbylé chromatické světlo s užším spektrem je zpracováno senzorem, nad kterým je umístěn modifikovaný Bayerův filtr. Dvou-čipové řešení se ale prakticky nevyužívá.

Bayerův filtr je v současné době nejpoužívanější technikou jak zaznamenat barevný obraz. Jedná se o filtr s pravidelnou maticovou strukturou, kde se pravidelně střídají filtry propouštějící pouze červené, zelené a modré světlo. Jeden element matice filtru je umístěn vždy nad jedním obrazovým elementem – pixelem. Z důvodu nejvyšší citlivosti lidského oka na zelenou barvu, je v čipu dvojnásobný počet

elementů, které propouštějí zelené světlo. Výsledný barevný obraz vznikne pomocí tzv. interpolace, kdy se chybějící barevná informace dopočítá z nejbližších sousedních pixelů, které daný barevný kanál obsahují. Nejčastěji se využívá interpolace bilineární. Protože jsou mezi aktivními elementy senzoru nezanedbatelné mezery, dochází k podstatnému snížení intenzity dopadajícího světla. Proto se nad jednotlivé pixely umísťují tzv. mikročočky, které díky svým optickým vlastnostem soustředí dopadající světlo na aktivní plochu pixelu [11]. Struktura Bayerovy masky ovlivňuje také různé vlastnosti obrazu, mezi které patří například šum obrazu nebo moiré [1]. V současnosti se používá několik vylepšených typů Bayerova filtru.



Obr. 9 Elementární znázornění Bayerova filtru; upraveno [6]

1.5.4. Velikosti obrazových senzorů

Obrazové senzory mohou mít různou velikost. Největší (a zároveň velmi rozšířený) senzor se odvíjí od 35mm filmového negativu. Rozměry jednoho negativu jsou 36 x 24 mm. V kamerách se senzor o této velikosti nazývá Full Frame. Ostatní velikosti jsou obvykle označovány rozměrem v palcích. Nejčastější jsou 1,5 ", 4/3 ", 2/3 ", 1/2 " a 1/3 ". Z historického hlediska však tyto hodnoty nepředstavují přímo diagonální rozměr senzoru, ale průměr, který by měla vidiconová elektronka s tímto efektivním rozměrem diagonály [11]. Lze se také setkat s výrazem Crop Factor, který vyjadřuje diagonální rozměr vzhledem k Full Frame senzoru. Důležitý je také poměr stran senzoru, který rozhoduje o formátu obrazu. Klasický 35mm film má poměr 3:2, senzory ve starších videokamerách 4:3 a současné HD kamery 16:9. Větší senzory mají většinou také větší obrazové elementy. Díky tomu mají větší dynamický rozsah a menší šum než senzory s menší plochou fotocitlivého elementu [1]. Logicky při určité hodnotě šumu pozadí dopadá na větší element více světla, a má tak většinou vyšší SNR. Nezanedbatelný vliv na tento parametr má však také samotná kvalita použité elektroniky a efektivita přenosu náboje z foto-elementu.

2. Popis video signálu

V této kapitole budou detailněji popsány nejdůležitější typy obrazových signálů. Důraz bude kladen hlavně na digitální sféru, ale pro lepší pochopení budou uvedeny i důležité příklady ze sféry analogové. V současnosti se analogový signál stále využívá k měření řady parametrů i v rámci České televize (ČT). Konkrétněji o této problematice pojednává kapitola 5.

2.1. Analogové signály

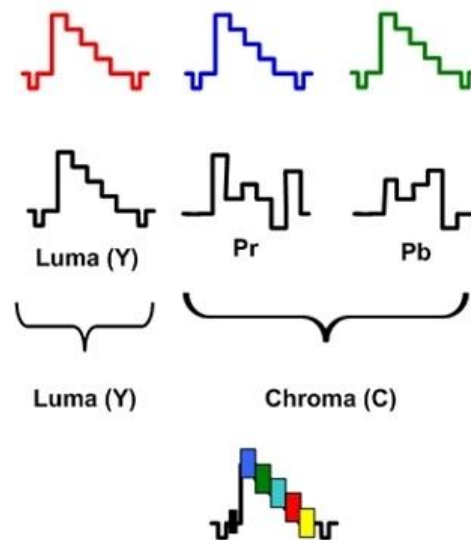
Barevné videokamery snímanou scénu reprodukují pomocí obrazového snímače, který generuje tři monochromatické složky RGB na samostatné elektrické signály s plnou šířkou pásma. K těmto signálům je přidána synchronizační informace, která je přenášena v rámci některého barevného kanálu (většinou G) nebo samostatně. Taková soustava signálů se nazývá složková (komponentní). Přenášet však tyto tři signály není výhodné kvůli vlastnostem lidského vidění. Oko je více citlivé na jas než na barvy (viz kap. 1.4) a z této skutečnosti vychází výhodnější vyjádření snímané scény. Transformací se signály RGB převedou na jasový signál Y a dále na dva rozdílové signály B-Y a R-Y. Jasový signál je získán pomocí definované transformační rovnice [5] jako

$$\text{ITU Rec. 601} \quad Y = 0.59G + 0.30R + 0,11 B \quad (6)$$

$$\text{ITU Rec. 709} \quad Y = 0.72G + 0.21R + 0,07 B. \quad (7)$$

Rozdílové signály mají z výše uvedeného důvodu většinou omezené pásmo. Oproti jasovému signálu je to standardně polovina šířky pásma nebo i méně. Pokud se jasový i barvonosné signály zakódují do jediného signálového toku, potom mluvíme o kompozitním videosignálu. Ten ze své podstaty nemá některé negativní vlastnosti, které komponentní signál má. Mezi ty nejvýznamnější patří nutnost stejných hodnot zisku, DC offsetu či časového zpoždění pro všechny tři přenosové signálové vodiče. Ty musely mít stejnou délku, jinak docházelo k rozmazávání výsledného obrazu vlivem časové difference na straně přijímače. Výsledkem snahy kompenzovat tyto vlastnosti bylo vložení kodéru a dekodéru do signálové cesty a využití koaxiálních kabelů. Do signálu se v kodéru přidají další informace, zejména synchronizační pulsy a zatemnění. Komponentní analogový videosignál je při splnění výše uvedených vlastností logicky kvalitnější než kompozitní. V profesionální studiové obrazové technice se před nástupem digitálních systémů využíval výhradně komponentní analogový videosignál (k propojení většiny zařízení), který se označuje

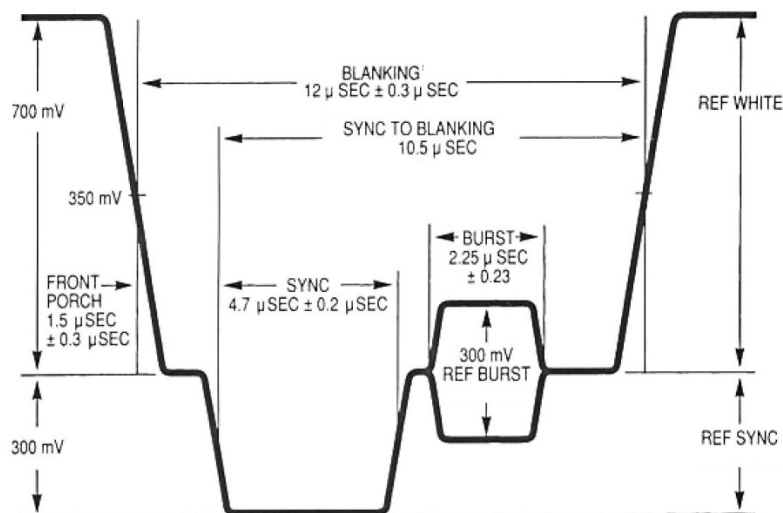
zkratkou YPbPr. Často v literatuře dochází k záměně za zkratky YUV či YCbCr. První zkratka označuje kompozitní signál, který vznikl ze signálové reprezentace YPbPr, a druhá je jejím digitálním vyjádřením. Kompozitní signál je důležitý z hlediska přenosu signálu a jeho celoplošné distribuce. Z něho vycházejí tři nejrozšířenější standardy pro analogovou televizi NTSC, PAL a SECAM. Vychází z něho i v současnosti nejrozšířenější profesionální digitální rozhraní SDI [13].



Obr. 10 Komponentní signál (nahore) a kompozitní signál (dole) [7]

Analogový videosignál se skládá z nízkonapěťového signálu, ve kterém jsou obsaženy časové pulsy, které zaručí správnou synchronizaci všech zařízení s daným signálem. Signál se skládá z jasně definovaných a standardizovaných částí s danými úrovněmi a načasováním. Jeden televizní řádek se skládá z horizontálního synchronizačního pulzu, zatemnění a aktivního obrazového signálu. Horizontální synchronizace (Black Burst) je na začátku každého řádku. Za ním následuje zatemňovací perioda, která slouží k nastavení referenční úrovně a odstranění stejnosměrné složky. Pro kompozitní barevný signál je tato perioda kratší, než je tomu u černobílého signálu, protože zbylý časový interval zaplňuje synchronizace barvonosného signálu (Color Burst) [5]. Jedná se o vysokofrekvenční signál, který poskytuje fázovou a amplitudovou referenci pro dekodér, a zajišťuje tak správnou detekci barevného signálu. Barevný signál se od monochromatického liší již zmíněnou barevnou synchronizací a dále logicky samotnou informací o barvě daného elementu, která je určena fází a amplitudou dané části signálu [15]. Analogový signál jednoho řádku je zobrazen na Obr. 11.

Napěťová úroveň horizontální synchronizace je 0 V a její perioda je různá pro PAL a NTSC. Má hodnotu 4,7 μs , respektive 4,85 μs . Napěťová úroveň je nižší než jakákoliv jiná úroveň signálu. Pokud dojde ke špatnému vyhodnocení synchronizačního pulsu, může se na obrazovce projevit horizontálním posunem obrazu. V rámci horizontálního zatemnění je kromě horizontální synchronizace přítomen tzv. Front Porch a Back Porch. Jsou to periody signálu s hodnotou napětí 300 mV, která odpovídá černé. Ve videesignálu reprezentují čas, kdy se elektronový svazek na CRT (Cathode Ray Tube) monitoru vrátí na začátek dalšího řádku. Od vzniku barevné televize je v oblasti zatemnění umístěna také synchronizace barvonosné složky o frekvenci 4,43 MHz pro PAL a 3,58 MHz pro NTSC. Jasové úrovně kompozitního signálu se pohybují od 0 V do 0,7 V nad úrovní černé. Barevná informace je vyjádřena barevným tónem a sytostí. Té v signálovém vyjádření odpovídá fáze respektive amplituda barvonosné složky. Délka jednoho řádku se mezi standardy opět nepatrně liší. Pro PAL je délka řádku 64 μs a pro NTSC 63,5 μs [15].



Obr. 11 Struktura televizního řádku NTSC [7]

Další důležitou součástí videesignálu je vertikální zatemnění, jehož hlavní částí je vertikální synchronizace. Tato série pulzů je v signálu obsažena mezi každými dvěma obrazovými poli a představuje dobu, za kterou se elektronový paprsek dostane z konce obrazovky na její začátek, kde dojde k vykreslování dalšího obrazového pole. Vertikální synchronizace se skládá z pěti pulzů dlouhých 2 μs (0,3 V), mezi kterými je úroveň 0 V po dobu 30 μs , a jedenácti přesně opačných pulzů. Jejich uspořádání rozhoduje o tom, zda se jedná o lichý či sudý pulsnímeček.

V rámci vertikálního zatemnění se postupem času začaly přenášet i dodatečné informace.

Existují dva typy vykreslování snímků na obrazovce – progresivní a prokládané. Progresivní vykresluje celé snímky najednou. Vždy tedy dojde k sekvenčnímu vykreslení všech řádků v rámci jednoho snímku za sebou. Tento způsob se používá zejména u počítačových monitorů, projektorů a také u nových televizorů. Oproti prokládanému řádkování vykazuje lepší obrazovou kvalitu bez vad vzniklých prokládáním za cenu větší šířky pásma. Progresivní řádkování se značí písmenem *p* za číslem označujícím horizontální rozlišení (např. 480p, 720p či 1080p) a je vhodné pro panely LCD (Liquid Crystal Display), TFT (Thin Film Transistor) či Plasma displeje. Obecně se soudí, že tento způsob v blízké budoucnosti vytlačí prokládané řádkování, které v dnešní době již nemá žádný logický význam, protože CRT obrazovky se již vyskytují jen velmi omezeně a ušetření šířky pásma již není velké.

Druhým typem vykreslování je prokládané řádkování, ve kterém je každý obraz rozložen na dvě pole. Každé z nich obsahuje polovinu řádků – všechny liché a všechny sudé. Interval mezi jednotlivými poli je roven polovině snímkové periody. Pole obsahující první řádek a také všechny liché se nazývá *horní pulsínek* (Top Field) a pole se sudými pak *dolní pulsínek* (Bottom Field). Dva sousední řádky jsou tedy vykresleny vždy o půl snímkové periody později. Pokud je ve scéně přítomen rychle se pohybující předmět, mohou se v obraze objevit „křivé“ vertikální linie. Rozmazání obrazu kvůli různému momentu expozice je dobře viditelné při zpomaleném reprodukováném obraze. Hlavním důvodem vzniku prokládaného řádkování byla úspora šířky pásma, nutná k přenosu videosignálu. V době digitálního vysílání je zjištěno, že úspora datového přenosu prokládaným řádkováním je zanedbatelná. Prokládané řádkování se značí písmenem *i* za číslem označující horizontální rozlišení (např. 576i či 1080i) [5].

V současné době velmi často dochází k přepočtům mezi těmito dvěma formáty (v digitální sféře). Převod z prokládaného řádkování do progresivního se nazývá „de-interlacing“. Moderní obrazové panely využívají progresivní zobrazování, a tak je tento převod velmi využíván. Nejjednodušším mechanismem je spojení obou pulsímků do jednoho snímku, kde se ale objevují artefakty vzniklé prokládáním (rozmazání, nespojitost), a proto se používají výhradně složitější způsoby dopočítávání chybějící obrazové informace.

2.1.1. NTSC (National Television System Committee)

V roce 1941 vznikl standard pro tvorbu a šíření černobílého televizního vysílání, který se využíval v Severní Americe, Japonsku a Kanadě. V padesátých letech byl přidán standard pro barevnou televizi. NTSC využívá principu prokládaného řádkování, 525 řádků, poměru stran 4:3 a snímkové frekvence 59,94 Hz. NTSC kompozitní signál má šířku pásma 6 MHz. Video signál je amplitudově modulován a doplněn zvukem, který je modulován frekvenčně. Barvosná frekvence je vzdálena o 3,58 MHz nad jasovou a může způsobovat rušivé struktury v obraze kvůli špatné detekci fáze [3].

2.1.2. PAL (Phase Alternating Line)

Televizní standard z roku 1963 byl využíván ve většině evropských zemí, Číně, Austrálii či Jižní Americe. Vychází ze standardu NTSC. Při přenosu využívá také kvadraturní amplitudovou modulaci, ale odstraňuje chyby v barevném podání. Signál PAL obsahuje 625 prokládaných řádků, poměr stran 4:3 a snímkovou frekvenci 50 Hz. Šířku pásma má 8 MHz s barvosnou složkou posunutou o 4,43 MHz nad jasovou. Kompenzace fázového zkreslení je založena na principu přepínání fáze barvosných frekvencí ve dvou po sobě jdoucích řádcích. Po jejich sečtení dojde k odstranění fázové odchylky vzniklé působením přenosového kanálu [3]. Systém PAL byl používán i v Československé televizi. Studiové komplexy a veškerá obrazová technika pracovali se systémem PAL. Samotné vysílání bylo realizováno ve standardu SECAM kvůli příslušnosti k Sovětskému svazu, který tento standard také využíval.

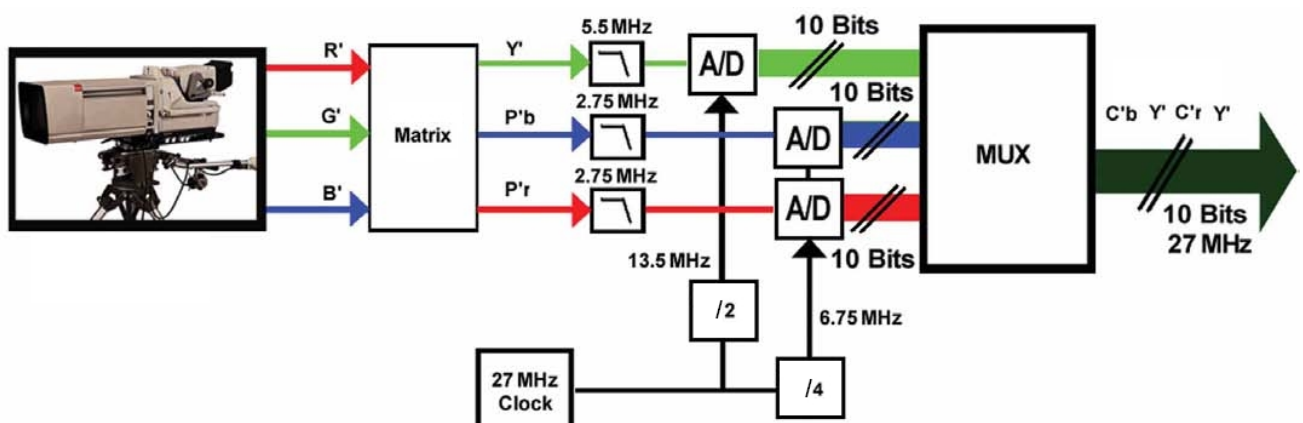
Standard	NTSC	PAL
Šířka pásma videosignálu	4,2 MHz	5,0 MHz
Nosná frekvence zvuku	4,5 MHz	5,5 MHz
Celková šířka pásma	6 MHz	7-8 MHz
Snímková (vertikální) frekvence	60 Hz	50 Hz
Horizontální frekvence	15,734 kHz	15,625 kHz
Sub-nosná frekvence barvy	3,58 MHz	4,43 MHz
Počet řádků	525	625

Tab. 1 Parametry systému NTSC a PAL [12]

2.2. Digitální signály

V současné době se v televizní a celé komunikační a multimediální technice využívají výhradně digitální technologie. K digitalizaci signálu je zapotřebí dvou základních postupů.

Tím prvním je vzorkování analogového spojitého signálu. Bylo zjištěno, že k obnově původního signálu je zapotřebí, aby frekvence vzorkovacího kmitočtu byla alespoň rovna dvojnásobku nejvyššího kmitočtu, který je obsažen ve výchozím spojitém signálu. Tento teorém se nazývá Nyquist-Shannonův. Dalším postupem je vzorkování signálu v napěťových úrovních, tzv. kvantování. Tímto procesem je všem vzorkům signálu přidělena jejich hodnota napětí v binárním vyjádření. Pro digitalizaci obrazového signálu se využívá 8bitová (256 možných úrovní) a 10bitová kvantizace (1024 úrovní). V dnešní době existují systémy využívající dokonce 24bitovou kvantizaci a vyšší [14]. Všechny standardy pro přenos video signálu, jako SDI a HDMI, jsou synchronní. Digitální signály jsou ze své podstaty binární – skládají se ze dvou napěťových úrovní a rychlých přechodů mezi nimi. Čas mezi sousedními přechody se nazývá základní perioda. Digitální signál je oproti analogovému výrazně robustnější. Může nabývat pouze dvou hodnot, a je tedy jednodušší detekovat danou úroveň než v případě spojitého signálu. K degradaci signálu může docházet vlivem kapacity kabelu, impedančního nepřizpůsobení či šumovým působením. Důležitou otázkou je, jaký signál digitalizovat. První možností je vzorkovat kompozitní signál, ve kterém jsou obsaženy barevně složky, nebo vzorkovat komponentní signál, tzn. jednotlivé složky zvlášť. Protože barevné složky nesou méně informací než jasová složka, je možné je vzorkovat nižší frekvencí a také z hlediska kvalitativního je výhodnější digitalizovat komponentní analogový signál. Postup digitalizace je znázorněn na Obr. 12.



Obr. 12 Postup digitalizace signálu [8]

Z analogové kamery vystupují tři složkové signály RGB. Maticovým přepočtem se získají složky Y (jasu), Pb a Pr (chrominanční), které se přenášejí s šířkou pásma 5,5 MHz, respektive 2,75 MHz pro rozdílové signály. Tyto pásmově omezené signály vstupují do A/D převodníku, kde dojde k samotné digitalizace. Vzorkovací frekvence 13,5 MHz, respektive 6,75 MHz splňuje vzorkovací pravidlo a získané vzorky jsou 10bitově kvantovány. V multiplexoru jsou tyto signály spojeny do datového toku a dále mohou být kódovány [14]. Existují také paralelní digitální rozhraní, v televizní technice je ale nejpodstatnější rozhraní SDI (Serial Digital Interface). Mezi další standardy schopné přenášet nekomprimovaný videosignál patří HDMI, DVI a DisplayPort. Komprimovaným videosignálem se tato práce nezabývá.

2.2.1. SDI (Serial Digital Interface)

Rozhraní pro přenos digitálního videa z roku 1989, standardizováno skupinou SMPTE (The Society of Motion Picture and Television Engineers). V současnosti nejpoužívanější rozhraní v profesionální studiové televizní technice vzniklo z potřeby přenášet data po jediném koaxiálním kabelu na velké vzdálenosti. Samotný signál musí být upraven, aby byla zajištěna správná detekce dat. Mezi podmínky patří minimalizace nízkofrekvenčních složek, co nejmenší hodnota stejnosměrné složky signálu a vhodný tvar náběžných a sestupných hran. Těchto úprav je v SDI dosaženo pomocí scrambleru a využití NRZI (Non Return to Zero Inverted) kódování. Rozhraní SD SDI je definováno normou SMPTE 259M a ITU-R BT.656 jak pro komponentní, tak pro kompozitní video s vloženým zvukem. V současnosti existuje již několik generací SDI [16].



Obr. 13 Konektor BNC (vlevo) a Musa (vpravo) [9]

SD SDI (SMPTE 259M) – První generace SDI pro signály 480i (NTSC) a 576i (PAL), neboli pro signály SD (Standard Definition). Pro přenos je využíván koaxiální kabel s impedancí 75 Ω, který byl používán i pro analogové signály. Možnost využívat stávající kabeláž byla výraznou výhodou SDI rozhraní. Koaxiální kabel je nejčastěji zakončen konektorem BNC (Bayonet Neill–Concelman) nebo MUSA (Multiple Unit Steerable Antenna). První jmenovaný je používán pro připojení k většině zařízení a obvykle je opatřen aretačním kroužkem, který brání jednoduchému odpojení. Konektor MUSA vznikl pro manuální přepojování signálových linek. V současnosti se využívá například k propojování v rámci obrazových matic. Úroveň přenášeného signálu je v rozmezí 0-0,8 V.

Sériový digitální datový tok se získá z paralelního komponentního toku následujícím způsobem. Paralelní data reprezentující vzorky analogového signálu vstupují do posuvného registru. Z něho vystupují 10bitová datová slova s nejvýznamnějším bitem MSB (Most Significant Bit) na poslední pozici a s nejméně významným bitem LSB (Least Significant Bit) na první pozici. Kromě obrazových dat jsou přenášena i jiná data (Ancillary data) [16]. Ta se přenášejí v částech signálu bez obrazové informace (H/V zatemnění) a mohou obsahovat například zvukovou složku (v první generaci jsou podporovány čtyři zvukové kanály), timecode či jiná uživatelská data. Timecode je časovou značkou v signálu, která je začleněna do oblasti vertikálního zatemnění a dává časovou informaci s přesností na daný snímek. Jeho formát je HH:MM:SS:FF (FF = frame = snímek) a v televizní technice je naprosto nezbytnou součástí jakékoliv práce s audiem a videem.

Timing Reference Signal	Line ID	Aux Data Flag	Data ID	Data Block No.	Data Count	User Data 255 words maximum	Check Sum
-------------------------	---------	---------------	---------	----------------	------------	--------------------------------	-----------

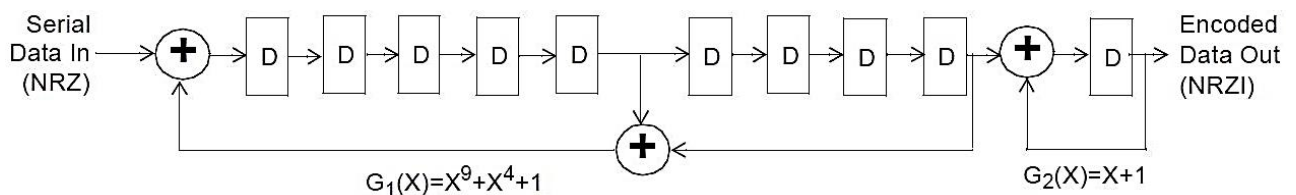
Obr. 14 Struktura Ancillary dat SDI [10]

Struktura datového toku musí přesně splňovat předepsanou posloupnost 10bitových slov. Nejdříve se přenášejí tři slova TRS (Timing Reference Signal), která mohou být dvojího typu. V tomto případě jde o SAV (Start of Active Video) s definovanou hodnotou v hexadecimálním vyjádření rovnou 3FF, 000 a 000 (platí pro 8bitovou kvantizaci, pro 10bitovou jsou to čtyři slova). Poté následují slova reprezentující obrazové komponenty pro daný řádek. Pravidelně se střídají hodnoty pro jasové a rozdílové signály. Jasových je dvojnásobný počet oproti dané rozdílové

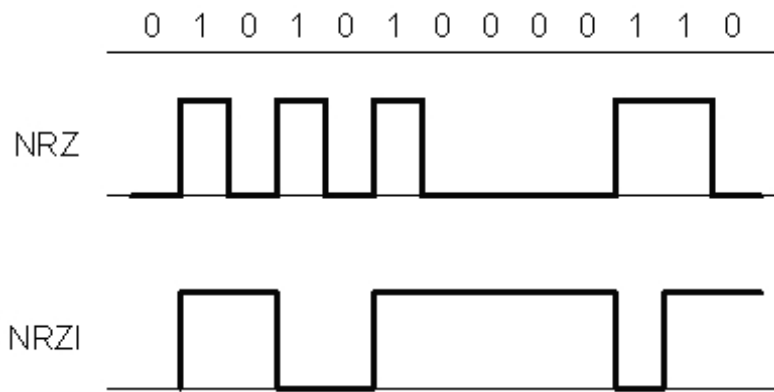
složce. Tato posloupnost je dlouhá v závislosti na horizontálním rozlišení videa a na jejím konci je druhý typ TRS slova – EAV (End of Active Video) o stejné hodnotě jako SAV. V tomto okamžiku nastává horizontální zatemnění, kde se přenášejí zmíněná Ancillary data. Uvozují se třemi slovy ADF (Ancillary Data Flag), jedním slovem DID (Data Identifier) určujícím charakter dat (například audio ve standardu AES/EBU), jednoslovným DBN (Data Block Number) udávajícím pořadí daného bloku dat a posledním slovem DC (Data Count) nesoucím informaci o počtu následujících uživatelských slov UDW (User Data Words). Těch může být až 255. Poté opět následují slova SAV [16]. Jasová složka signálu může nabývat 220 kvantizačních úrovní, rozdílová složka 224 a kompozitní 147 úrovní. Hodnota datových slov TRS, tedy dlouhá sekvence logických nul, se nesmí objevit v žádné jiné části signálu. Sériová data s uvedenou strukturou jsou poté scamblována (znáhodněna) kaskádním řazením funkcí [16] ve tvaru

$$G_1(X) = X^9 + X^4 + 1 \quad \text{a} \quad G_2(X) = X + 1. \quad (8)$$

Tento proces je ve standardu SDI zahrnut, protože zvyšuje robustnost celého kanálu tím, že rozkládá dlouhé sekvence logických jedniček a hlavně nul na výhodnější sekvenci. Výsledkem je signál s vyšším počtem přechodů mezi logickými úrovněmi, z kterého je možné lépe vyčíst hodinový takt potřebný k synchronizaci. Posledním členem vysílací části SDI je kódér NRZI (Non Return to Zero Inverted). Jde o kódování vycházející z předpokladu, že vyšší úroveň signálu odpovídá logické 1 a nižší potom logické 0. V přenosových systémech je však výhodné, když na přijímací straně není nutné udržet určenou polaritu signálu. Proto v NRZI kódu odpovídá logické 1 změna přechodu mezi úrovněmi a logické 0 poté nezměněná úroveň. Při dlouhé sérii 0 se nevytvářejí v signálu přechody a je složité signál synchronizovat [16].



Obr. 15 Schéma scrambler kódování [10]



Obr. 16 Kodéry Non Return to Zero (nahoře) a Non Return to Zero Inverted (dole); upraveno [11]

V přijímači dojde pomocí inverzního algoritmu k obnově původního signálu následujícím způsobem. Napětím řízený oscilátor (VCO) společně s fázovým detektorem extrahuje informaci o časování signálu. Ten je dále synchronizován s daným zařízením, pomocí inverzních polynomů de-scramblován a přiveden na vstup posuvného registru, který na výstupu produkuje 10bitová paralelní slova. Informace o začátku slova je získána z TRS signálu tak, že výstupy posuvného registru jsou srovnávány se známou strukturou TRS a v případě shody vytvoří synchronizační pulz pro samotný registr. Komunikace je ze své podstaty jednosměrná. Přenosové rychlosti rozhraní se liší v závislosti na přenášeném obsahu, ale maximální přenosová rychlost 1. generace je 270 Mbit/s na maximální vzdálenost 300 m. Pro delší vzdálenosti je nutné do datové cesty vložit opakovač SDI signálu. Mezi vlastnosti, které jsou shodné pro všechny verze SDI, patří amplituda signálu, DC offset, impedance, RL (Return Loss) a charakter náběžných/sestupných hran [16].

HD SDI (SMPTE 292M) – Sériové digitální rozhraní z roku 1998 vycházející z SD SDI, vytvořené pro potřeby přenášet signály HD (High Definition) definované v normě EBU Tech. 3299. Oproti předchozí normě je obrazový datový tok na počátku rozdělen na dva samostatné paralelní toky. První obsahuje složku Y a druhý poté obě rozdílové složky. Ty jsou poté převedeny do sériového toku ve formě 10bitových slov. Struktura datových slov se liší po synchronizačních slovech EAV. Zde následuje 20 bitů, které určují pořadí řádku v daném snímku a 20 bitů CRC (Cyclic Redundancy Check). Zmíněné prvky byly přidány z důvodů zvýšení robustnosti kanálu. Kód CRC je schopen detekovat chyby v rámci aktivního řádku a skládá se ze dvou slov, která vycházejí z pevně zvoleného polynomu [20]

$$CRC(X) = X^{18} + X^5 + X^4 + 1. \quad (9)$$

CRC je kód, který se využívá pro detekci chyb v komunikaci v rámci digitálních systémů. Jde o techniku, která chybu detekuje, ale většinou neopravuje. Kromě použití v rámci přenášení dat, se CRC používá i v rámci datových úložných disků. Cyklický redundantní součet je přenášen společně s daty. Na straně přijímače je porovnána hodnota přijatého CRC a nezávisle spočítaného CRC. Pokud jsou hodnoty shodné, přenos proběhl pravděpodobně bez chyb. Postup výpočtu CRC začíná převedením vstupní posloupnosti bitů na polynom n-tého stupně. Poté je použit tzv. generující polynom, který znají obě strany komunikačního kanálu. Následuje dělení těchto polynomů, kdy generující polynom je dělitelem vstupního polynomu. Výsledná hodnota podílu je samotný CRC. Metoda CRC je velmi používána pro svou jednoduchost a dobré výsledky při rozeznávání chyb způsobených rušením. Výhodou je, že i chyba jednoho bitu ve vstupní posloupnosti bitů může hodnotu CRC výrazně změnit [20]. Výpočet CRC začíná na prvním prvku aktivního řádku. První vypočtené CRC slovo je vztaženo k jasovému signálu a druhé logicky k rozdílovému. Jako kanálové kódování je opět zvolen kód NRZI s identickými polynomy pro scrambling jako u SD SDI. Využit je koaxiální kabel s maximální délkou bez opakovače okolo 100 m nebo optické kabely s řádově větší efektivní délkou kabelu. Přenosové rychlosti rozhraní jsou 1,485 Gbit/s a 1,4835 Gbit/s pro signály z rodiny NTSC [17].

DUAL LINK (SMPTE 372M) – Standard z roku 2002, který vznikl kvůli potřebě přenášet signál ve formátu 1080p 50/60Hz či 1080p se vzorkováním 4:4:4, na který HD SDI nemá dostatečnou přenosovou rychlost. Označení 4:4:4 definuje vzorkování pro jasovou složku (první pozice) a pro dvě chrominanční. Standardní digitální signál je obvykle ve formátu 4:2:2 reflektující poloviční vzorkovací kmitočet pro chrominanční složky signálu. Dual Link využívá dvou spojů HD SDI s celkovou přenosovou rychlostí 2,970 Gbit/s, respektive 2,967 Gbit/s. Při přenosu signálu s plným chrominančním rozlišením 4:4:4 přenáší jeden spoj standardní formát 4:2:2 a druhý spoj doplňující signál ve formátu 0:2:2 [17]. Signál může být 10 nebo 12bitový. Charakteristika standardu HD SDI a DUAL LINK je definována v ITU-R BT.1120-8.

3G SDI (SMPTE 424M) – Standard z roku 2006 schopný přenášet signál s bitovým tokem 2,970 Gbit/s, respektive 2,967 Gbit/s po jednom samostatném koaxiálním kabelu. V profesionální videotechnice se začíná postupně prosazovat, i když převaha

zařízení s Dual Linkem je stále výrazná. Vznikly již také standardy SMPTE ST-2081/2082, které navyšují rychlost na dvojnásobek, respektive čtyřnásobek oproti 3G SDI [18]. Uvedené standardy mají sloužit pro přenos 4K obrazu a v současnosti jsou stále ve vývoji, v praxi se tedy ještě příliš nevyužívají (Q1 2015). Na závěr jsou pro přehlednost uvedeny nejdůležitější parametry signálu pro tři nejrozšířenější verze SDI.

SD 270 Mbit/s ITU-R BT.656	Amplituda	800 mV ± 10 %
	DC Offset	0 V ± 0,5 V
	Náběžná/Sestupná hrana	750 ps až 1,5 ns
	Δ Náběžná/Sestupná hrana	≤ 500 ps
	Překmity	-
HD 1,485 Gbit/s ITU-R BT.1120-7	Amplituda	800 mV ± 10 %
	DC Offset	0 V ± 0,5 V
	Náběžná/Sestupná hrana	≤ 270 ps
	Δ Náběžná/Sestupná hrana	≤ 100 ps
	Překmity	≤ 10 %
HD 2,97 Gbit/s ITU-R BT.1120-7	Amplituda	800 mV ± 10 %
	DC Offset	0 V ± 0,5 V
	Náběžná/Sestupná hrana	≤ 270 ps
	Δ Náběžná/Sestupná hrana	≤ 100 ps
	Překmity	≤ 10 %

Tab. 2 Specifikace digitálních seriových signálů SD SDI a HD SDI [12]

2.2.2. HDMI (High-Definition Multimedia Interface)

V současnosti nejvíce používaný standard ve spotřební elektronice. Jeho vzniku předcházela potřeba vytvořit rozhraní, které bude schopné přenášet signál digitálního obrazu i zvuku bez nutnosti použití více kabelů. V roce 2002 byla uvedena první verze, která podporovala maximální rychlost přenosu 3,96 Gbit/s pro 1080p/60 Hz. Poslední verze 1.4 vydaná roku 2009 již zvládá rozlišení 4096×2160p při 24 Hz, nově obsahuje kanál Ethernet a podporuje různé režimy 3D. HDMI umí pracovat v barevných prostorech RGB nebo YCbCr. Nejnovější verze zvládají 24, 30, 36 a 48bitovou barevnou hloubku. HDMI přenese až 8kanalový modulovaný zvukový LPCM signál při vzorkovacím kmitočtu 192 kHz a s kódováním vzorku do 24 bitů. Existuje pět různých konektorů HDMI, které mají různý počet pólů dle velikosti přenášených dat [20]. V profesionální televizní technice se rozhraní HDMI používá hlavně u levnějších kamer a často se signál ihned překóduje do SDI.

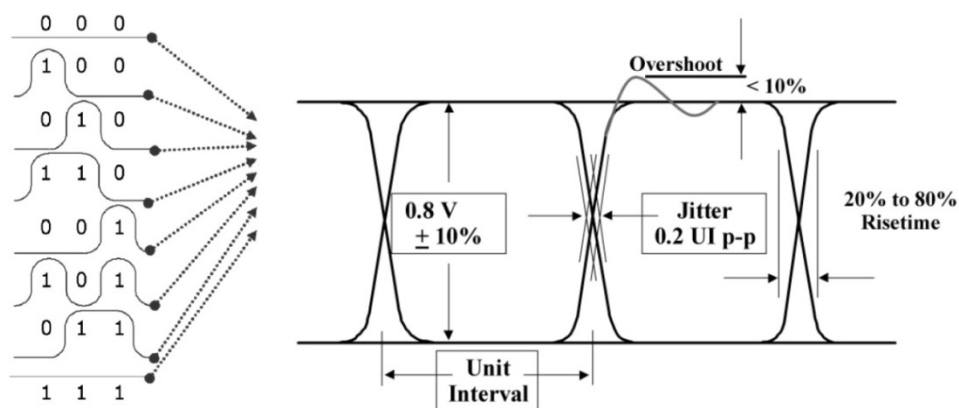
3. Parametry vhodné pro měření televizních kamer

Parametry a vlastnosti kamer se zjišťují z výstupního signálu, který produkuje v závislosti na snímané scéně, nastavení zpracování obrazu a použité elektronice v dané kameře či kamkodéru. K vyhodnocení digitálního signálu z kamery je zapotřebí s ohledem na vysoké přenosové frekvence měřit výstup na profesionálních měřicích přístrojích. K měření signálu je možné přistupovat ze dvou základních pohledů. Prvním je měření sériového digitálního signálu a jeho charakteristik. K takovému měření je možné využít širokopásmový osciloskop a sledovat důležité parametry jako amplitudu signálu nebo časový neklid (viz kap.3.1). Druhým přístupem je využití obrazového analyzátoru k měření, který přijatá data přetransformuje do obrazové informace a interpretuje je standardně v analogové struktuře videosignálu. Z takového přístupu k měření je možné určit nejvýznamnější obrazové charakteristiky zkoumané kamery (viz kap. 3.2). Současné profesionální analyzátoři jsou schopné zvládnout oba typy měření. Je důležité si uvědomit, že kamera je ve své podstatě A/D převodník. Signál z ní je výhodnější přenášet digitálně, ale výsledný obraz na jakémkoli zobrazovači opět vnímáme analogově.

3.1. Parametry digitálního sériového signálu

Analogové měření průběhu digitálního signálu zahrnuje zejména měření amplitudy signálu, doby náběhu (Rise Time), doby sestupu (Fall Time), překmitů (Overshoot) a časového neklidu (Jitter). Díky setrvačnosti luminoforu stínítka či digitální paměti osciloskopu se vytvoří obrazec, který vznikne z krátkých segmentů signálu překrytých přes sebe. Různé průběhy vznikají tak, že se mění struktura přenášených dat. K vytvoření zmíněného obrazce je zapotřebí vzorkovat signál a vytvořit tak stejně dlouhé segmenty signálu. Toho se docílí extrakcí časového signálu ze samotného datového přenosu a následnou synchronizací s přijímačem. Takovéto zobrazení se nazývá oko rozhodnutí (Eye Diagram) a je nejčastěji používáno pro diagnózu fyzické vrstvy signálu SDI. Časový interval mezi dvěma sousedními přechody se nazývá jednotkový interval (Unit Interval) a je roven převrácené hodnotě taktovacího signálu. Pro SD SDI (SMPTE 259M) je tato hodnota pro komponentní signál 3,7 μ s, respektive 674 ns pro HD SDI (SMPTE 292M). Sériový přijímač rozhoduje o úrovni přijatého signálu (logická 0 nebo 1) ideálně ve středu oka, protože je zde nejméně degradován. S různou úrovní amplitudy, měnící

se fází a tvarem hran signálu se začne detekční oko rozhodnutí „zavírat“. Jakýkoli průběh, který se liší od předešlých segmentů, se zobrazí na odlišné pozici v obrázci. Pokud je plocha, kde neprobíhají žádné segmenty signálu, poměrově velká, dá se předpokládat, že dojde ke správnému dekódování úrovně signálu. Pokud se začne oko „přivírat“, roste pravděpodobnost špatného vyhodnocení úrovně, a tedy vzniku chyb. Příklad oka rozhodnutí je uveden společně s vyznačenými parametry na Obr. 17.



Obr. 17 Detekční oko rozhodnutí (Eye Diagram); upraveno [13]

Amplituda signálu na výstupu kamery je jejím důležitým parametrem. Rozhoduje o maximální vzdálenosti přenosu. Pro všechny standardy SDI je amplituda definována shodně o velikosti 800 mV ($\pm 10\%$). Malá i příliš velká amplituda způsobuje problémy, které mohou ovlivnit výsledný šum i časový neklid a zapříčinit tak chyby v přenosu. Amplituda je v oku rozhodnutí rovna vertikální vzdálenosti mezi logickou 0 a 1. Výška oka je v ideálním případě rovna amplitudě. V praxi může být častěji i výrazně menší (v závislosti na úrovni rušení). Vzdálenost středu oka od vnitřní hrany je přímo úměrná hodnotě SNR. Šířka oka je pak přímo úměrná fázovému chvění (viz.kap 3.1.1). Náběžná a sestupná hrana charakterizuje rychlost změny mezi dvěma logickými úrovněmi. Měří se jako doba, kdy se signál z 20 % amplitudy zvýší na 80 %, respektive právě naopak pro sestupnou hranu. Překmity by neměly přesáhnout 10 % amplitudy signálu. Pro měření všech výše uvedených parametrů je důležité propojit analyzátor s kamerou pomocí krátkého kabelu (doporučeno max. 2 m). Poté se již významně projevuje útlum kabelu, přeslechy a další artefakty [22]. Je důležité pochopit, že i správné vyhodnocení a kvalitní oko rozhodnutí z analyzátoru, nezajišťuje správnou detekci signálu v jiných přijímačích. Dovoluje však zkoumat kvalitu signálu z digitální kamery a zjistit, zda splňuje předepsané normy.

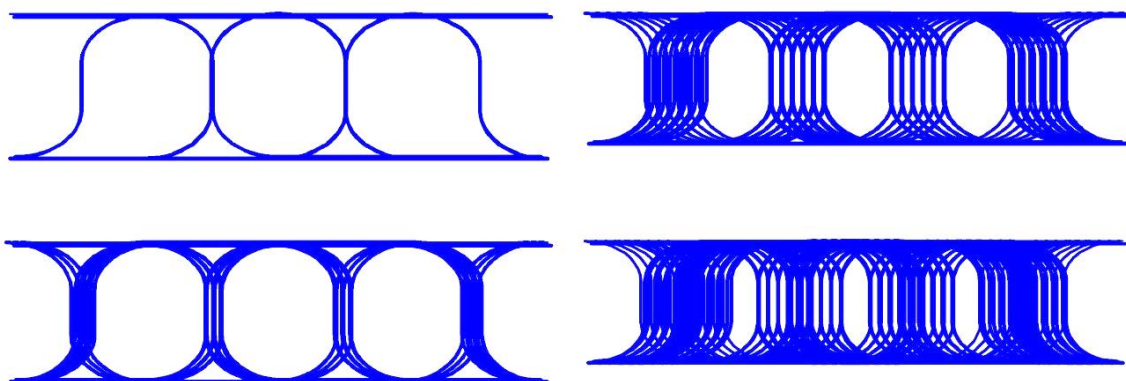
Kvalita digitálního obrazového signálu SDI se měří zejména při zkoumání vlastností přenosové cesty, obrazových převodníků či vlivu konektorů. Pro taková měření se využívají výhradně tzv. patologické signály. Jde o signály, které obsahují dlouhé řady nul, a pro přenos jsou proto velmi složité. Nejpoužívanější je kontrolní obrazec SDI (SDI Check Field), který se skládá ze dvou částí. Horní polovina slouží pro zkoušku činnosti kabelových korektorů a má purpurovou barvu. Výstupní signál obsahuje posloupnost devatenácti nul a jediné logické jedničky. Takovýto signál má velkou stejnosměrnou složku, která se v čase segmentálně mění, a vznikají tak kritické podmínky v přenosovém kanále. V dolní části obrazce je pak signál pro testování fázových smyček PLL (Phase Locked Loop) pro obnovování taktu, který má šedou barvu. Skládá se ze scamblované posloupnosti dvaceti nul, za kterými následuje dvacet jedniček. Počet průchodů nulou je velmi nízký a pro obnovovací obvody je takovýto signál krajně složitý. Přijímače by měly být schopny tyto signály správně dekódovat. Přesné specifikace jsou obsaženy v normách SMPTE-RP 178 pro SD signály a SMPTE-RP 198 pro HD. Dále je důležité zmínit pojem BER (Bit Error Ratio), pomocí kterého se kvantifikuje množství chyb v přenosu. Je to poměr nesprávně přenesených bitů k celkovému počtu bitů. V televizní praxi se častěji využívá parametr chybových sekund EDH (Error Electronic Data Handling). Ten ukáže, před jakou dobou se objevila jedna sekunda zatížená chybami. Je tedy lépe prakticky uchopitelný než parametr BER, který nabývá nízkých hodnot. Existuje celá řada dalších měření přenosových charakteristik (např. CRC v jednotlivých pulsnímčích), které ale v dnešní době nejsou pro samotné kamery nijak významné [56].

3.1.1. Časový neklid (Jitter)

Důležitým parametrem při měření digitálního sériového signálu z kamery je časový neklid neboli jitter. Jde o vychýlení hran signálu oproti jeho ideálnímu teoretickému průběhu, které může způsobovat řada faktorů. Pokud je v přijímaném signálu velká úroveň jitteru, může dojít k špatnému vyhodnocování úrovní. Při vyhodnocování časového neklidu je vhodné přihlížet ke kmitočtovým oblastem, ve kterých se jitter vyskytuje. Obnovený referenční časový signál nezahrnuje frekvenční složky, které leží nad šířkou pracovního pásma obnovovacího obvodu přijímače. Na vyhodnocování má tedy vliv amplituda časového neklidu a jeho frekvenční složky. SMPTE rozděluje měření na dva základní typy dle velikosti frekvenčního spektra.

Prvním typem je časový jitter (Timing Jitter). Obsahuje složky signálu od 10 Hz, nazývané jako krátkodobé chyby. Timing jitter představuje časovou změnu polohy významných bodů sériového signálu vztaženou k referenčnímu časovému signálu (např. průchody nulou). Vyjadřuje se pomocí jednotek UI. Druhým typem je relativní neklid (Alignment Jitter) měřený v pásmu od 1 kHz pro SD SDI, respektive 100 kHz pro HD SDI. Udává časové posuny signálu vůči taktu odvozenému z vlastního digitálního obsahu. Existuje ještě třetí typ jitteru, který vyhodnocuje nestabilitu frekvenčních složek pod 10 Hz. Jejich vliv na kvalitu dekódování je však zanedbatelný a měří se minimálně [56]. Jitter může vznikat z celé řady příčin, a je tedy podstatné ho klasifikovat také na dva základní druhy podle jeho vzniku – náhodný (Random Jitter) a neměnný (Deterministic Jitter) [21].

Náhodný jitter představuje nepředvídatelné působení šumu v čase a je nejlépe popsán Gaussovským pravděpodobnostním rozdělením, které popisuje četnosti výskytu v závislosti na hodnotě amplitudy. Většina šumu v elektronických obvodech je tepelného charakteru, který se modeluje právě Gaussovským rozdělením. Jitteru s malou amplitudou odpovídá vyšší pravděpodobnost výskytu než jitteru s vysokou hodnotou amplitudy. Měření zachycující krátký časový okamžik tak pravděpodobně nebude obsahovat složky rušení s velkou hodnotou amplitudy. Neměnný jitter naopak představuje předvídatelné vlivy rušení. Nabývá omezených hodnot a s časem se výrazně nemění. Může mít příčinu ve frekvenční odezvě kabelu, struktuře přenášených dat či v mezi-symbolovém rušení ISI (Intersymbol Interference). K odstranění vlivu ISI přijímače obvykle obsahují kompenzaci délky kabelu [21].



Obr. 18 Princip vzniku časového neklidu; upraveno [13]

3.2. Parametry obrazového signálu

Rozsáhlejší část této práce je věnována popisu parametrů digitální kamery, které získáme dekódováním digitálního signálu v obrazovém analyzátoru do analogové podoby videosignálu. Takovéto parametry slouží k popisu stěžejních vlastností kamery. Pokud je digitální signál správně dekódován a v přenosu se objevuje tolerované množství chyb, profesionální analyzátor poskytuje možnost zkoumanou kameru podrobit detailnímu rozboru. Parametry uvedené v této kapitole jsou důležitým měřicím nástrojem na půdě České televize. Jejich znalosti jsou pro sepsanou metodiku měření digitálních kamer klíčové (viz kap. 4).

3.2.1. Gama opto-elektronická přenosová funkce

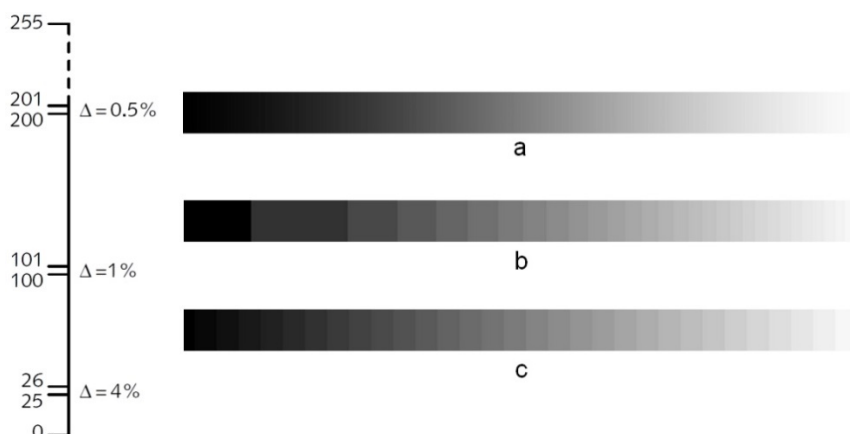
V oblasti obrazové techniky parametr gama reprezentuje vztah mezi číselnou hodnotou obrazového segmentu a reálnou intenzitou snímané scény. Bez parametru gama by zaznamenaná scéna nekorespondovala s lidským vnímáním. Výstupní signál z obrazových senzorů téměř přímo odpovídá počtu dopadajících fotonů. Vztah mezi vstupní a výstupní veličinou je tedy lineární. Naopak lidské vnímání intenzity světla není lineární. Z fyziologických vlastností lidského zrakového ústrojí plyne logaritmické vnímání intenzit. Ve srovnání s obrazovými senzory je lidský zrak více citlivý na změny v tmavších tónech než ve světlých. Vyplývá to z vyšší citlivosti čípků, které vnímají jas prostředí a jsou uzpůsobeny k vidění za snížených světelných podmínek (viz kap. 1). Parametr gama v tomto případě udává vztah mezi vnímáním intenzity kamerou a lidským okem.

$$I_{zrak} = I_{kamera}^{gama}, \quad (10)$$

kde I_{zrak} představuje vnímání intenzity lidským okem a I_{kamera} pomocí kamery [13].

V případě aplikování gamy na výstupní signál ze senzoru je následná digitalizace, respektive kvantizace, daleko efektivnější. Jedná se ve své podstatě o nelineární kvantizaci, kdy je více kvantizačních úrovní použito pro vzorky s nízkou intenzitou světla. V oblasti vysokého jasu jsou naopak vzorky kódovány s vyšší hodnotou kvantizačního šumu. Pokud by byla využita lineární kvantizace s 256 úrovněmi, stá úroveň by byla označena jako průměrně šedivá pro lidský zrak. Poměr intenzit sousedních úrovní by se lišil o hodnotu Δ pro lidské vnímání. Ta by se měnila v závislosti na daných úrovních. Na Obr. 19 je zobrazen tento poměr intenzit sousedních prvků a naznačena výhoda nelineárního kódování s gamou.

V obrazových digitálních systémech s nelineární kvantizací je ideální poměr intenzit jakýchkoliv dvou sousedních úrovní zhruba 1 %. Bylo zjištěno, že pro hladké a plynulé přechody mezi jednotlivými úrovněmi s použitím gamy stačí standardní 8bitové kódování (256 úrovní na kanál). Při lineární kvantizaci by k zajištění této vlastnosti bylo zapotřebí nejméně 11 bitů (2048 úrovní) [13].



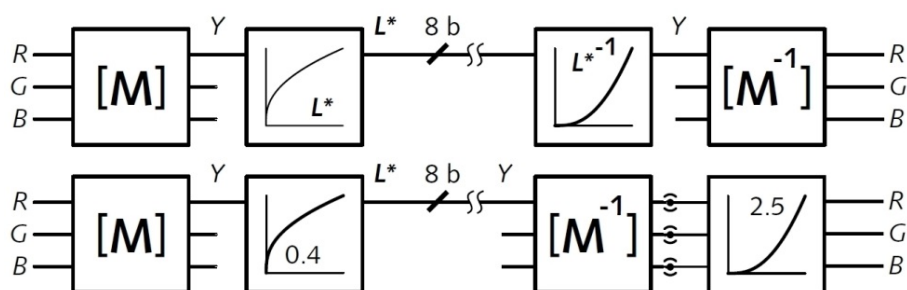
Obr. 19 a) Originál b) lineární kvantizace (5bitová) c) nelineární kvantizace (5bitová); upraveno [14] [15]

Uvedená výhoda gama kódování je v televizním řetězci obsažena následovně. Snímaná scéna je v kameře přetransformována opto-elektronickou přenosovou funkcí gama a přenesena na vstup zobrazovače. Ten v sobě musí obsahovat systém tzv. gama korekce, který přijatá data reprodukuje do původních úrovní intenzity. Je důležité si uvědomit, že aplikace gamy má smysl při snímání obrazu a ne při jeho reprodukci. Hlavním důvodem používání gamy v digitální obrazové technice tedy není jen původní kompenzace nelinearity CRT zobrazovače, ale i optimalizace využití omezeného počtu kvantizačních úrovní. Reálná přenosová funkce celého systému po aplikaci gama korekce by měla být lineární a tedy gama rovna 1. V praxi se často záměrně nekompensuje gama zcela dokonale (tzn. gama celého systému > 1), aby se dosáhlo lepšího kontrastu v obraze [23]. Pojem nelinearity v televizní technice také významně souvisí se zobrazovači CRT, kde katoda emituje elektronový paprsek, který dopadá na fosforeskující stínítko (anodu) a emituje světlo v pevném rastru. CRT jsou ze své podstaty nelineárním systémem. Intenzita světla reprodukováného na obrazovce je nelineární odezvou na vstupní napětí. Tento efekt je způsoben vlastnostmi elektronového vyzařovače, který produkuje elektronový paprsek ze zahřáté katody. Předpis nelinearity CRT [13] s konstantou K je

$$I = K(V + \varepsilon)^{\text{gama}}, \quad (11)$$

kde V je napětí přiváděné na vstup CRT, ε hodnota nastavení černé (Black Offset).

Korekce gamy bylo docíleno vložení obvodů přímo do kamery, která tak dopředně kompenzovala nelinearitu CRT. Bylo také zjištěno, že nelinearita CRT obrazovky je velmi podobná inverzní funkci vnímání světla člověkem. Záporná hodnota gamy u CRT leží v intervalu 2,35 až 2,55, a tudíž je možné neupravený signál přímo reprodukovat nebo jen drobně dokorigovat. Novodobé zobrazovače LCD (Liquid Crystal Display) jsou ze své podstaty lineární, a korekce gama tak musí být implementována dodatečně. Ke správnému vykreslení obrazu je zapotřebí vyhledávací tabulka LUT (Look Up Table), která je řízena grafickou kartou či samotným monitorem. Hodnota příchozích dat pro každý kanál je transformována dle údajů v tabulce a až následně zobrazena [13].



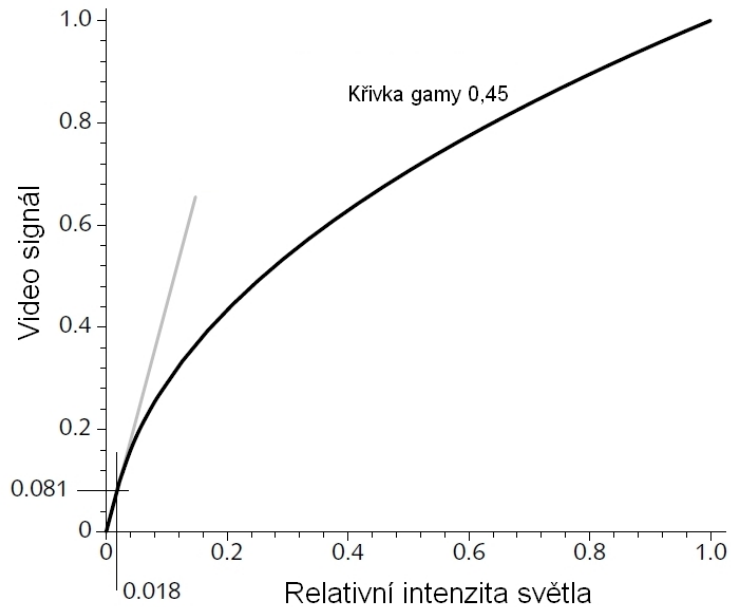
Obr. 20 Obecný princip gamy u LCD (nahore) a CRT (dole); upraveno [15]

Doporučení Rec.709 pro HD signály specifikuje hodnotu exponentu gama v kameře na 0,45. V praxi se kvůli minimalizaci šumu ve velmi tmavých částech obrazu přistupuje ke snížení jeho zesílení a úpravě transformační gama funkce [13] na vztah

$$R_{709} = \begin{cases} 4,5 R & \text{pro } R \leq 0,018 \\ 1,099 R^{0,45} - 0,099 & \text{pro } R > 0,018. \end{cases} \quad (12)$$

Předpisy hodnot pro SD systémy nebyly plně specifikovány. Norma NTSC počítala s hodnotou gamy v obrazovce 2,2 a standard PAL s exponentem 2,8. Rozhraní SDI SMPTE 240M pro HD signály má definovanou transformační funkci [13], která se drobně liší od Rec.709

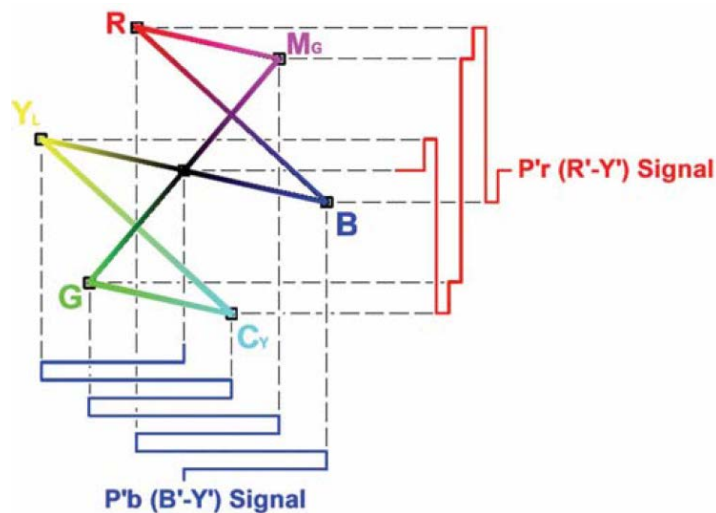
$$R_{240M} = \begin{cases} 4,0 R & \text{pro } R \leq 0,0228 \\ 1,1115 R^{0,45} - 0,1115 & \text{pro } R > 0,0228. \end{cases} \quad (13)$$



Obr. 21 Transformační funkce podle doporučení Rec.709; upraveno [15]

3.2.2. Kolorimetrie v měření

Zkoumání kvality kolorimetrických veličin a správnosti jejich zastoupení ve výstupním signálu z měřené videokamery je v době zvyšujících se nároků na kvalitu obrazu zásadní. Měření se provádí na komponentních signálech RGB nebo na jejich transformacích YCbCr. Tyto digitální složky mohou být převedeny do analogové formy a zobrazeny na příslušném analyzátoru ve formě časového průběhu. V takovém případě dochází k zobrazení závislosti amplitudy na čase kompozitní formy signálu či jednotlivých složek zvlášť. Pro komplexní měření barevného podání je tento způsob nevyhovující, v praxi se využívají jiné metody.



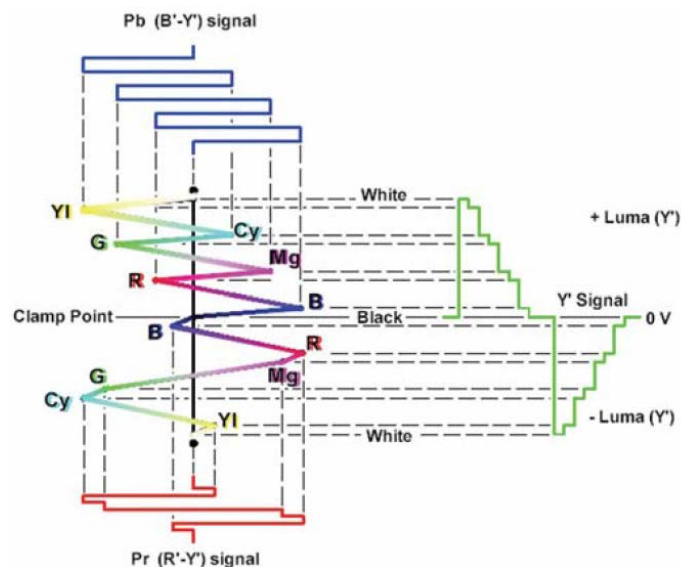
Obr. 22 Zobrazení signálu na vektorskopu [8]

První a nejvyužívanější je metoda Vektorskopu, který se využívá k měření amplitudy chrominančních složek signálu. Jde o dvojdimenzionální graf s komponentou C_b na horizontální a C_r na vertikální ose. Na obrazovce vektorskopu jsou zvýrazněny cílové body, odpovídající hodnotám základních barevných složek dle příslušné normy. Každá barva, která je obsažena ve vstupním signálu, se zobrazí na vektorovém diagramu jako bod. Z toho plyne nutnost zkoumat chrominanční vlastnosti na normovaných barevných pružích, které mají omezený počet barev základních a doplňkových. Vektorovým součtem uvedených komponent je získána informace o amplitudě, která odpovídá sytosti dané barvy (Chroma). Fázový úhel v diagramu (v kladném směru osy x) přísluší naopak barevnému tónu (Hue). Uvedené vztahy lze vyjádřit pomocí rovnic [14] jako

$$U_{chroma} = \sqrt{(U_R - U_Y)^2 + (U_B - U_Y)^2} \quad (14)$$

$$\varphi = \arctg \frac{U_R - U_Y}{U_B - U_Y}. \quad (15)$$

Hlavní nevýhodou vektorskopu je absence vyhodnocování jasové složky či porovnání hodnot zisku mezi jasovým a chrominančními kanály. I přes chybějící jasovou komponentu by signál na vektorskopu vypadal shodně s plnohodnotným signálem. Tuto negativní vlastnost neobsahuje tzv. Lightning displej, který poskytuje také informaci o časování mezi všemi třemi komponenty. V horní části je vynesena závislost jasu a složky C_b , v dolní části diagramu poté jasu a C_r . Horizontální osa odpovídá dokonale černé. Měření se opět provádí na signálu barevných pružů [14].



Obr. 23 Zobrazení signálu na Lightning displeji [8]

Třetím využívaným nástrojem je vyhodnocování gamutu, ve kterém je pomocí příslušného diagramu možné odhalit chrominanční chyby. Hlavním zdrojem chyb je záměna norem 601 pro SD a 709 pro HD signály. Jejich transformační matice se liší a jejich gamuty jsou rovněž odlišné. Zachování příslušného barevného prostoru je důležité zejména v postprodukci, kdy může docházet k celé řadě úprav zdrojového obrazu a přepočtům mezi jednotlivými obrazovými formáty. V rámci měření chrominančních vlastností je také velmi podstatné zkoumání zesílení jednotlivých kanálů RGB. V případě jejich nevyváženosti dochází ke změně barevného podání. S tím souvisí pojem vyvážení bílé, kdy zisk jednotlivých RGB kanálů musí být shodný. Detailněji o této vlastnosti a kalibrování chrominančního výstupu digitální kamery pojednává kap. 4.4. Detailnější informace o problematice barevných soustav a kolorimetrie nechť si laskavý čtenář dohledá v publikacích [2] a [5].

3.2.3. Šumové vlastnosti

Šumové charakteristiky kamery a jejich modelování představují širokou a složitou problematiku. Původců obrazového šumu je velké množství. Dělí se na zdroje náhodného šumu a šumu s pevnou strukturou (nenáhodného). Náhodný šum je způsoben několika zdroji. Prvním je vlastní šum dopadajícího světla na obrazový senzor, který způsobí celkový fotonový šum v závislosti na počtu dopadajících fotonů. Velikost fotonového šumu je

$$\delta_{foton} = \sqrt{N_{dop} \cdot Q} , \quad (16)$$

kde N_{dop} je počet dopadajících fotonů a Q je kvantová účinnost [24].

Další složkou náhodného šumu je náhodné tepelné generování elektronů a děr v elektronice kamery. Tento děj se zažilo označovat anglickým výrazem *Dark Current* (proud za tmy), jelikož je generován i v případě, kdy nedopadá na senzor žádné světlo. Vzniká v různých částech kamery (např. nepravidelná struktura krystalu polovodičů) a nejčastěji je modelován Poissonovým rozdělením pravděpodobnosti [25]. Poslední významnou složkou je šum při vyčítání (Reading Noise), který je definován jako zbytkový šum obvodů mezi fotoreceptory a A/D převodníkem. Součtem vlivů všech uvedených zdrojů získáme celkovou hodnotu náhodného šumu. Ten se nejčastěji vyjadřuje ve formě odstupe signálu od šumu SNR v logaritmické míře s jednotkami decibel (dB).

$$SNR = 20 \log \left(\frac{N_{dop} \cdot Q}{\sqrt{\delta_{foton}^2 + \delta_{dark}^2 + \delta_{read}^2}} \right), \quad (17)$$

kde δ_{dark} je proud za tmy a δ_{read} je šum při vyčítání [24].

Druhou významnou skupinu šumů tvoří šумы nenáhodné, které jsou způsobeny výhradně nejednotností obrazového snímače. Jednotlivé pixely mohou mít při shodném osvětlení různou elektronovou odezvu a v případě vadných pixelů se i velmi výrazně lišit od průměru. V případě absence dopadajícího světla na obrazový senzor je tento efekt nepozorovatelný. Profesionální digitální kamery často obsahují algoritmy pro kompenzaci nenáhodného šumu a dokážou v případě potřeby i dopočítat vadné pixely [24].

Speciálním případem je šum kvantizační vznikající při digitalizaci analogového signálu. Vlivem omezeného počtu kvantizačních úrovní je zanášena do digitálního vyjádření signálu chyba. Oproti výše zmíněným šumům je však pro oko těžko postřehnutelná, tím méně při využití vyšších stupňů kvantizace. Kvantizační šum je vyjádřen rovnicí

$$\delta_{kvantizační}^2 = \frac{q^2}{12}, \quad (18)$$

kde q je počet kvantizačních úrovní [24].

3.2.4. Rozlišení, aliasing

Měření horizontálního rozlišení je fundamentálním nástrojem popisu digitální kamery. Stejně důležité je také vertikální rozlišení. S uvedenými charakteristikami souvisí vznik artefaktů v obraze vlivem podvzorkování tzv. aliasing. Ten vzniká při nedodržení vzorkovací podmínky a může způsobit velmi rušivé „obrazce“. Měření rozlišení je založené na zkoumání odezvy kamery na měnící se prostorové frekvence. K měření se využívají dva základní typy testovacích obrazců. Prvním je obrazec s obdélníkovým signálem, kde je ostrý přechod mezi vertikálními bílými a černými pruhy. Druhým je obrazec s harmonickými přechody mezi úrovněmi. Při jeho snímání má reprodukováný videosignál charakter funkce sinus. Výhodou těchto obrazců je absence možných rušivých harmonických frekvencí oproti obdélníkovému signálu. Při využití testu s obdélníkovým průběhem je odezvou kamery přenosová funkce kontrastu CTF (Contrast Transfer Function), respektive modulační přenosová

funkce MTF (Modulation Transfer Function) pro harmonické testovací obrazce [26]. Příklad výsledku měření horizontálního rozlišení popsaného grafem CTF je např. v příloze A této práce. Funkce MTF je součástí obecné optické přenosové funkce OTF (Optical Transfer Function), která je komplexní a má tak modul a fázi [28]. Modulem je funkce MTF. Druhá možná definice vychází z představy sledování kontrastu sinusového testovacího obrazce na výstupu systému [27]. Funkce MTF je pak vyjádřena jako podíl kontrastu výstupního obrazu ke kontrastu vstupního předmětu. Kontrast je definován podílem amplitudy střídavé složky ke složce stejnosměrné jako

$$K = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}, \quad (19)$$

kde L_{max} je nejvyšší hodnota jasu a L_{min} nejnižší hodnota jasu [26].

Výstupem soustavy je opět sinusový obrazec, ale kvůli omezené prostorové rozlišovací schopnosti soustavy dojde ke snížení kontrastu. Funkce MTF je dána kmitočtovou závislostí úbytků kontrastu na výstupu oproti vstupu jako

$$MTF = \frac{K_{out}(u, v)}{K_{in}(u, v)}, \quad (20)$$

kde K_{out} je hodnota výstupního kontrastu a K_{in} hodnota vstupního kontrastu [26].

Z důvodů problematického vyhotovení sinusového obrazce se v praxi častěji využívají pravouhlé testy. Z přenosové funkce těchto testů CTF je možné zjistit MTF. Změřením amplitud v závislosti na prostorové frekvenci je možné sestavit funkci přenosu kontrastu. Nenulová hodnota MTF pro prostorové frekvence vyšší než maximální přenositelná frekvence znamená možnost vzniku aliasingu [28]. Vyšší prostorové frekvence lze odstranit pomocí optického dolnofrekvenčního filtru, v praxi se však příliš nevyužívá. Měření rozlišení probíhá zejména na jasovém signálu. Nízké prostorové kmitočty mají dobře viditelné přechody jednotlivých úrovní, zatímco vysoké frekvence přecházejí do šedivých ploch. Při zkoumání jednotlivých barevných kanálů je při použití kamery s jedním senzorem a Bayerovou maskou pozorována odlišná hodnota rozlišení. Modrý i červený kanál budou mít poloviční rozlišení oproti zelenému [43].

4. Návrh metodiky měření parametrů televizních kamer

V následující kapitole bude uveden návrh metodiky měření parametrů televizních kamer pro využití na půdě České televize. Budou vybrány parametry relevantní pro účely České televize, které jsou nutné pro správné nastavení kamer, ověření výrobcem deklarovaných charakteristik a kontrolu funkčnosti kamery v pravidelných intervalech používání. Autor práce vychází ze zkušeností dlouhodobých pracovníků České televize a zachovává kontinuitu v postupech měření. Zároveň jednotlivé postupy podrobí detailnímu rozboru a navrhne jejich možná vylepšení. Autor při své práci vychází z jednotlivých norem a doporučení souvisejících s danou problematikou. Zejména využívá nařízení Evropské vysílací unie EBU (European Broadcasting Union), doporučení Mezinárodní telekomunikační unie ITU (International Telecommunication Union) a norem organizace ISO (International Organization for Standardization).

4.1. Měřicí vybavení

V této kapitole bude uvedeno měřicí vybavení, které bude využíváno k měření parametrů televizních kamer. Všechny uvedené přístroje jsou součástí vybavení České televize.

4.1.1. Obrazový monitor TVLogic LVM-242W

K pozorování výstupu kamery a k subjektivnímu vizuálnímu hodnocení kvality je použit profesionální monitor od firmy TVLogic. Má dva HD/SD SDI vstupy, nativní rozlišení 1920x1080, analogové komponentní vstupy a možnost zobrazení TC. V rámci útvaru videoinženýringu ČT byl monitor změřen a kalibrován. Použitý zobrazovač splňuje podmínky dokumentu EBU Tech 3320 pro práci v profesionálním televizním prostředí. Mezi ně patří zejména možnost zvolení barevné teploty 3200 K, úroveň černé v rozmezí 0,05 cd/m² až 0,4 cd/m², kontrast v poměru 1000:1 či doba zpoždění 10 ms. Svými charakteristikami tak spadá dle dokumentu EBU Tech 3320 do druhého stupně monitorů [29].

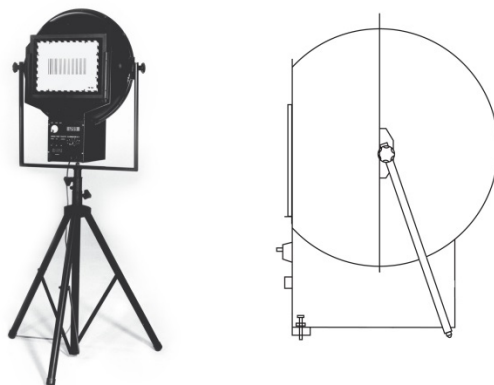
4.1.2. Prosvětlovací testy

K měření charakteristik kamer se využívají výhradně prosvětlovací měřicí testy, nikoliv odrazné. Využity jsou testy s poměrem stran 4:3 a zejména 16:9. Všechny používané obrazové prosvětlovací testy jsou ilustrativně uvedeny v rámci kapitoly 4. Testy v ČT mají dvě velikosti a při měření jsou vloženy do výstupu prosvětlovací

skříně. Všechny využívané testy splňují předpisy ITU-R 801-1 (např. barevný tón, materiál, světelnou propustnost).

4.1.3. Prosvětlovací skříň LE 6-100

Pro měření charakteristik kamer je důležité zachování správných světelných podmínek. K tomu slouží prosvětlovací skříň od firmy Image Engineering, která byla vyrobena v roce 2008. Zařízení je ilustrativně znázorněno na Obr. 24. Jedná se o kulovitou skříň s jedním otvorem, před který se umísťují obrazové testy o velikosti 360x280 mm (jiné s redukcí). V případě standardního zaclonění otvoru není nutné využívat ventilátor. Prosvětlovač funguje na principu spojitě koule. Ta je zevnitř opatřena homogenním nátěrem bílé barvy, která dokonale rozptyluje dopadající světlo. Hustota osvětlení je tak konstantní v celém vnitřním prostoru koule (mimo oblastí blízkých zdroji světla). V oblasti měřicího otvoru dochází logicky k nerovnostem v intenzitě osvětlení. Ta je ale při zvolených rozměrech koule a otvoru maximálně 5 %. Zdrojem světla je halogenová žárovka o výkonu 100 W. Nad ní je umístěna kovová destička, která zabraňuje přímému šíření paprsku k měřicímu otvoru. Barevná teplota soustavy je 3200 ± 50 K. Intenzitu světla je možné nastavovat v krocích 1:100 s maximální hodnotou intenzity nejméně 8000 lx. Součástí prosvětlovací skříně je také digitální luxmetr měřící intenzitu osvětlení jejíž hodnotu zobrazuje na LCD displeji [30].

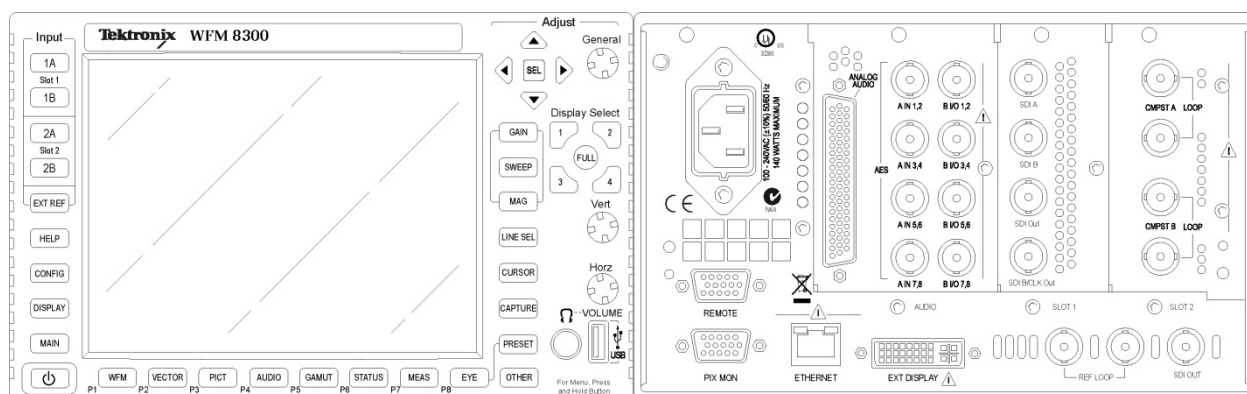


Obr. 24 Prosvětlovací skříň LE 6-100, pohled z boku vpravo; upraveno [16]

4.1.4. Tektronix WFM 8300

Video analyzátor od firmy Tektronix je jedním ze dvou nejvyužívanějších měřicích přístrojů pro účely stanovení charakteristik kamer. Podporuje nejdůležitější obrazové formáty, SD SDI, HD SDI, 3G SDI, Dual Link a kompozitní PAL a NTSC. Vyhodnotí prokládané i progresivní řádkování a všechny standardní snímkové frekvence. Frekvenční odezva na HD jasový signál je v rozmezí 50 kHz až 30 MHz $\pm 0,5$ %.

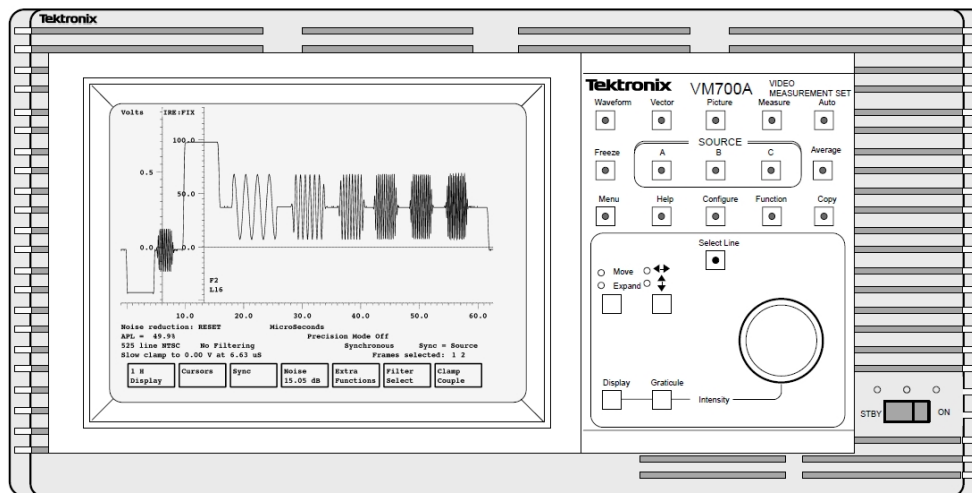
Analyzátor je osazen LCD displejem 1024x768 s možností zobrazení čtyř oddělených zobrazení [31]. Výhodou přístroje je velký počet možných měření. Analyzátor je schopen měřit charakteristiky fyzické vrstvy a parametry s ní spojené. Dokáže signál interpretovat v řadě diagramů (např. Eye Pattern) a zejména analyzovat samotný obrazový signál. Přístroj umí vyhodnotit podstatné kolorimetrické, časové či úrovněvé charakteristiky. Čelní a zadní panel analyzátoru je vyobrazen na Obr. 25. Podrobnější poznámky k ovládání a nastavení přístroje jsou uvedeny v rámci metodiky měření jednotlivých parametrů. Kompletní datasheet k tomuto modelu je možné dohledat na webu firmy Tektronix [31].



Obr. 25 Tektronix WFM8300 [17]

4.1.5. Tektronix WM 700A

Tento přístroj byl vyroben již v devadesátých letech, stále se však k měření využívá. Jde o zařízení, které spojuje funkci zobrazovače průběhu signálu, vektorskopu, automatického a manuálního měření. Má analogové kompozitní (3 kanály) a komponentní (v případě rozšíření) vstupy a je možné připojení k PC pomocí rozhraní RS 232. Možnosti přístroje se dají rozšířit pomocí přídavného hardwaru tzv. option. Pro měření obrazového signálu je přítomna Option 11 PAL. Pro měření charakteristik kamer je nejdůležitější Option 21, která umožňuje měřit kolorimetrické vlastnosti, defekty obrazu, šum, gamu či frekvenční odezvu. I přes logickou absenci měření HD signálu je v některých typech měření stále složitě zastupitelná. Uživatel může také definovat sekvenci prováděných operací a uložit ji jako funkci. Nevýhodou zařízení je dlouhá doba „zahřátí“ a připravenosti k měření (+/- 20 min). Přístroj je schopen zpracovávat signály s hodnotou SNR nejméně 60 dB. Šířka pásma VM 700A je nejvýše 6,8 MHz [32]. Na čelní straně je umístěna dotyková CRC obrazovka a hardwarová tlačítka. Kompletní manuál k tomuto modelu je k dispozici v ČT v útvaru videoinženýringu. Přístroj splňuje předpis ITU-R 1204.



Obr. 26 Tektronix WM 700A [18]

4.1.6. AJA HA5

Video konvertor HA5 od firmy AJA Video Systems slouží k transformaci HDMI videosignálu do standardu SD/HD SDI. Převodník má dva SD/HD SDI výstupy a jeden HDMI vstup. Zvládne 10bitovou konverzi včetně embedovaného 8kanalového zvuku. Nízkou úroveň jitteru zajišťuje smyčka PLL. Vstupní formáty mohou být 525i, 625i, 1080p, 1080i a 720p. Výstupní pak SMPTE 259/292/296. Převodník je využíván k měření při absenci SDI výstupu na kameře (v případě poloprofesionálních kamkodérů) [33].

4.1.7. Teranex 3D

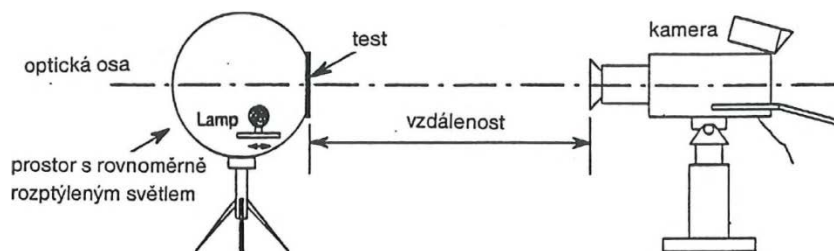
Profesionální konvertor obrazového signálu od firmy Blackmagic. Je schopen přepočítávat mezi různými standardy (SDI, HDMI, Analog), rozlišením (486, 576, 720, 1080, 2K), snímkovou frekvencí (23,98, 24, 25, 29,97, 50, 59,94), poměrem stran (4:3 a 16:9) a řádkováním v rychlosti blízké reálnému času. Ovládání je realizováno pomocí podsvícených tlačítek. Na zadní straně jsou umístěny vstupy SDI, HDMI, složkové, Thunderboltu či standardního a Dolby audia. Zařízení je využíváno zejména pro konverzi mezi SD – HD a přepočet mezi digitálním a analogovým videosignálem. Podrobnější informace k tomuto modelu je možné najít na webu společnosti Blackmagic [34].



Obr. 27 Blackmagic Teranex 3D [19]

4.2. Podmínky měření

Při měření parametrů kamer je nutné zajistit správné podmínky a provést správné nastavení všech zařízení. Základní uspořádání měřicího stanoviště je znázorněno na Obr. 28. V otvoru prosvětlovací lampy je zaaretován daný prosvětlovací test. Lampa je předepsanou dobu zapnuta (30 s), aby splňovala nároky na barevnou teplotu 3200 K. Okolní zdroje světla by měly být co nejvíce utlumeny. V případě nemožnosti přesunout měřicí stanoviště do zatemněné místnosti je nutné omezit vliv denního a zářivkového světla. Rozdíl v hodnotách osvětlení testu by měl být maximálně 5 %.



Obr. 28 Uspořádání stanoviště pro měření; upraveno [20]

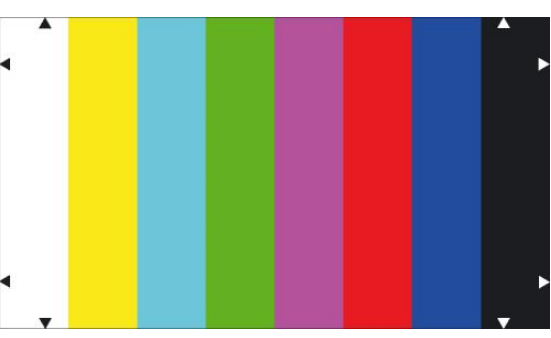
Kamera je umístěna v ose obrazového testu. Správné polohy je docíleno pomocí zrcadla (se značkou středu) o rozměrech obrazového testu. Ohraničení snímané scény musí splývat s aretačními značkami na každém testu. Vzdálenost kamery od testovacího obrazce je stanovena dle EBU Tech 3281 na 3 m. V případě nemožnosti zaměřit korektně okraje testu pomocí transfokátoru je možné tuto vzdálenost pozměnit (jinak se nedoporučuje). Clona objektivu je dle doporučení EBU nastavena ideálně na hodnotu $f/5,6$. Přípouští se také hodnoty $f/4$ a $f/8$. Ohnisková vzdálenost je ideálně volena ve středu rozsahu transfokátoru. Doba expozice je standardně nastavena na $1/50$ s. Okrajové pozice se nedoporučují kvůli vysoké pravděpodobnosti uplatnění optických vad a následného zkreslení výsledného obrazu. Správně zvoleným výstupem z kamery je nejkvalitnější dostupný signál (nekomprimovaný, standardně: SDI, 1080i). Kamerový výstup je poté propojen s měřicím přístrojem pomocí kvalitního a správně osazeného kabelu splňující předpis EBU Tech 3361. Je důležité volit kabel s délkou, která by neměla přesahovat 3 m. V případě využití dlouhého kabelu se mohou projevat nechtěné aspekty (např. útlum kabelu či vyšší chybovost). V blízkosti kabelu a celého měřicího stanoviště by se neměla vyskytovat elektrická zařízení, která by svou činností ovlivňovala dané měření. Pro standardní měření kamer v simulovaných podmínkách televizního studia je dle EBU Tech 3238 nutné dodržet výše uvedené nastavení. V případě změn je u

daného parametru tato skutečnost uvedena. V dalších kapitolách budou uvedeny objektivní metody měření daných parametrů. V případě relevance parametrů bude uvedena i subjektivní metoda a aspekty rozhodování pomocí lidského zraku, které jsou stále velmi důležité. Mohou rychle upozornit na skutečnosti, na které je zapotřebí se v měření zaměřit. V rámci kapitol jsou v případě potřeby dané aspekty popsány. Při subjektivním pozorování je potřeba dodržet doporučené podmínky dokumentu ITU-R 2022 pro laboratorní prostředí. Osvětlení místnosti by mělo mít slabou intenzitu a teplota by měla zhruba rovna standardizovanému osvětlení D65, které odpovídá teplotě poledního světla. Maximální jas obrazovky by měl být 70-250 cd/m². Pozorovací vzdálenost se odvíjí od využívaného monitoru. Při volbě zobrazovače TVLogic LVM-242W by měla být zhruba 1,2 m dle ITU-R 709. I přes vysokou kvalitu zobrazovače je nutné dodržet pozorovací úhel co nejbližší optické ose monitoru (maximálně pak 30 ° horizontálně), aby nedocházelo k degradaci vnímání reprodukováných barev a kontrastu. Nemělo by docházet k využití de-interlaceru pro prokládaný obrazový signál. Monitor musí být nakalibrován a mít vypnuté všechny dostupné obrazové korekce. Detailnější informace lze mimo zmíněného dokumentu ITU-R 2022 dohledat také v ITU-R BT.710-4. Pro potřeby ČT jsou výše uvedené podmínky subjektivního pozorování dostačující.

4.3. Parametry digitálního sériového signálu

Měření je realizováno při základním uspořádání na Obr. 28. K měření analogového průběhu fyzické vrstvy je využit analyzátor Tektronix WFM 8300. V případě zkoumání kamery bez výstupu SDI je před měřicí analyzátor umístěn AJA HA5 V, který je také v praxi využíván při jiném typu snímání než přímém záznamu do paměti kamkodéru či přenosných paměťových médií. Dle EBU Tech 3283 je doporučeno využívat výhradně obrazového testu barevných pruhů. Pro standardní měření se naopak nedoporučuje využívat stresové obrazové testy jako např. SDI Check Field (viz kap.3.1.). Pro zajištění věrohodných výsledků je bezpodmínečně nutné používat k měření kabel splňující podmínky EBU Tech 3361 (např. Belden 8281). S kabelem musí být zacházeno dle pokynů výrobce a musí dosahovat doporučené délky maximálně 2 m. Zajištění co nejlepších světelných podmínek dle kap. 4.2 není zcela nutné. V současnosti je tato metodika na půdě ČT realizována ve stejném zapojení. Je však potřeba důkladně splnit nastavení přístrojů a správně vyhodnotit naměřená data dle následujících pokynů.

K vyhodnocování na WFM 8300 je možné využít režimy *Eye*, *Jitter* nebo *SDI Status display*. Před použitím je nutné konfigurovat nastavení pro fyzickou vrstvu přes stisk tlačítka *CONFIG* a zvolení *Physical Layer Settings*. Zde je nutné zvolit druh připojeného kabelu v *Cable Type*, nastavit nejvyšší a nejnižší přípustnou hodnotu amplitudy signálu v *Level Max* respektive *Level Min*. V záložce *Eye Display Mode* je žádoucí zvolit režim *Normal*. Oko rozhodnutí pak zobrazuje přímo signál na vstupu analyzátoru, který neprošel interním ekvalizérem délky kabelu (při nevyhovujících hodnotách signálu a použitím režimu *Equalized* může dojít k chybné kompenzaci). Pro měření jitteru je dále stěžejní nastavení hodnoty filtru typu horní propust. Analyzátor je schopen měřit jitter pro dvě různé hodnoty, které se nastaví v *Jitter1 HP Filter*, respektive *Jitter2 HP Filter* [31]. Obě hodnoty budou mít pro potřeby měření v ČT různá nastavení. Výstupní hodnotou pro nastavení *Jitter1* 10 Hz bude *Timing Jitter*. Po nastavení hodnot *Jitter2* 1 kHz pro SD SDI a 100 kHz pro HD SDI bude výstupem tzv. *Alignment Jitter* (viz kap. 3.1.1). Pro relevantní výsledky je dodržení daných nastavení horních propustí stěžejní. Stiskem tlačítka *CONFIG* je možné nastavit typ reference. Zvolením *Internal Reference* získává analyzátor synchronizační časový signál přímo ze signálu SDI pomocí PPL smyčky a volbou *External Reference* pak z vnějšího referenčního signálu. Ten musí mít charakter signálu *Black Burst* pro SD signály a *Tri-level sync* pro HD. Detailní akceptovatelné referenční signály jsou uvedeny v uživatelské příručce k WFM 8300 [31].

Zisk	0 dB	
Gama korekce	-	
Kolenová funkce	-	
Aperturová korekce	-	
Korekce rozptylu	-	
Clona	f/5,6	

Obr. 29 Parametry digitálního signálu – nastavení kamery a použitý obrazový test [21]

Dokument ITU-R 1363-1 definuje čtyři různé metody měření jitteru. Se zmíněným vybavením je možné aplikovat metodu využívající fázový demodulátor nebo metodu využívající fázový demodulátor s externím referenčním signálem. Fázově řízený oscilátor je v první metodě korelován se vstupním signálem ve fázovém demodulátoru. Výstupem je změřený jitter dle nastavené pracovní šířky pásma smyčky PPL. Volbou *External Reference* je analyzátor řízen externím signálem.

V takovém případě musí být referenční signál připojen na zadní panel do vstupu REF Loop In pomocí 75 Ω BNC konektoru. Pokud je analyzátor koncovým zařízením, je nutné výstup REF Loop Out opatřit impedančním přizpůsobením 75 Ω. Na půdě ČT je standardně využívána metoda využívající fázový demodulátor bez externí reference. Vlastní měření je doporučeno provádět v zobrazení oka rozhodnutí stiskem *EYE*. Z něho je možné získat více informací o charakteru signálu než ze *Status displeje*. I při možnostech analyzátoru měřit signál manuálně pomocí kurzorů, se takový typ měření pro zvolené parametry nedoporučuje. Zejména kvůli nižší přesnosti, než kterou má automatické měření, a možnému chybnému nastavení kurzoru. Presentované výsledky dle EBU Tech 3283 a požadavků ČT musí obsahovat následující informace: zvolený obrazový test, typ měřicího analyzátoru, amplitudu signálu, náběžnou/sestupnou hranu, úroveň překmitů, Timing jitter s uvedeným nastavením filtru typu horní propust, Alignment Jitter s uvedeným nastavením filtru typu horní propust, snímek průběhu signálu ve formě detekčního oka rozhodnutí. Presentace výsledků je také součástí příloh této práce, kde jsou uvedeny měřicí protokoly pro různé kamery.

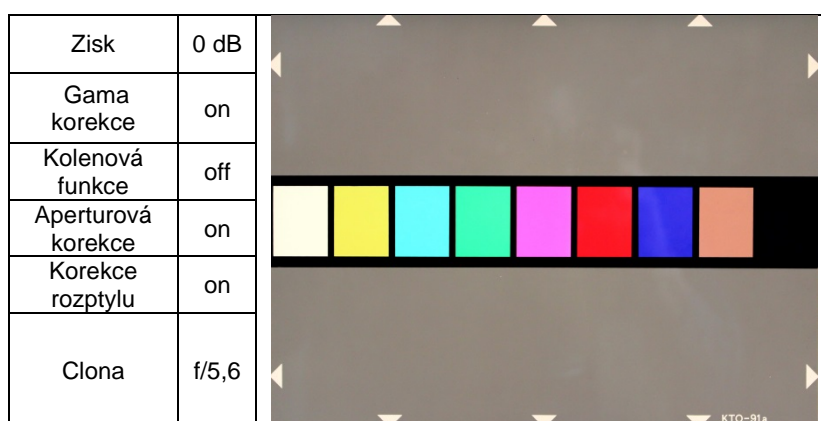
Subjektivní vizuální metoda u měření parametrů fyzické vrstvy má smysluplný, ale zejména informativní charakter. Důležité jsou výhradně změřené hodnoty, které i v případě značné vizuální degradace průběhu signálu mohou splňovat předepsané hodnoty pro SDI. V přílohách této práce jsou zobrazeny snímky obrazovky v režimu *EYE* pro různé průběhy signálu z různých kamer. Další je možné najít v přílohách této práce. V Tab. 3 jsou uvedeny parametry, které musí podle normy ITU-R a SMPTE daný signál splňovat.

SD 270 Mbit/s	Standard	ITU-R BT.656
	Timing Jitter	< 0,2 UI (> 10 Hz)
	Alignment Jitter	< 0,2 UI (0,1 - 27 MHz)
HD 1,485 Gbit/s	Standard	ITU-R BT.1120-7
	Timing Jitter	< 1 UI (10 Hz - 20 kHz)
	Alignment Jitter	< 0,2 UI (0,1 - 148,5 MHz)
HD 2,97 Gbit/s	Standard	ITU-R BT.1120-7
	Timing Jitter	< 1 UI (10 Hz - 20 kHz)
	Alignment Jitter	< 0,2 UI (0,1 - 297 MHz)

Tab. 3 Přehled normovaných parametrů digitálního signálu [12]

4.4. Kolorimetrické parametry

Kolorimetrická měření v ČT zahrnují dvě specifické oblasti. Tou první je měření kolorimetrických charakteristik kamer, u kterých není možné změnit nastavení matice pro převod RGB složek do YCbCr, a kameru tak manuálně barevně korigovat na definované úrovni. Druhou oblastí s výhradním zastoupením v ČT je právě nastavení a kalibrace správného barevného podání výstupu kamery. Měření je prováděno v uvedeném uspořádání. Je však bezpodmínečně nutné zajistit dodržení stálých předepsaných světelných podmínek během celého trvání testování (viz 5.2.). Doporučeným obrazovým testem dle dokumentu EBU Tech 3335 je ColorChecker. Mezi nevýhody tohoto testu v televizním prostředí patří jeho maticové uspořádání. Nejen v rámci kolorimetrického měření je užívanou praxí zkoumat signál na jednom konkrétním televizním řádku. Zobrazení na vektorskopu či osciloskopu je ostřejší než při vyhodnocování celého snímku. Proto se v ČT využívá obrazový test Vuzort KTO 91 (Obr. 30), který oproti standardním testům obsahuje navíc pleťovou barvu. Autor navrhuje využívat tento test nebo globálně rozšířený obrazový test s barevnými pruhy (např. od Image Engineering na Obr. 29). Všechny uvedené testy splňují normu ITU-R Rec. 709 pro HD signály. Při již nepříliš častém měření SD kamer je nutné použít obrazový test s 75 % barevnými pruhy dle normy ITU-R Rec. 601. Gamut obou norem je značně odlišný a záměna testů by mohla způsobit výrazné kolorimetrické odchylky v reprodukováném obrazu.



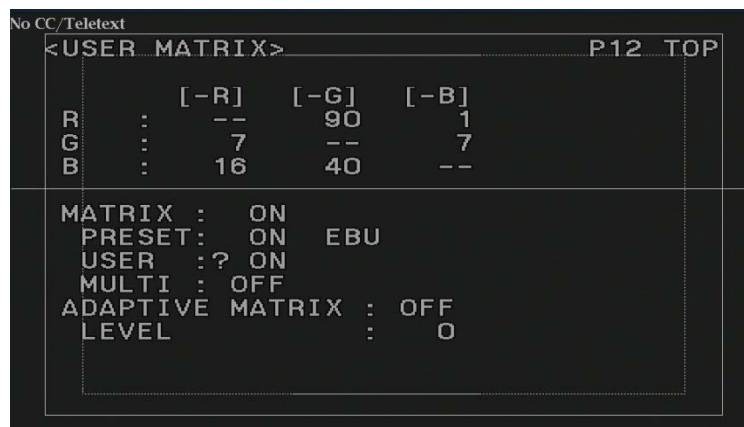
Obr. 30 Kolorimetrie – nastavení kamery a použitý obrazový test [21]

Před samotným kolorimetrickým měřením je nutné udělat řadu přednastavení, které zajistí správné výsledky. Na počátku každého měření je bezpodmínečně nutné vyvážit kameru na bílou. Kamera se umístí do předepsané pozice a namíří se do prosvětlovací komory bez obrazového testu nebo při použití testu Color Bars do bílého pole. Žárovka se nastaví na hodnotu intenzity cca 1000 lx. Poté se kamera

vyváží nejčastěji stiskem hardwarového tlačítka na těle kamery nebo v jejím systémovém menu. Po samotném vyvážení proběhne kontrola jeho kvality. Je možné využít zobrazení vektorskopu (ideálně soubor bodů středově souměrných), zobrazení diamond displeje (ideálně vertikální linie spojující vrcholy) a nejlépe pak porovnání zisků jednotlivých složek RGB (ideálně shodné úrovně) pomocí rozkladu zařízením Teranex 3D. V interním nastavení kamery, pokud to kamera umožňuje, by měl být nastaven zisk na 0 dB a kolenová funkce vypnutá (zakřivení funkce gama pro větší dynamický rozsah). Vypnuty by měly být také všechny doplňkové obrazové funkce/režimy, které ovlivňují barevné podání. U profesionálních kamer je také možné zapnout gamu a zvolit její hodnotu. V takovém případě se zvolí hodnota gamy 0,45. Měří se tudíž kamera v používaném provozním režimu, kde je gama také zapnutá. Nastavení úrovně intenzity osvětlení závisí na citlivosti kamery. Intenzitu nastavíme tak, aby signál z kamery odpovídající bílé na WFM 8300 dosahoval přesné úrovně 700 mV. Dále je nutné vyvážit kameru na černou. Dostačující metodou je vyvážit kameru při manuálně zacloněném objektivu. Moderní kamery jsou již schopné se samy vyvážit na černou při použití nekonečné clony. Úroveň takového signálu musí být 35 mV, která odpovídá 5 % amplitudy bílé. Korekce rozptylu v kameře (Flare), která zabraňuje zvyšování úrovně černé při odclonování objektivu, bude při měření zapnutá. Kamera by měla být měřena s objektivem, který bude využíván s kamerou i nadále. Transfokátor bude ideálně nastaven do středních hodnot s clonou $f/5,6$. S tímto nutným přednastavením je možné přistoupit k samotnému měření. Nedodržení uvedených nastavení může znehodnotit naměřené výsledky.

Po vložení uvedeného obrazového testu je kamera připojena k WFM 8300. Zde bude hlavní měření prováděno v zobrazení vektorskopu stiskem tlačítka *VECT*. V menu v položce *Display Type* je potřeba zvolit *Vector*. V záložce *Bar Targets* je nutné zvolit 100 % pro HD signály a 75 % pro SD signály. Souřadnice pozic základních a doplňkových barev se pro oba výrazně změní. Tlačítkem *Line Sel* bude vybrán jeden řádek pro měření (kvůli přesnějšímu vykreslení souřadnic) [31]. V režimu vektorskopu se zobrazí pozice barev a čáry mezi přechody. Pokud pozice nesouhlasí s normovanými souřadnicemi, je potřeba přistoupit k manuální kalibraci barevného výstupu kamery. Toho se docílí pomocí interního nastavení (pokud lze) hodnot matice rozdílových vazeb RGB složek (moderní kamery mají několik přednastavených matic pro hodnoty rozdílu složek RGB např. ITU 709 či EBU).

Každou primární barvu je tak možné se závislostí na ostatních barvách korigovat a zvětšit tak celkový barevný gamut a zpřesnit barevné podání. Z fyziologických vlastností zraku vyplývá potřeba nejvěrnějšího barevného podání zelené barvy, proto by měla mít přednost v přesnosti nastavení před zbylými složkami. V praxi lze jen stěží vyvážit kameru tak, aby body odpovídající šesti barvám testu dokonale “padly“ do předepsaných pozic. Příklad možného nastavení uživatelské matice kamery Sony je na Obr. 31. Po nastavení uživatelské matice je potřeba její hodnoty uložit do paměti. Následné úpravy hodnot matic při využívání kamery jsou důrazně nedoporučeny. Veškeré barevné korekce by měly být aplikovány až v rámci postprodukce. V případě porušení tohoto nařízení může dojít při přepínání kamer ve studiu k nevyrovnanému barevnému podání mezi jednotlivými záběry a k výraznému rušení diváka.



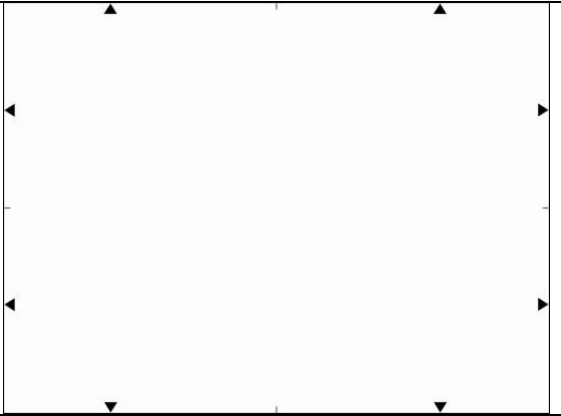
Obr. 31 Příklad nastavení uživatelské matice v kameře Sony

Subjektivní metoda má v kolorimetrických měřeních výraznou úlohu zejména při zkoumání poloprofesionálních kamer, kde není možné měnit hodnoty matice a případně ani gamy či dalších parametrů. V těchto případech je nutné spolehnout se na zkušenosti s vyhodnocováním obrazového testu z vektorskopu nebo aplikovat srovnávací metodu, kdy je do blízké vzdálenosti od prosvětlovací skříně umístěn zobrazovač TVLogic LVM-242W a obraz s referenčním testem subjektivně porovnáván. Kamery, které je nutné hodnotit subjektivně, jsou nejčastěji využívány k internetové tvorbě ČT či jako doplňkové vybavení k natáčení reportáží. Presentace výsledků by měla obsahovat výsledný obrazový gamut v zobrazení vektorskopu, hodnoty nastavené uživatelské matice a případně také subjektivní hodnocení kolorimetrických vlastností zkoumné kamery.

4.5. Citlivost

Citlivost je dle normy EBU Tech 3281 měřena jako hodnota udávaného osvětlení na testu se známým činitelem odrazivosti tak, aby při kalibrované světelnosti objektivu byl na výstupu kamery signál v normované úrovni. V současnosti je tento parametr v ČT měřen ne zcela korektním způsobem. Nejdříve se kamera vyváží na bílou. V základním uspořádání je poté prosvětlovací koule nastavena na maximální intenzitu osvětlení. Pomocí clony objektivu se nastaví taková hodnota, aby signál odpovídající bílé dosahoval úrovně 700 mV. Prezentovaným výsledkem je pouze hodnota clony při úrovni 700 mV bez informace o úrovni osvětlení. Neměří se tedy citlivost absolutní, ale výsledek reprezentující clonu slouží pouze k možnému vzájemnému porovnání různých shodně změřených kamer. Vyhodnocování probíhá analogově v SD na VM 700A. Autor navrhuje odlišný postup vycházející z dokumentů EBU Tech 3335 a 3281 s vyhodnocováním v digitálním analyzátoru.

Kamera je vyvážena na bílou a černou (viz. kap. 4.4.). Zisk je nastaven na 0 dB, korekce rozptylu zapnutá, kolenová funkce vypnutá a gama vypnutá. Před prosvětlovací skříň není umístěn obrazový test (Obr. 32) a vyhodnocována je tak 100% úroveň rozptýleného světla, která odpovídá Lambertově zářiči. Kamera je záměrně rozostřena, aby došlo k upozadění vlivu případných skvrn či jiných nerovnoměrností. Na objektivu se nastaví clona f/5,6 a intenzita osvětlení se nastaví tak, aby úroveň signálu byla na WFM 8300 přesně 700 mV.¹ Signál se zkoumá v osciloskopickém zobrazení po stisku tlačítka *WFM* a úroveň je odečtena vertikálním kurzorem. Pomocí luxmetru se změří hodnota intenzity záření. V případě, že nelze dosáhnout při uvedené cloně úrovně 700 mV (např. u poloprofesionálních kamer), je změřena intenzita osvětlení při 50% úrovni (350 mV).

Zisk	0 dB	
Gama korekce	off	
Kolenová funkce	off	
Aperturová korekce	on	
Korekce rozptylu	on	
Clona	f/5,6	

Obr. 32 Citlivost – nastavení kamery a použitý obrazový test; upraveno [21]

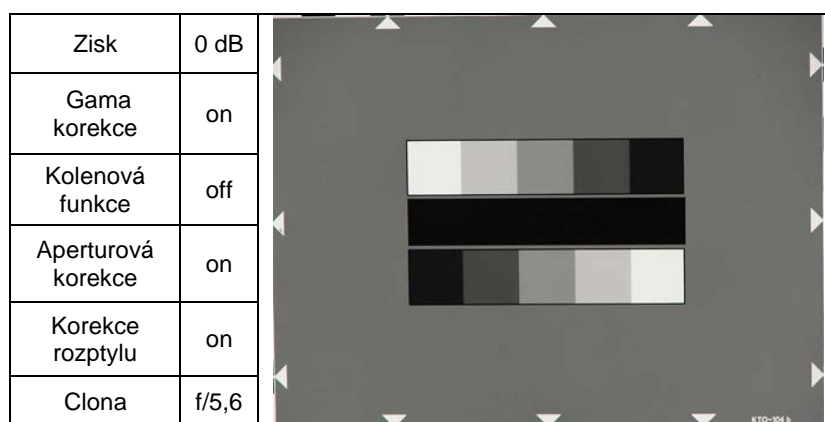
¹ Doporučení EBU R 118 z 3/2015 připouští jako výsledek měření hodnotu clony při 2000 lx a 700 mV

Prezentované výsledky musí obsahovat hodnotu intenzity osvětlení v luxech při cloně f/5,6 pro úroveň 100 % či 50 % a jakékoli nedodržené nastavení (např. u kamer bez možnosti vypnout gamu).

S citlivostí souvisí i parametr maximální citlivosti, který je definován dle EBU Tech 3281 jako nejmenší potřebné světlo k dosažení nominální úrovně výstupního napětí při definovaném nastavení kamery. Podmínky měření jsou shodné s předchozím případem, ale nastavení je odlišné v následujících parametrech. Zisk kamery je nastaven na maximální možnou hodnotu v dB a clona objektivu je co nejmenší, tzn. je zajištěna maximální světelnost. Následně se nastaví intenzita osvětlení prosvětlovací skříně, aby signál odpovídající bílé měl úroveň 700 mV. V ČT se tento parametr v současnosti neměří. Má ale důležitou výpovědní hodnotu, i když nepostihuje zhoršení kvality snímaného obrazu kvůli přepnutí na největší zesílení. Tento efekt zkoumají jiná měření (např. horizontální rozlišovací schopnost). Prezentované výsledky budou opět obsahovat hodnotu intenzity osvětlení v luxech při uvedené minimální cloně a dosažené úrovni 700 mV, respektive 350 mV.

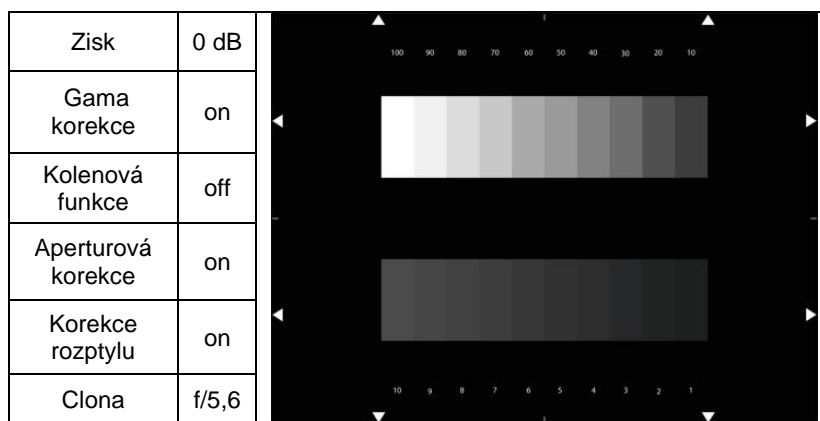
4.6. Přenosová funkce gama

Parametr gama je měřen v ČT ze dvou důvodů. Prvním je v případě poloprofesionálních kamer (u kterých je nastavení gamy nemožné) zjištění hodnoty korekce gama. Druhým a častějším případem je měření gamy kvůli kontrole věrohodnosti hodnot deklarovaných výrobcem kamery. V současnosti je parametr gama měřen analogově ve složkách RGB. Tento princip bude popsán společně s autorovým návrhem měření, kdy je gama zjištěna přímo z SDI.



Obř. 33 Gama – nastavení kamery a použitý obrazový test, varianta A [21]

Současný způsob měření gamy je následující. Kamera je umístěna v předepsané pozici. SDI výstup kamery je přiveden do Teranexu 3D. Zde je signál down-konvertován do SD SDI a přiveden na vstup analyzátoru Tektronix WFM 601a. Z něho jsou získány analogové výstupy GBR, které po řadě vstupují do ABC vstupů WM 700A. Na tomto analyzátoru je provedeno měření gamy díky rozšíření Option 21. Použitý testovací obrazec s logaritmickou křivkou hustoty sousedních políček je uveden na Obr. 33. Kvůli měřicímu algoritmu je tlačítkem Line Select vybrán řádek obsahující vzorky s vzestupnou úrovní jasu. Kamera musí být vyvážena na bílou (700 mV) a černou (50 mV pomocí nastavení master v kameře) při f/5,6. Zisk je nastaven na 0 dB, korekce rozptylu zapnutá, kolenová funkce vypnutá a gama pak logicky zapnutá. Pomocí tlačítka Measure je v menu vybrána záložka Video Option. Zde je dále vybrána možnost Camera Testing a možnost Gamma. Po stisku tlačítek A, B či C probíhá měření na zvoleném kanálu [32]. Dle EBU Tech. 3281 je doporučeným kanálem G. Detailnější možnosti nastavení je možné najít v manuálu k Option 21 v kapitole 3-35. Prezentovaným výsledkem bude hodnota exponentu výkonové funkce gama.



Obr. 34 Gama – nastavení kamery a použitý obrazový test, varianta B [21]

V době digitálních signálů je vhodné měřit gamu přímo z SDI signálu, kde nedochází k možným signálovým chybám vzniklým při přepočítávání a down-konverzi videosignálu do analogových složek. Autor navrhuje způsob měření, který vyhovuje principům z dokumentu EBU Tech. 3335. Použit je test s lineární křivkou hustoty sousedních polí (Obr. 34). Test obsahuje pruh s deseti poli a s propustností světla 1-10 % a druhý pruh s deseti poli s propustností 10-100 %. Kamera musí být vyvážena na bílou (700 mV) a černou (35 mV). Nastavení parametrů kamery je shodné s předchozím případem. Signál je z kamery přiveden na vstup WFM 8300. Stiskem *Line Sel* v režimu *VEC* je zvolen řádek obsahující gradační jasové pole.

Jelikož není možné exportovat hodnoty úrovní jasu řádku na USB a poté je zpracovat, je nutné odečíst hodnoty všech úrovní manuálně pomocí kurzorů. Kvůli absenci softwaru typu Matlab, byl pro zpracování využit software Microsoft Excel. V uvedeném softwaru byl vytvořen algoritmus pro výpočet gamy. Uživatel zadá pouze hodnoty naměřených úrovní a poté dojde k výpočtu exponentu výkonové funkce gama s uvedenou pravděpodobností a vykreslení grafu z naměřených a ideálních hodnot. Výpočet je založen na znalosti napěťových úrovní zvoleného obrazového testu a schopnosti nalézt nejvíce vyhovující předpis funkce s nejmenší odchylkou reálných dat. K výpočtu je využita metoda průměrné čtvercové chyby MSE (Mean Squared Error). Ze své podstaty vyjadřuje průměrnou čtvercovou diferencí relevantních hodnot jako

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2, \quad (21)$$

kde X je vypočítaná a Y změřená hodnota dané úrovně signálu [55].

Zvolený program je pro svou rozšířenost v ČT s naprosto dostačujícími funkcemi nejlépe vyhovující volbou. Sérií praktických měření byla prokázána správnost zvolené metody, jejíž výsledky byly díky měření původního signálu bez přepočtů nezkrácené (viz kap. 5).

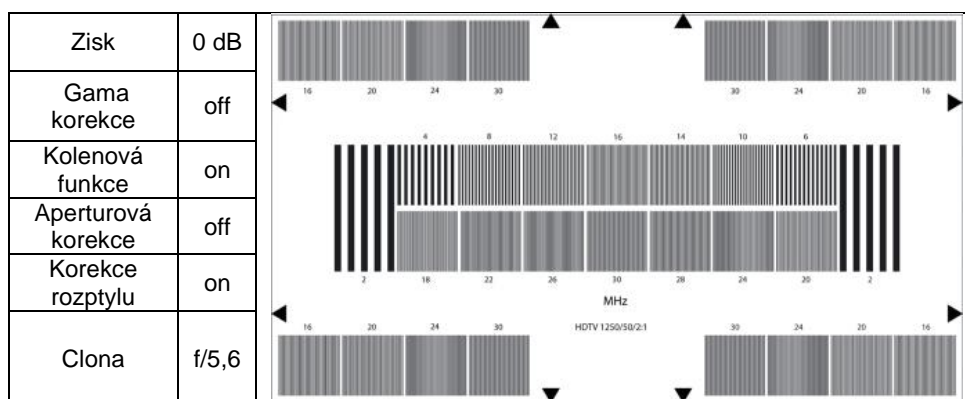
Prezentovaným výsledkem bude hodnota exponentu výkonové funkce obou metod. Dle doporučení EBU může být přiložen také graf s deklarovanou a změřenou křivkou korekce gama. Subjektivní metodu je možné provést za použití testu s velkým počtem vzorků s lineární křivkou hustoty (Saw-tooth). Pouhým okem je však přesná hodnota exponentu výkonové funkce nezjistitelná a proto subjektivní metoda na půdě ČT není doporučena.

4.7. Horizontální rozlišení

Horizontální rozlišení a zkoumání vlivu aliasingu je nedílnou součástí měření parametrů televizních kamer. V současnosti se toto měření v ČT provádí, výstupem je však pouze subjektivní hodnocení úrovně frekvenční odezvy. Postup a zvláště vyhodnocení je popsáno v této kapitole.

Kamera je vyvážena na bílou barvu o teplotě 3200 K. Zisk kamery je vypnut (0 dB), korekce rozptylu flare zapnutá, gama vypnutá, kolenová funkce zapnutá a detaily vypnuté. Úroveň bílé je intenzitou osvětlení nastavena na 700 mV. Podle doporučení Sony je praxí nastavovat hodnotu černé na 3 % signálu tzn. 21 mV.

Clona je nastavena na hodnotu $f/5,6$ podle EBU Tech 3281, i když novější EBU Tech 3335 doporučuje vyšší citlivost ($f/4,5$). Hlavním důvodem je zejména zachování kontinuity měření a vztažení výsledku k cloně, se kterou je prováděna většina testování. Použitým obrazovým testem pro analytické vyhodnocování je signál s obdélníkovým průběhem o různých frekvencích (Obr. 35). Hlavní vyhodnocení probíhá na frekvenci 30 MHz pro HD signály a 5 MHz pro SD signály. Vyšší frekvence jsou na testu umístěny jak vprostřed obrazu, tak v jeho rozích. Zkoumá se tak vliv optické části, konkrétněji chromatická aberace (čočka láme světlo o různých vlnových délkách odlišně). Kvůli zvolenému testu s obdélníkovým signálem může zkoumaný signál obsahovat harmonické složky. Naprosto nutné je co nejlepší zarámování zmíněného obrazce, a to zejména v jeho horizontální rovině, jinak by měřené frekvence neodpovídaly uvedeným hodnotám. Stěžejním předpokladem pro relevantní výsledky je co nejlepší zaostření objektivu.



Obr. 35 Horizontální rozlišení – nastavení kamery a použitý obrazový test [21]

Vyhodnocení probíhá na analyzátoru WFM 8300 v režimu osciloskopu (tlačítko *WFM*) na jasovém kanálu. Pomocí Line Sel je vybrán konkrétní řádek v obrazci. Nejdříve je zvolen řádek obsahující frekvence 2 až 16 MHz a poté druhý řádek s 18 až 30 MHz (pro HD signály s krokem 2 MHz). Pomocí kurzorů je změřena a zaznamenána úroveň signálu na jednotlivých prostorových frekvencích. Pro přesnější odečtení hodnot je doporučeno využít režim vertikálního zvětšení stiskem tlačítka *GAIN*. Odečteny budou jak hodnoty odpovídající bílé, tak hodnoty odpovídající černé. Při vypnuté gamě by měly vykazovat v grafu stejný trend. V případě nemožnosti vypnout gamu v poloprofesionálních či amatérských kamerách, je její vliv lehce detekovatelný. Změny úrovní signálu odpovídající bílé mají odlišný trend oproti trendu černé, který odpovídá hodnotě exponentu výkonové funkce gama. V případě možnosti nastavení detailů a aperturové korekce, je možné

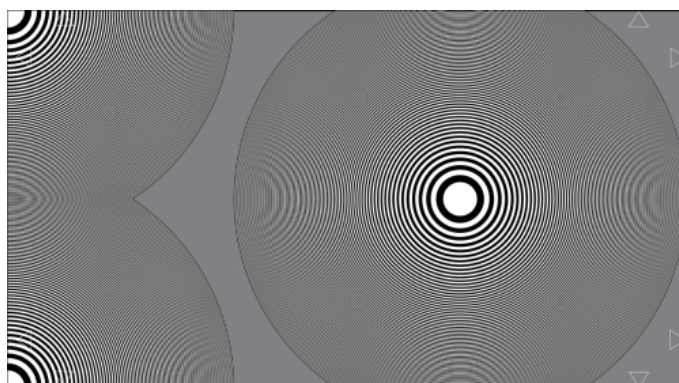
zkoumat jejich vliv na reprodukováný signál a případně také nalézt nastavení pro nejlepší možnou frekvenční odezvu. Měření je kromě středu obrazce provedeno i na jeho krajích. Případné odlišnosti v naměřených hodnotách či viditelné defekty budou uvedeny v protokolu. Pro SD signály je využit odlišný test s frekvencemi 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 4, 5 a 6 MHz.

Prezentované výsledky budou obsahovat procentuální hodnotu modulace signálu na prostorové frekvenci 30 MHz pro HD a 5 MHz pro SD signály. Ta je vypočtena ze vztahu

$$Modulace = \frac{A}{X} \times 100 , \quad (22)$$

kde X je amplituda signálu mezi úrovní vyvážené bílé a černé a A amplituda mezi těmito úrovněmi pro frekvenci 30 MHz [43].

Dále bude ve výsledném protokolu vložen graf závislosti CTF na prostorovém kmitočtu. V případě zapnuté gamy musí být tato skutečnost uvedena v protokolu. V protokolu je také možné uvést docílené ideální nastavení aperturové korekce a detailů. V protokolu bude uveden závěr subjektivního pozorování aliasingu. K tomu je využit test na Obr. 36, tzv. zonální test. Na monitoru je aliasing pozorovatelný v případě přítomnosti soustředných obrazců. Ty se mohou objevit v horizontálním, vertikálním a také diagonálním směru. Kamera tak není vybavená anti-aliasingovým optickým filtrem, a dochází tak vlivem nedostatečného vzorkování ke špatně reprodukované úrovni. Střední souměrnosti odpovídají vzorkovací struktuře senzoru. V protokolu bude také uveden závěr pozorování vlivu nastavení detailů v kameře. Při jejich zapnutí může docházet ke zvýšení úrovně/jasu některých prostorových (zejména středních) frekvencí. Při změně ostření je zkoumán vliv objektivu (přelévání jasu v reprodukováném obrazci).

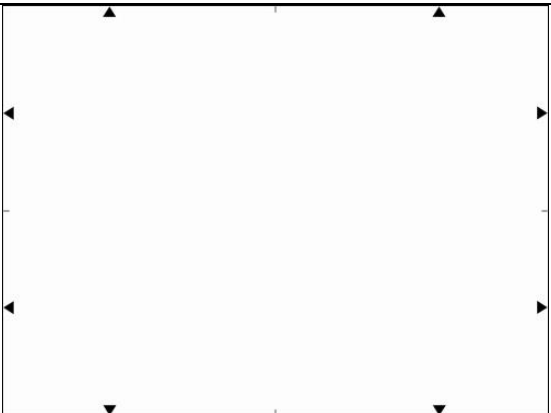


Obr. 36 Zonální test [21]

4.8. Defekty

Defekty ve struktuře snímače či v přenosové cestě od obrazového elementu mohou být dvojího typu. Zaprvé může element chybně generovat vysokou úroveň napětí při nízké intenzitě osvětlení, tzn. bílý pixel. Druhým případem je generování slabého náboje elementem, na který dopadá velké množství fotonů, tzn. černý pixel. Většinou je počet vadných pixelů malý. Pravděpodobnější je jejich výskyt v levnějších kamerách, kde mohou být použity čipy z krajních ploch waferu (křemíková polovodičová deska pro výrobu čipů). V určitých podmínkách může být okem detekovatelný i jediný vadný pixel v obraze.

Měření je nutné provádět při dvou různých nastaveních. Při zcela zcloněném objektivu a při 50% úrovni signálu bílé. Vyhodnocování je teoreticky možné provádět v osciloskopickém zobrazení na video-analyzátoru. V praxi je však manuální zkoumání 1080 řádků pro HD signál neproveditelné. Proto je výhodné využít možnosti Option 21 a měřit defekty automaticky analyzátozem WM700A. Měření bude probíhat ve všech kanálech RGB zvlášť. Logickou nevýhodou je nutný přepočít digitálního signálu do složkového analogového signálu v SD rozlišení. I přes to je tento postup nejvýhodnější.

Zisk	0 dB	
Gama korekce	on	
Kolenová funkce	on	
Aperturová korekce	on	
Korekce rozptylu	on	
Clona	f/5,6	

Obr. 37 Defekty – nastavení kamery a použitý obrazový test; upraveno [21]

Kamera je vyvážena na bílou (700 mV). Černá je vyvážena na 14 mV, přípustná je podle doporučení Sony také hodnota 20 mV. Zisk kamery je vypnut, korekce rozptylu zapnutá, aperturová korekce zapnutá, gama a kolenová funkce zapnuté. Dále je důležité vypnout detaily a rozostřit objektiv. Signál SDI/HDMI je v Teranex 3D přepočítán do SD normy a analyzátozem Tektronix 601 rozložen do GBR složek, které vstupují po řadě do vstupů ABC. V záložce *Camera testing* je vybrána položka *Defects*. V nastavení je stěžejní položkou *Threshold* [32]. Jde o minimální úroveň odchylky amplitudy signálu od průměrné hodnoty, kdy je pixel

vyhodnocen jako vadný. Vyhodnocovací úrovně jsou různé pro jednotlivé kanály. Nejprísnější je logicky rozhodovací úroveň u kanálu zeleného – 7 mV. Červený kanál má danou vyhodnocovací úroveň 14 mV a modrý s nejvyšší tolerancí 25 mV. V praxi jsou okem detekovatelné odchylky od 20 mV v zeleném kanálu a 40 mV v modrém. Po spuštění měření je do paměti analyzátoru načteno 32 snímků, ty jsou zprůměrovány a je odstraněn vliv vinětace objektivu. Počet, poloha a úroveň odchylky vadných pixelů jsou uvedeny na obrazovce analyzátoru. Měření je opakováno pro ostatní kanály a podruhé pro 50 % úroveň signálu. Subjektivně metoda zahrnuje následující postup. Při zacloněném objektivu je jas uživatelského monitoru a kontrast nastaven na maximum. Pozorována je pak uniformní černá plocha s důrazem na bílé pixely. U zkoumání v šedé jsou pak logicky vyhledávány tmavé pixely. Metoda je doplňkem k analytické metodě, kdy je ověřena detekce defektu lidským okem. Profesionální kamery mohou obsahovat softwarové odstranění vadného pixelu na principu interpolace (dopočítání napěťové úrovně ze sousedních pixelů). Nastavení korekce vadného pixelu může být manuální či automatické.

Prezentované výsledky budou obsahovat počet detekovaných vadných pixelů v jednotlivých kanálech při daných úrovních. V případě pozitivního nálezu je poloha defektu zanesena do protokolu a změřena jeho úroveň. V případě, že byla realizována softwarová interpolace, je tato skutečnost uvedena v protokolu. Kvalita interpolovaných vadných pixelů je také okomentována.

4.9. Šumové vlastnosti

Měření šumových vlastností televizních kamer je důležitou součástí jejich zkoumání. V rámci této kapitoly budou popsány dva způsoby měření šumu, přičemž první z nich je v současnosti využíván v ČT, je však potřeba dodržet správná nastavení kamery. Oba způsoby vycházejí z doporučení organizace EBU.

K prvnímu měření šumu je využíván analyzátor WM 700A. Opět je tedy nutné SDI signál přepočítat do SD analogových složek RGB, ve kterých probíhají jednotlivá měření. Analyzátor k výpočtu šumu využívá digitální zpracování signálu a analýzu frekvenčního spektra. Signál na počátku vstupuje do A/D převodníku a je pomocí FFT (Fast Fourier Transform) převeden do frekvenčního vyjádření. Z komplexního spektra je vypočteno výkonové spektrum a následně jsou aplikovány softwarové frekvenční filtry. Výpočet probíhá z 512 vzorků/řádek signálu a z 32 po sobě jdoucích

snímků. Měření je tedy nenáhodný šum (viz kap. 3.2.3.) neboli šum pevné struktury snímače (Fixed Pattern Noise). Zprůměrováním 32 snímků je docíleno odstranění vlivu náhodného šumu. Výsledný nenáhodný šum je vyjádřen v decibelové míře jako poměr nominální úrovně signálu (700 mV) a efektivní úrovně výkonu šumu RMS (Root Mean Square). V praxi by odstup signálu od šumu neměl být horší než -54 dB.² K měření je využíván filtr typu dolní propust 5 MHz, který odstraní složky nad touto hladinou. Z dostupných filtrů je pro odstranění nízkofrekvenčního šumu využit filtr HP (High Pass) s prahem 100 kHz dle doporučení CCIR Rec.567. Samotné měření probíhá se zaklapovaným objektivem v černé (35 mV), protože nerovnoměrnost v bílé nemá zásadní význam. Zisk je nastaven na 0 dB, gama korekce vypnutá, korekce rozptylu zapnutá a kolenová funkce vypnutá. Teplota má vliv na výsledky měření, je proto doporučeno měřit kameru v ustáleném stavu. Měření by mělo probíhat alespoň na třech různých řádcích senzoru s odlišnou vertikální pozicí. V případě odlišnosti výsledků se výsledné hodnoty zprůměrují. V záložce *Camera testing* je vybrána položka *Video option* a v ní položka *Component Noise*. Pomocí *Filter Selections* jsou vybrány výše zmíněné filtry. Aktivací *Remove Shading* se odstraní vliv vinětače. Výběrem z možností *Spectrum*, *Histogram* a *Expand* je zvolen režim zobrazení displeje [32]. Vyhodnocování probíhá v SD režimu v přepočítaném složkovém signálu, a tudíž v omezeném frekvenčním pásmu. Tento způsob měření zanáší do procesu řadu možných nepřesností. Vlivem absence měřicího přístroje pro šumové vlastnosti HD signálů je však tento postup nadále doporučen, protože i přes možné nepřesnosti poskytuje relevantní výsledky s vypovídající hodnotou.

Prezentované výsledky budou obsahovat hodnoty nenáhodného šumu v jednotlivých kanálech RGB. Bude zaznamenáno nastavení gamy (v případě, že nelze vypnout), protože zapnutá korekce negativně ovlivňuje výsledek měření.

Druhý způsob měření šumových vlastností vede dle EBU Tech 3335 k vyjádření šumu pomocí parametru PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)

$$PSNR = 20 \log \left(\frac{V_{noise}}{V_{peak}} \right) - 17 dB , \quad (23)$$

kde parametr V_{peak} představuje napětí signálu odpovídající bílé, tzn. 700 mV [43]. Hodnota 17 dB pak odpovídá aproximaci náhodného šumu v kameře. Konečně parametr V_{noise} je rozptyl signálu špička-špička. Ten je odečten z WFM 8300 pomocí

² Dokument EBU R 118 z 3/2015 doporučuje hodnoty SNR lepší než -50 dB až -40 dB dle typu kamer

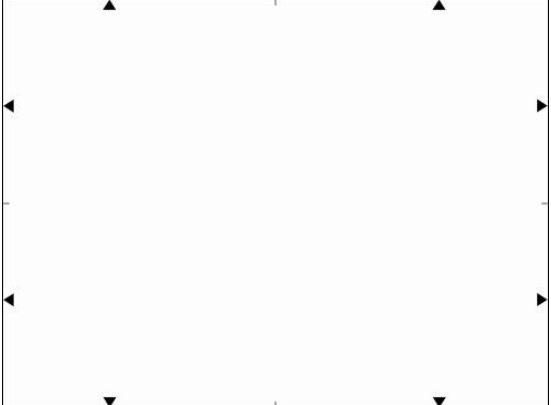
kurzorů. Nastavení kamery je odlišné od prvního způsobu. Objektiv je namířen do prosvětlovací skříně a clona je z důvodů návaznosti na ostatní měření nastavena na $f/5,6$. Intenzita osvětlení je zvolena tak, aby produkovala asi 218 mV v případě, že lze korektor gama vypnout. Pokud tak nelze učinit, je nutné nastavit intenzitu osvětlení tak, aby signál dosahoval úrovně 50 % (tomu odpovídá 218 mV před korekcí). Zmíněné hodnoty jsou vhodné pro gamu 0,45 dle doporučení ITU-R 709. V případě jiné gamy, by měla být cílová hodnota signálu dopočítána ze známé hodnoty exponentu výkonové funkce. Objektiv by měl být rozostřen a měření probíhá na jednom řádku pomocí *Line Sel*. Zjištěná hodnota PSNR bude součástí výsledného měřicího protokolu.

Varianta	A	B
Zisk	0 dB	0 dB
Gama korekce	off	on/off
Kolenová funkce	off	off
Aperturová korekce	off	off
Korekce rozptylu	on	on
Clona	-	$f/5,6$

Tab. 4 Šumové vlastnosti – nastavení kamery

4.10. Nerovnoměrnost v bílé

Nerovnoměrnost v bílé je dle EBU Tech 3281 měřena jako největší rozdíl v úrovních bílé v různých částech obrazu. V ČT se měří odlišným způsobem než dle uvedené normy. Intenzita osvětlení prosvětlovací skříně je stáhnuta na minimum a clonou je úroveň bílé nastavena na 700 mV. Vyhodnocení probíhá subjektivně.

Zisk	0 dB	
Gama korekce	on	
Kolenová funkce	on	
Aperturová korekce	on	
Korekce rozptylu	on	
Clona	min	

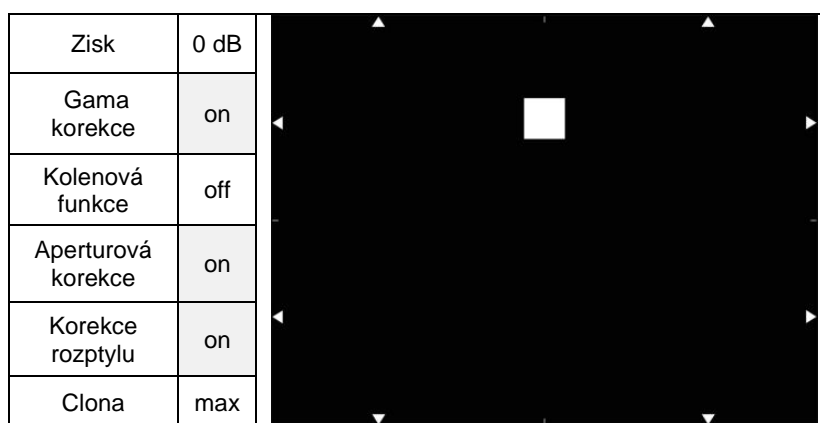
Obr. 38 Nerovnoměrnost – nastavení kamery a použitý obrazový test; upraveno 21

V návaznosti na metodu uvedenou EBU Tech 3281 je navržen následující postup. Kamera je namířena do prosvětlovací skříně bez obrazového testu a vyvážená na černou a bílou. Zisk je nastaven na 0 dB. Korekce rozptylu, aperturová korekce, gama a dynamická funkce zapnutá. Clona je zcela otevřena. Intenzita osvětlení je upravena tak, aby signál bílé dosahoval 700 mV. Transfokátor je ideálně nastaven do střední polohy. Signál je odečítán na analyzátoru WFM 8300 v režimu WFM s deaktivací *Line Sel.*

Prezentovaným výsledkem bude nejvyšší hodnota rozptylu v procentech nominální úrovně signálu. V protokolu může být přítomen snímek průběhu signálu z WFM 8300.

4.11. Blooming, Smearing

Zkoumání obou artefaktů v obraze je smysluplné jen u kamer s CCD snímači. Ve snímačích s technologií CMOS nemohou tyto defekty vzniknout z podstaty této technologie. Blooming představuje “rozlití” náboje do sousedních pixelů v případě silného zdroje světla a naplnění potenciálové jámy pod elektrodou. Smearing pak představuje akumulaci dopadajícího světla při sloupcovém vyčítání nábojů. Projevuje se jako bílá vertikální linie. Moderní senzory by měly obsahovat anti-bloomingový filtr a nedovolit vznik smearingu.



Obr. 39 Blooming, smearing – nastavení kamery a použitý obrazový test [21]

K měření je dle EBU Tech 3281 doporučen černý obrazový test se čtvercovým výřezem o rozměru desetiný výšky obrazu. Kamera je vyvážena na bílou 700 mV a černou 35 mV. Zisk kamery je nastaven na 0 dB, korekce rozptylu a gama je zapnutá a kolenová funkce vypnutá. Clona je nastavena na co nejvyšší hodnotu, při které je pomocí prosvětlovací komory možné dosáhnout nominální hodnoty úrovně bílé. Obraz je zkoumán na monitoru. Dle uvedeného dokumentu EBU jsou šmouhy patrné okem již při změně úrovně signálu černé o 3,5 mV. Vyhodnocování na WFM

8300 probíhá na jednom řádku. Pomocí *Line Sel* je zvolen řádek blízký poloze čtvercového výřezu a zkoumána jeho úroveň. V ČT je měření těchto vlastností prováděno pouze triviální subjektivní metodou, kdy je úzký paprsek světla s vysokou intenzitou namířen přímo do objektivu kamery. Na měřicím monitoru se defekty subjektivně vyhodnocují. Neměly by být pozorovatelné známky uvedených artefaktů v horizontálním ani vertikálním směru. Subjektivní zhodnocení a případné úrovně “šmouhy” získané objektivní metodou budou uvedeny v měřicím protokole. U profesionálních kamer by měly být oba artefakty nepozorovatelné.

4.12. Infračervená odezva

Obrazový senzor by měl akumulovat světlo pouze ve viditelném spektru (370-760 nm). Infračervené zdroje světla by se tak v reprodukováném obrazu neměly projevit. Toho je docíleno vložením optického filtru do cesty světelného paprsku. Přítomnost a kvalita tohoto filtru je zkoumána následujícím měřením. V současnosti není toto měření v ČT realizováno. V návaznosti na doporučení EBU a možné problémy s případnou odezvou na infračervený zdroj je však doporučeno toto měření aplikovat. Zdroj infračerveného záření je namířen do objektivu kamery ze vzdálenosti 30 cm od ústí objektivu. Použita je infradioda v dálkovém ovladači s vlnovou délkou 940 nm, která vyzařuje výkonem 30 mW/Sr. Prosvětlovací skříň i další zdroje světla jsou vypnuty. Zisk je nastaven na 0 dB, korekce rozptylu i gama zapnutá. Na analyzátoru WFM 8300 je v režimu osciloskopu pozorována úroveň signálu. Měření se provádí na celém snímku, ne pouze na jednom zvoleném řádku. Vyhodnocením úrovně signálu na obrazovce analyzátoru a subjektivním pozorováním obrazu na monitoru je rozhodnuto, zda kamera reaguje na infračervený zdroj světla, a případně je také zaznamenána úroveň signálu.

Zisk	0 dB
Gama korekce	on
Kolenová funkce	off
Aperturová korekce	on
Korekce rozptylu	on
Clona	f/5,6

Tab. 5 Infračervená odezva – nastavení kamery

V měřicím protokolu bude uveden závěr pozorování, zda kamera produkuje infračervenou odezvu. V případě že ano, bude v protokolu uvedena také hodnota signálu, kterou vybudí zmíněný zdroj záření ze vzdálenosti 30 cm. K protokolu může být přiložen graf odezvy.

5. Praktické měření parametrů televizních kamer

V následující kapitole bude prakticky aplikována navrhovaná metodika měření, která je popsána v předchozí kapitole této práce. Měření byla realizována na půdě ČT s technickým vybavením popsaným taktéž ve zmíněné kapitole. Autor práce prováděl měření pod dohledem zaměstnanců oddělení video-inženýringu ČT pány Zdeňkem Linzmajerem a Martinem Štulíkem. Autor po konzultaci s vedoucím práce vybral tři kamery, které se svým zaměřením a změřenými parametry výrazně odlišují.

5.1. Sony HDC-1700

První měřenou kamerou, která byla vybrána pro praktickou část této práce, je multi-formátová přenosná HD kamera Sony HDC-1700. Jedná se o nový model (Q1 2015) se třemi 2/3" CCD čipy, 16bitovým A/D převodníkem a podporovanými HD formáty 1080/50i, 1080/59,94i, 720/50p a 720/59,94p. Uživateli je dovoleno měnit nastavení stěžejních parametrů (např. Gama, Flare korekce, Knee Function), výhodou je pak zejména manuálního nastavení hodnot RGB matic. Kamera byla osazena HD širokoúhlým transfokátorem Fujinon 450288 pro kamery s 2/3" čipem. Má 14x optický zoom a nejvyšší světelnost f/1,8 [37]. Jde o kus z celkové objednávky ČT, která zahrnovala těchto deset stejných kamer pro účely modernizace studia KH 14, které bude v létě 2015 zmodernizováno z SD do HD standardu. Společně s kamerami bylo dodáno deset kamerových jednotek CCU (Camera Control Unit) HDCU-1700. Ty slouží ke spojení kamery s režii (až 2000 m) a jejímu napájení. Obsahují několik SDI, audio a referenčních výstupů. Přes samotnou jednotku je možné provádět nastavení kamery buď manuálně hardwarovými tlačítky nebo pomocí vzdáleného ovládání RCU (Remote Control Unit), která slouží k ovládání kamery z režie či jiných, od kamery vzdálenějších míst. RCU je s CCU propojena speciálním kabelem s osmi piny. K realizaci měření bylo využíváno výhradně nastavování pomocí RCU. Ovládání přes CCU i samotnou kameru bylo méně efektivní.

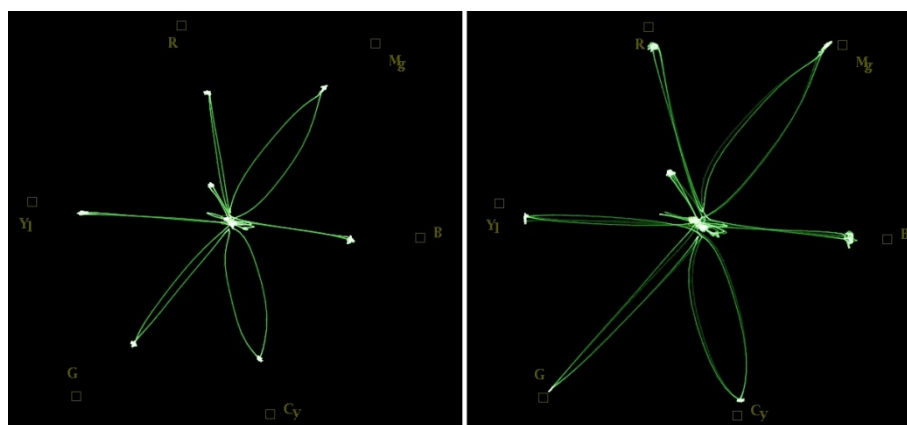


Obr. 40 Sony HDC-1700 a CCU HDCU-1700 [22]

Kamera byla s CCU spojena standardizovaným optickým kabelem SMPTE FC. Z kamerové jednotky byl vyveden HD SDI kabel do náhledového monitoru z tzv. SDI Super-výstupu. Jde o výstup, který do obrazové informace vykresluje také uživatelské menu. Standardním HD výstupem pak byla propojena CCU s analyzátozem WFM 8300. Konečně RCU jednotka byla spojena 8pinovým konektorem s CCU.

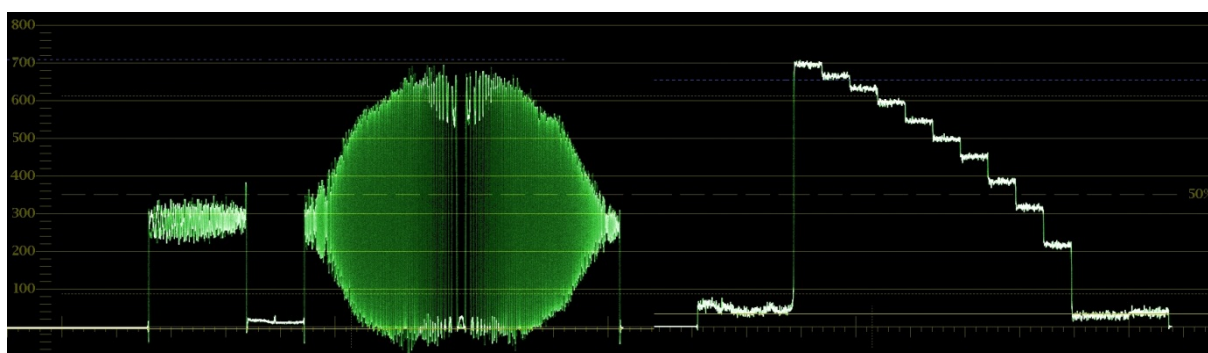
Testování charakteristik digitálního signálu nevykazovalo žádné nevyhovující hodnoty. Kvalita signálu byla ověřena pro samotnou kameru, kdy bylo spojení s CCU vynecháno, a kamera tak byla spojena přímo s WFM 8300. Druhé testování probíhalo v provozním zapojení s CCU. Kontrola kvality signálu po průchodu optickým i SDI kabelem taktéž neodhalila nevyhovující hodnoty. Subjektivní trojný průběh signálu v oku rozhodnutí tak na správné vyhodnocování neměl vliv.

Kolorimetrické charakteristiky byly měřeny na obrazovém testu s pleťovou barvou. Korekce gama byla pomocí RCU nastavena na standardních 0,45, Master black na hodnotu 0, kolenová funkce zcela vypnutá. Pomocí manuálního nastavení v kameře byly vypnuty všechny funkce ovlivňující kolorimetrické vlastnosti (např. Saturation). Matice byla zapnuta a z předdefinovaných nastavení (*Preset*) vybrána matice ITU-709. Hodnota *Level* v záložce *User matrix* byla nastavena na hodnotu 0. Výsledný gamut nebyl ideální, a muselo tak dojít k manuálnímu nastavení hodnot uživatelské matice. Hodnoty matice jsou uvedeny v měřicím protokole v příloze A této práce. Kolorimetrické charakteristiky s nastavením matice ITU-R 709 a po kalibraci barevného podání jsou uvedeny na Obr. 41. Měření infračervené odezvy potvrdilo předpoklady o přítomnosti filtru. Při splnění metodických postupů kamera negenerovala žádnou detekovatelnou signálovou odezvu na infračervený zdroj záření.



Obr. 41 Sony HDC-1700 – původní (vlevo) a docílené barevné podání

Citlivost měla tato kamera ze všech zkoumaných zařízení nejlepší. Díky přítomnosti tří 2/3" obrazových CCD sensorů je toto zjištění očekávatelné. Hodnoty jsou uvedeny v příloženém protokolu. Korekce gama pro uváděnou hodnotu 0,45 byla podrobena dvěma měřeními. Původním postupem s vyhodnocením na WM 700A byla změřena hodnota exponentu výkonové funkce 0,47. Metodou uvedenou v kap. 4.6. pak manuálním odečítáním hodnot a následným výpočtem vyšla hodnota 0,49. Oba výsledky tak s tolerovanou odchylkou vyhovují výrobcem deklarované hodnotě. Existence efektu bloomingu a smearingu nebyla při měření detekována analyticky ani subjektivně. Měření defektů neprokázalo přítomnost žádného vadného pixelu v senzorech RGB. Na tuto skutečnost může mít vliv interpolace v softwaru kamery.



Obr. 42 Sony HDC-1700 – frekvenční odezva na zonální test (vlevo) s rovnoměrným rozložením a odezva kamery na lineární test s nastavenou hodnotou gamy 0,45 (vpravo)

Hodnoty šumu i frekvenční odezvy na 30 MHz byly na velmi dobré úrovni. Při zkoumání odezvy kamery na zonální test nebyla zjištěna nerovnoměrnost frekvenčního podání vlivem vlastností objektivu (plocha s vyšším jasnem středově souměrná). Kamera vykazovala obecně nejlepší výsledky z měřených kamer. Ty tak potvrdily profesionální zaměření kamery s vysokou kvalitou snímání. Měření neobjevilo skutečnosti, které by neumožňovaly využít kameru v profesionálních podmínkách v televizním studiu, a bránily tak v zakoupení tohoto zařízení. Kompletní naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze A této práce.

5.2. Panasonic AG-AC90

Druhou měřenou kamerou vybranou pro praktickou část je poloprofesionální ruční kamkodér AG-AC90 od firmy Panasonic. Kamera obsahuje tři CMOS obrazové snímače o velikosti 1/4,7" se zpětným osvětlením BSI. Kromě komprimovaného záznamu na paměťové karty ve formátu AVCHD (Advanced Video Coding High Definition) je kamera opatřena komponentními obrazovými výstupy (rozhraní AV Multi) a HDMI s podporovanými formáty 1080p, 1080i a 576p. Kamera je osazena transfokátorem s 12x optickým zoomem a maximální světelností f/1,5 až f/2,8 v závislosti na pozici transfokátoru. Kamkodér umožňuje manuální ostření, přiblížení i manuální nastavení clony. Kameru je možné vyvážit na bílou s teplotou 5600 K a 3200 K, možnost vyvážení černé chybí. Ovládat kameru lze kombinací hardwarových tlačítek a dotykové 3,5" obrazovky. Připojit lze externí mikrofon pomocí XLR konektoru [38]. Kamera byla zapůjčena od Katedry radioelektroniky na FEL ČVUT pro potřeby této práce a měřena byla navrženými metodickými postupy na půdě ČT.

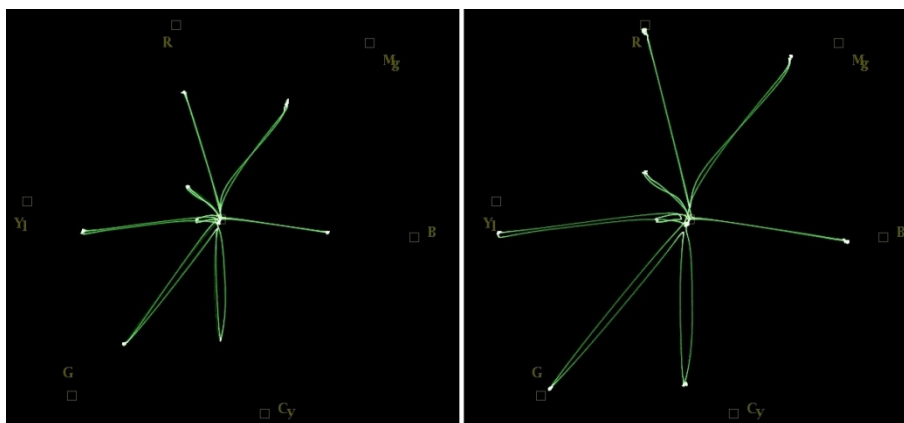


Obr. 43 Panasonic AG-AC90 [23]

Měřicí stanoviště mělo charakter základního rozestavení (viz kap. 4.2.). K měření charakteristik kamkodéru byl využit HDMI výstup s nastavením formátu obrazu 1920x1080i. Z důvodů nemožnosti měřit charakteristiky HDMI signálu přímo, byl využit konvertor HA5 od firmy AJA Video Systems, který přepočítává signál do standardu SDI. Společné nastavení kamery pro všechny typy měření zahrnovalo následující kroky. Ostření i ovládání clony bylo nastaveno na manuální režim. Vyvažování bílé bylo nastaveno na 3200 K a stabilizátor obrazu vypnut. Rozlišení HDMI bylo přenastaveno na 1080i s poměrem stran 16:9. V záložce *Camera Setup* byly prováděny úpravy pro jednotlivá měření. Kamera umožňuje nastavovat úroveň detailů, sytost i barevný tón, master black a čtyři možné matice. Kolenovou funkci nelze zcela vypnout, nastavena tak byla na hodnotu *Low*. Korekci gama také nelze zcela vypnout. Využívána tak byla předvolba *HD Norm* a *Low*.

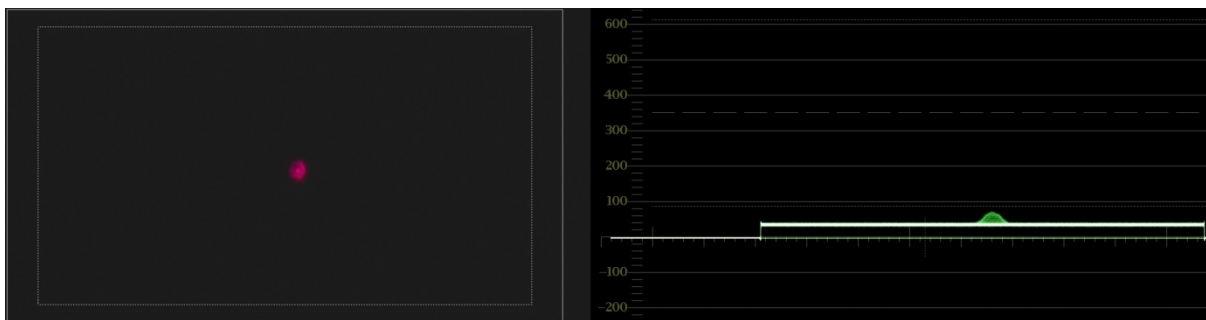
Parametry digitálního signálu byly měřeny po konverzi HDMI-SDI. Signál nevykazoval i přes vizuálně zdvojený průběh v oku rozhodnutí žádné nepřipustné hodnoty. Lze tedy předpokládat, že ani původní signál neobsahuje žádné charakteristiky v digitální doméně, které by se na výstupu kamery neměly objevovat.

Kolorimetrické vlastnosti byly zkoumané na obrazovém testu s pleťovou barvou. Gama byla v kameře nastavena na *HD Norm*, kolenová funkce na *Low* a clona na *f/5,6*. Hodnota Master Black pod záložkou *Master Ped* byla pro výchozí stav nastavena na hodnotu 0. Matice byla s ohledem na kvalitu výstupu nastavena na *Norm1*. Hodnoty pro nastavení sytosti a barevného tónu byly nastaveny taktéž na hodnotu 0 (záložky *Chroma level* a *Chroma phase*). V takovémto výchozím stavu měla kamera značně omezený gamut. Barevný tón měl v doplňkových barvách horší přesnost fáze než základní barvy. Pomocí výše uvedených nastavení bylo možné zlepšit barevné podání kamery a zvýšit její gamut. Příslušné hodnoty jsou uvedeny v měřicím protokole. Nastavení probíhalo s preferencí věrohodného podání zeleného kanálu. Porovnání původního a docíleného barevného podání v režimu vektorskopu je ilustrováno na Obr. 44.



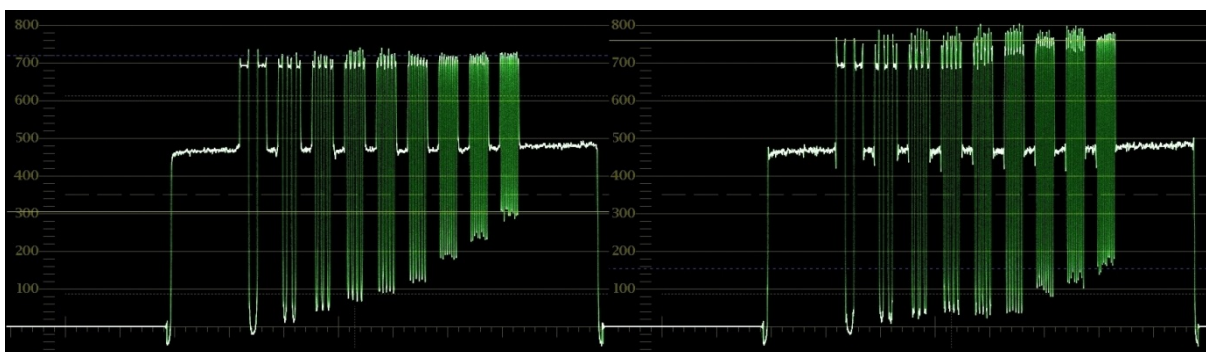
Obr. 44 Panasonic AG-AC90 – původní (vlevo) a docílené barevné podání

V rámci zkoumání frekvenční odezvy bylo provedeno také měření se zonálním obrazovým testem. Nebyla zjištěna nestandardní vlastnost optické cesty (nejsvětlejší pole středově souměrné) ani nijak výrazný vliv aliasingu, jehož efekt se objevoval pouze slabě na horizontále, vertikále a diagonále. Kromě měření horizontální rozlišovací schopnosti HD signálu byl změřen i SD signál. V rámci tohoto měření byl zkoumán vliv zapnutí detailů a zejména pak vliv gamy, kdy došlo k „zvýraznění“ tmavých částí. Výstup měření horizontálního rozlišení je uveden v příloženém protokole. Černá byla dle navržené metodiky vyvážena na úroveň 21 mV.



Obr. 45 Panasonic AG-AC90 – infračervená odezva (vlevo) a signálová interpretace (vpravo)

Citlivost byla ve srovnání s profesionálními televizními kamerami poměrně malá. Naměřená hodnota je ale vzhledem k velmi odlišným rozměrům použitých čipů očekávatelná. Kamera má rovnoměrné podání bílé, použitý objektiv tak neznehodnocuje výsledný obraz. Měření bloomingu a smearingu nebylo z hlediska použité technologie CMOS relevantní zkoumat. Kamera generovala odezvu na infračervený zdroj světla. Z její úrovně lze předpokládat přítomnost filtru, který však zcela nezabraňoval průchodu vlnění (Obr. 45). Při zkoumání defektů ve struktuře snímače byl nalezen jediný vadný pixel. Jeho úroveň však byla lidským okem zcela nedetekovatelná.

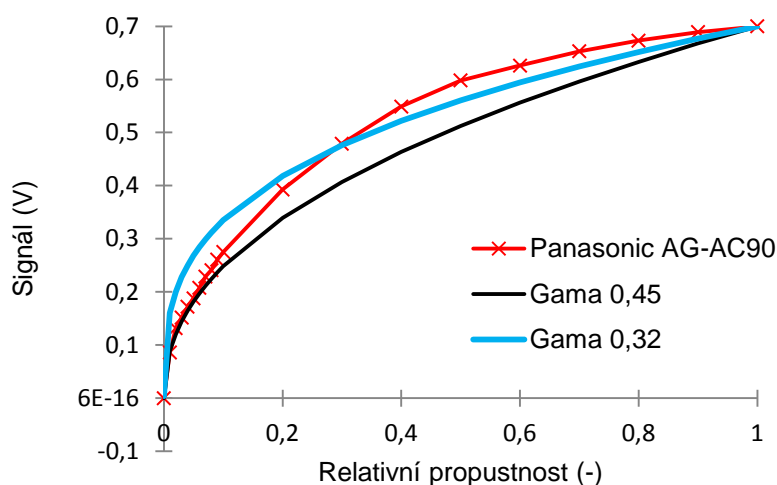


Obr. 46 Panasonic AG-AC90 – SD frekvenční odezva s gama *LOW* (vlevo) a gama *HD Norm* (vpravo)

Měření byla podrobena také korekce gama. Z nabídky předvoleb byla zvolena možnost *HD Norm*. Díky tomuto označení byla očekávána hodnota exponentu výkonové funkce kolem standardních 0,45. U měření pomocí metody s automatickým vyhodnocováním byl výsledkem exponent s hodnotou 0,67. U metody s manuálním odečítáním úrovní přímo ze signálu SDI a následným výpočtem hodnoty MSE vyšel nejpravděpodobnější exponent 0,32. Oba výsledky jsou na první pohled velmi odlišné, a bylo tedy nutné najít příčinu takové difference.

Jako nejpravděpodobnější se jeví nedostatečné splnění definovaných nastavení kamery pro měření. Hlavním důvodem tak může být nemožnost vypnutí dynamické kolenové funkce v kameře. Ta i přes neznámý charakter (výrobce

neudává) může velmi významně měnit výstupní úroveň a výsledky pak ztrácí věrohodnost. Dalším důvodem může být charakter předpisu funkce gamy, který koresponduje s nastavením *HD Norm*. Funkce může obsahovat například neznámou hodnotu offsetu. Správná klasifikace exponentu gama je tak těžko dosažitelná. Na Obr. 47 je uveden graf, ve kterém je vykreslena křivka odpovídající gamě 0,45, křivka naměřených hodnot a konečně nejpravděpodobnější průběh zjištěný pomocí metody MSE. Z grafu je na první pohled zřetelná velká chyba odhadu, způsobená nejspíše výše zmíněnými skutečnostmi.



Obr. 47 Graf změřených hodnot (červený), průběhu aproximované gamy (modrý) a ideálního průběhu pro 0,45 (černý)

Vypracovaný měřicí protokol je přiložen v příloze B, kde jsou uvedeny kompletní naměřené hodnoty. Výsledky měření kamery Panasonic AG-AC90 potvrdily její zařazení do segmentu amatérských/poloprofesionálních kamkodérů. Mezi pozitiva je možné zařadit kvalitní objektiv a mezi negativa malou citlivost, vyšší šum a malý přednastavený barevný gamut. Ostření v praxi také není zcela přesné v případě manuálního ovládání.

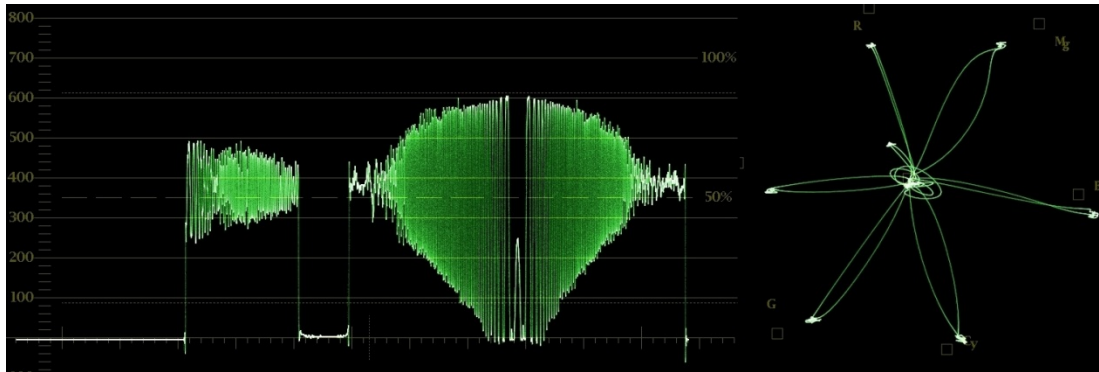
5.3. Canon XA20

Třetí vybranou kamerou pro účely této práce je digitální kamkodér s amatérským/ poloprofesionálním zaměřením, vlastnostmi a omezenými funkcemi – Canon XA 20. Kamera byla dodána k měření oddělením Nových médií v České televizi. Zařízení je plánováno využívat k natáčení příspěvků na web, a není tak nutné, aby dosahovalo kvalit profesionálních kamer. Kamkodér je osazen pouze jedním CMOS obrazovým senzorem o velikosti 1/2,84" s Bayerovskou maskou. Kromě komprimovaného záznamu na karty ve formátu AVCHD (Advanced Video Coding High Definition) a MP4 je kamera opatřena HDMI výstupem ve formátu 1080p. Komponentní obrazový výstup či SDI není k dispozici. Objektiv je nevyměnitelný s 20x optickým zoomem a nejlepší clonou f/1,8 až f/2,8 (dle nastavení zoomu). Rozsah clonových čísel je mezi f/1,8 až f/8. Kamkodér umožňuje manuální ovládání clony i ostření. Kamera bohužel neumožňuje základní profesionální nastavení parametrů gama, aperturové korekce či kolenové funkce. Zisk kamery je možné nastavit v rozmezí 0 až 24 dB. Časový kód je možné vložit do obrazu výstupu HDMI [54].



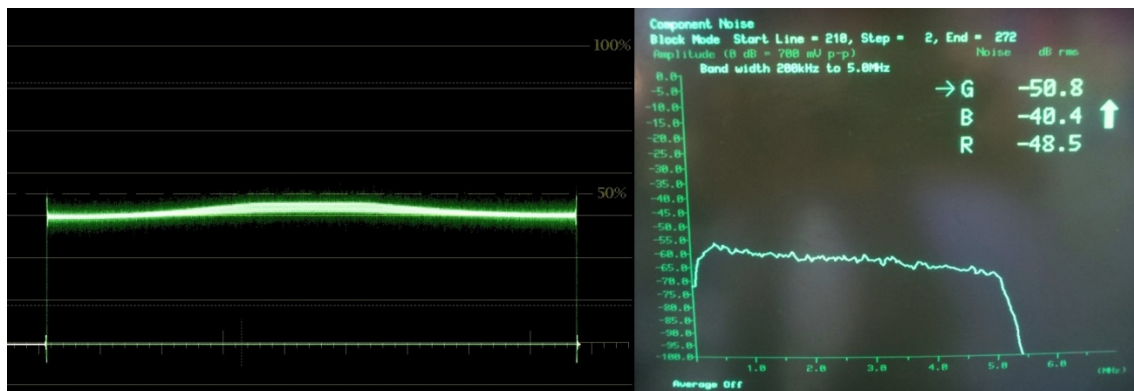
Obr. 48 Canon XA20 [24]

Kvůli nemožnosti měřit přímo signál z HDMI konektoru bylo nutné opět využít konvertor AJA HA5. Kamera byla nastavena k základnímu měření následovně. V módu *Camera* byla zvolena možnost *Manual* (ovládání clony, expozice a ostření). Pomocí dotykové obrazovky byly hodnoty jasu, kontrastu, ostrosti (detailů) a barevné hloubky nastaveny na neutrální hodnoty. Zisk byl nastaven na 0 dB a doba expozice na standardních 1/50. Kamera byla poté pro samotné měření vyvážena pomocí tlačítek *FUNC* a *White Balance*. Teplota vyvážení bílé není v kameře uvedena. V rámci zkoumání kvality fyzické vrstvy nebyly nalezeny nevyhovující parametry. Náběžné a sestupné hrany byly však velmi “pomalé”. Při složitějších stresových scénách by mohly způsobit chybné vyhodnocení.



Obr. 49 Canon XA20 – odezva na zonální test (vlevo) a kolorimetrické vlastnosti

Zkoumané kolorimetrické charakteristiky byly překvapivě dobré. Kamkodér vykazoval lepší vlastnosti než mnohé kvalitnější kamery. Pomocí nastavení barevné hloubky nebylo již docíleno lepšího gamutu. Frekvenční odezva byla dle očekávání na 30 MHz horší než u profesionálních kamer. Hodnota CTF na 30 MHz byla ze všech tří kamer nejhorší. Graf závislosti CTF na prostorovém kmitočtu měl však výraznější rostoucí trend směrem k nižším kmitočtům než například Panasonic AG-AC90. Na odezvě zonálního testu je pak vidět vliv aperturové korekce. Zajímavé výsledky přineslo měření infračervené odezvy, která byla poměrně silná. Kamera umožňuje přejít dokonce do infračerveného režimu a využít zabudovaný zdroj IR. Optický filtr tak objektiv zcela jistě nemá. Při zkoumání objektivu bylo zjištěno poměrně výrazné sklenutí (viz Obr. 50). Kvůli nemožnosti jakkoliv nastavit gamu a kolenovou funkci nebyly výsledky exponentu výkonové funkce gamy relevantní. Šumové vlastnosti jsou i kvůli nemožnosti vypnout gamu velmi špatné.



Obr. 50 Canon XA20 – Sklenutí objektivu (vlevo) a měření šumu

Kamera potvrdila výsledky měření své zaměření. V přímém srovnání s Panasonic AG-AC90, který má podobnou cenu, jsou pozorovatelné výrazné rozdíly. Například citlivost a infračervené tlumení má lepší Panasonic. Canon má pak kvalitní barevné podání. Kompletní vypracovaný protokol s naměřenými hodnotami je v příloze C této práce.

6. Závěr

Tato práce podala teoretické základy činnosti televizních kamer, popis obrazového analogového a digitálního signálu. V teoretické části se pak zaměřila hlavně na popis parametrů, které jsou nejdůležitější pro klasifikaci a kvalitativní popis digitálních kamer či kamkodérů. Mezi ně patří zejména citlivost, která velmi závisí na velikosti použitých obrazových senzorů. Kolorimetrické vlastnosti určují správnost interpretovaných barev a velikost jejich gamutu. Mezi stěžejní parametry patří také horizontální rozlišovací schopnost, šumové vlastnosti či zjišťování hodnoty korekce gama.

Stěžejní částí práce je pak návrh metodiky měření těchto parametrů. Uvedené postupy vyhovují souvisejícím normám a doporučením specializovaných organizací EBU (European Broadcasting Union) a ITU (International Telecommunication Union). Navrhovaná metodika je obecně aplikovatelná, přesto je vypracována zejména s ohledem na potřeby České televize a její technologické vybavení. Součástí navrhované metodiky je uvedené doporučené zapojení, nastavení kamery či použitý obrazový test. Některé vyhodnocování i v době HD signálů stále probíhá na analyzátoru analogového televizního signálu ve standardním rozlišení. Větší část měření ale probíhá na video analyzátoru WFM 8300 od firmy Tektronix. Řada parametrů byla v České televizi měřena správně, ale docházelo k nedostatečnému či neúplnému vyhodnocení. U některých parametrů byly zjištěny nesprávné postupy a některé parametry nebyly měřeny vůbec. Některé postupy jsou pak nahrazeny vhodnější metodikou. Velký důraz byl kladen také na vyhodnocení a správnou klasifikaci naměřených dat, díky čemuž vznikl návrh nového měřicího protokolu a podpůrné výpočetní nástroje. Výsledky měření dokázaly vhodnost zvolených parametrů. Jednotlivé kamery z praktické části této práce se v jejich hodnotách od sebe více či méně odlišují, a mohou se tak kvalitativně klasifikovat.

V průběhu vypracování této práce se autor seznámil s teoretickými základy činnosti televizních kamer, ale také s jejich praktickým ovládním. V rámci spolupráce s útvarem videoinženýringu mohla být metodika prakticky aplikována a teoretické návrhy testovány v praxi. Díky této skutečnosti mohlo dojít k pečlivému vybrání relevantních měřicích parametrů a vytvoření metodiky pro účely měření kamer v České televizi. V budoucnu je na tuto práci možné navázat ve formě návrhu metodického postupu pro kamery s vyšším rozlišením než HD (UHD) ve 3G SDI.

Seznam zdrojů

- [1] NAKAMURA, Junichi. Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras. ISBN 9780849335457. 2005. CRC Press
- [2] SCHANDA, Janos. Colorimetry: Understanding the CIE System. ISBN 9780470175620; 2008
- [3] VÍT, Vladimír. Televizní technika: studiové zpracování televizního signálu. ISBN 8086056880; 2000
- [4] Sony Electronics Inc. Sony Guides and specifications. 2015. Dostupné z: <http://esupport.sony.com/US/p/select-system.pl?DIRECTOR=DOCS>
- [5] VÍT, Vladimír. Televizní technika - přenosové barevné soustavy. ISBN 80-86056-04-X, 1997
- [6] PACHLOVÁ, Jana. Základy fotografické optiky, Praha 1971
- [7] PÁTA, Petr. Camera Obscura, Studijní materiál pdf prezentace na předmět MOT na FEL ČVUT
- [8] ČVUT. Fermatův princip. Studijní materiál pdf na předmět MOT na FEL ČVUT
- [9] SCHNAPF, J.L. Spectral sensitivity of human cone photoreceptors. Dostupné z www.nature.com
- [10] Barevný prostor CIE 1931. Dostupné z www.panwiki.panska.cz/index.php/Barevn%C3%BD_prostor_CIE_1931
- [11] FISCHER, Jan. Obrazové snímače. Studijní materiál pdf prezentace na předmět OBE na FEL ČVUT
- [12] CCD and CMOS Imaging Array; Dostupné z Technologies <http://research.microsoft.com/pubs/80353/ccd.pdf>

- [13] POYTOM, Charles. A Technical Introduction to Digital Video. 1996. John Wiley & Sons; Dostupné z <http://www.poynton.com/>
- [14] Tektronix Inc. A Guide to Standard and High-Definition Digital Video Measurements. 2005. Dostupné z <http://web.itu.edu.tr/>
- [15] LEE, Paul. Introduction to Analog Video. Literature Distribution ONSEMI. Dostupné z http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8261-D.PDF
- [16] SGS-Thomson Microelectronics. An Overview of the serial digital interface. Application Note. 1994. Dostupné z http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/A/N/6/4/AN641.shtml
- [17] Proposed Standard SMPTE 372M. Dual Link 292M Interface. Dostupné z http://read.pudn.com/downloads119/ebook/505735/SMPTE/SMPTE_372m.pdf
- [18] EBU. Advice on the use of 3 Gbit/s HD-SDI interfaces. 2011. Geneva. Dostupné z <https://tech.ebu.ch/docs/techreports/tr002.pdf>
- [19] SMPTE Technology Committee N 26. SMPTE 292M-2005. 2005. NY 10607. Dostupné z <https://www.smpte.org/standards>
- [20] ČERMÁK, Jan. Perspektivní datová rozhraní. Bakalářská práce FEL ČVUT. 2013
- [21] Tektronix Inc. Understanding Jitter Measurement for Serial Digital Video Signals. 2005. Dostupné z <http://bespak.org/docs/White%20Papers/Test/UnderstandingJitter%20Measurement%20for%20Serial%20Digital%20Video%20Signals.pdf>
- [22] Tektronix Inc. SDI Eye and Jitter Measurements. 2014. Dostupné z <https://wiki.millersville.edu/download/attachments/37946381/SDI+Jitter+Measurements.pdf?version=1&modificationDate=1393617509869>
- [23] BORER, Tim. Non-linear Opto-Electrical Transfer Functions for HD. BBC. 2014. Dostupné z <http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP283.pdf>
- [24] Andor Technology. Digital Camera Fundamentals. Dostupné z <http://www.andor.com/learning-academy/digital-camera-fundamentals-the-principles-behind-digital-camera-technology>
- [25] DELON, Julie. Study of the digital camera acquisition process and statistical modeling of the sensor raw data. 2014. Dostupné z <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00733538v1>

- [26] FISCHER, Jan. MTF – Modulační přenosová funkce snímače. Přednáška A3M38VBM. ČVUT. 2011. Dostupné z:
http://measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3M38VBM/Pr ed_VBM_MTF_teo.pdf
- [27] LOEBICH, Christian. Digital Camera Resolution Measurement. Image Engineering. Electronic Imaging Conference. 2007. Dostupné z:
http://imageengineering.de/library/conference_papers/resolution_measurement.pdf
- [28] ČVUT. Modulační přenosová funkce digitálního fotoaparátu. Návod ke cvičení z předmětu Fotonika. 2007. Dostupné z:
<http://radio.feld.cvut.cz/courses/D37LBR/>
- [29] TVLogic. LVM-242W Total Brochure. Dostupné z:
http://www.tvlogic.tv/Monitors/M_Spec.asp?sidx=8#wolfharu_tabmenu_content_item_5
- [30] Image Engineering. Spherical Transparency Illuminator LE 6-100. 2007. Dostupné z:
<http://img54.afzhan.com/5/20130327/634999989345937500338.pdf>
- [31] Tektronix. WFM 8200 and WFM 8300 Manual. Dostupné z:
<http://www.tek.com/waveform-monitor/wfm8300-8200-manual-3>
- [32] Tektronix. VM700A Reference Manual. 1992. Dostupné z interních zdrojů České televize
- [33] AJA. HA5 Mini-Converter Installation & Operation Guide. 2014. Dostupné z:
https://www.aja.com/assets/support/files/97/en/AJA_manual_HA5_v1.0r2.pdf
- [34] Black Magic Design. Installation and Operation Manual Teranex 3D. 2014. Dostupné z:
http://documents.blackmagicdesign.com/Teranex/Teranex_Manual_2014-08-31.pdf
- [35] WATERS, G. T. EBU Tech. 3281-E. Methods for Measuring Characteristics of CCD Cameras. Dostupné z:
<https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3281.pdf>
- [36] ITU. BT.2022. General viewing conditions for subjective assessment of quality of SDTV/HDTV television pictures on flat panel displays. 2012. Dostupné z:
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2022-0-201208-1!!PDF-E.pdf
- [37] Sony. HDC-1700 and HDCU-1700 Overview. 2012. Dostupné z:
[https://pro.sony.com/bbsc/assetDownloadController/HDC1700brochure.pdf?path=Asset%20Hierarchy\\$Professional\\$sel-47425SEL-asset-351545.pdf&id=StepID\\$SEL-asset-351545\\$original&dimension=original](https://pro.sony.com/bbsc/assetDownloadController/HDC1700brochure.pdf?path=Asset%20Hierarchy$Professional$sel-47425SEL-asset-351545.pdf&id=StepID$SEL-asset-351545$original&dimension=original)

- [38] Panasonic. Operating Instructions AG-AC90. Vol.2. 2012. Dostupné z: ftp://ftp.panasonic.com/pub/Panasonic/business/provideo/op_manuals/AG-AC90_Operating_Instructions_Advance.pdf
- [39] EBU. Tech. 3320. USER REQUIREMENTS FOR VIDEO MONITORS IN TELEVISION PRODUCTION. Version 3.0. 2014. Geneva. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications>
- [40] EBU. Tech. 3281. Methods for the measurement of characteristics of CCD cameras. 1999. Geneva. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications>
- [41] EBU. Tech. 3361-3. SERVICE LEVEL AGREEMENT FOR MEDIA TRANSPORT SERVICES. 2014. Geneva. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications>
- [42] EBU. Tech. 3238. METHODS FOR MEASURING THE MAIN CHARACTERISTICS OF TELEVISION CAMERAS.1983.Geneva. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications>
- [43] EBU. Tech. 3335. METHODS OF MEASURING THE IMAGING PERFORMANCE OF TELEVISION CAMERAS. 2014. Geneva. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications>
- [44] EBU. Tech. 3299. High Definition (HD) Image Formats for Television Production. 2010. Geneva. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications>
- [45] EBU. Tech. 3237. METHODS OF MEASUREMENT OF THE COLORIMETRIC FIDELITY OF TELEVISION CAMERAS. 1989. Geneva. Dostupné z: <https://tech.ebu.ch/publications>
- [46] ITU. Rec. ITU-R BT.601-5. STUDIO ENCODING PARAMETERS OF DIGITAL TELEVISION FOR STANDARD 4:3 AND WIDE-SCREEN 16:9. 1995. Dostupné z: <http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [47] ITU. Rec. ITU-R BT.709-5. Parameter values for the HDTVstandards for production and international programme exchange. 2002. Dostupné z: <http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [48] ITU. Rec. ITU-R BT.801-1. Test signals for digitally encoded colour television signals. 1995. Dostupné z: <http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [49] ITU. Rec. ITU-R BT.1204. Measuring methods for digital video equipment with analogue input/output. 1995. Dostupné z: <http://www.itu.int/pub/R-REC>

- [50] ITU. Rec. ITU-R BT.2022. General viewing conditions for subjective assessment of quality of SDTV and HDTV television pictures on flat panel displays. 2012. Dostupné z:
<http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [51] ITU. Rec. ITU-R BT.710-4. SUBJECTIVE ASSESSMENT METHODS FOR IMAGE QUALITY IN HIGH-DEFINITION TELEVISION. 1998. Dostupné z:
<http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [52] ITU. Rec. ITU-R BT.1363-1. Jitter specifications and methods for jitter measurements. 1998. Dostupné z:
<http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [53] ITU. Rec. ITU-R BT.1120-8. Digital interfaces for HDTV studio signals. 2012. Dostupné z:
<http://www.itu.int/pub/R-REC>
- [54] Canon. Operating Instructions XA20. 2013. Dostupné z:
<http://gdlp01.c-wss.com/gds/9/0300011399/01/xa20-25-im-n-en.pdf>
- [55] Wikipedia. Mean Squared Error. Definition. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Mean_squared_error
- [56] LINZMAJER, Zdeněk. Měření SDI a kompresních systémů. Pixel. 2000.


Seznam zdrojů obrázků a tabulek

- [1] Wave behaviour, dostupné z:
http://physics.taskermilward.org.uk/KS4/core/waves/wave_behaviour/diffraction.png
- [2] CIE 1931, dostupné z:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5f/CIE1931_diagram_in_LAB_space.svg
- [3] Diagram digitální kamery; dostupné z:
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/02062/index.html>
- [4] Obrazové snímače, Jan Fischer, studijní materiál pdf prezentace na předmět OBE na FEL ČVUT
- [5] Dichroic-prism.png; dostupné z
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Dichroic-prism.svg>
- [6] Bayer-Matrix; dostupné z
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Bayer_matrix.svg
- [7] Introduction to Analog Video, Literature Distribution ON Semiconductor; dostupné z
http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND8261-D.PDF
- [8] A Guide to Standard and High-Definition Digital Video Measurements; Tektronix; 2005; dostupné z
<http://web.itu.edu.tr/~pazarci/rtv>
- [9] BNC Terminator Plug – 50 Ohm – Male; dostupné z
<http://www.computercablestore.com/images/products/No%20Manufacturer/9-BNCTERM50.jpg>
- [10] An Overview of the serial digital interface; SGS-Thomson Microelectronics; dostupné z
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/A/N/6/4/AN641.shtml
- [11] Метод кодирования NRZI; dostupné z
<http://www.ixbt.com/comm/tech/fast-ethernet/7.png>
- [12] EBU; Advice on the use of 3 Gbit/s HD-SDI interfaces; 2011; dostupné z
<https://tech.ebu.ch/docs/techreports/tr002.pdf>

- [13] Anatomy of an Eye Diagram - Application Note; Tektronix; 2010; dostupné z <http://www.tek.com/advertisement-banner/download-anatomy-eye-diagram-application-note>
- [14] Gamma encoded images; dostupné z <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/gamma-correction.htm>
- [15] The rehabilitation of gamma; Charles Poynton; dostupné z http://www.poynton.com/PDFs/Rehabilitation_of_gamma.pdf
- [16] Spherical Transparency Illuminator LE 6-100; Image Engineering; dostupné z http://www.ws-tech.com.tw/tw/Pdf/d_test-related_pdf/LE6-100.pdf
- [17] WFM8200 Datasheet; Tektronix; dostupné z <http://www.tek.com/sites/tek.com/files/media/media/resources/WFM8300-WFM8200-Waveform-Monitor-Datasheet-10.pdf>
- [18] VM700A Datasheet; Tektronix; dostupné z https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/Tektronix-VM700A_Options-manual.pdf
- [19] Teranex 3D; Blackmagic design; dostupné z <https://www.blackmagicdesign.com/products/teranex/>
- [20] Examples of arrangements for the mounting; EBU Tech. 3281-E; dostupné z <https://tech.ebu.ch/docs/tech/tech3281.pdf>
- [21] Test charts; Image Engineering; dostupné z http://image-engineering-shop.de/shop/category_2/Test-charts.html
- [22] Sony HDC-1700; Sony; dostupné z <http://www.sony.co.uk/pro/product/broadcast-products-system-cameras-hd-system-cameras/hdc-1700/overview/>
- [23] Panasonic AG-AC90; Panasonic; dostupné z <http://www.panasonic.com/business/provideo/AG-AC90.asp>
- [24] Canon XA20; Canon; dostupné z http://www.canon.cz/for_home/product_finder/camcorders/professional/xa20/
- [25] Pin hole camera; dostupné z http://www.northlight-images.co.uk/article_pages/Canon_1ds_pinhole.html

Příloha A

Protokol o měření

	Útvar Videoinženýring	Datum 2.4.2015
	Vypracoval Jan Čermák	Podpis

Objekt měření	Sériové číslo 2R28-46-1D
SONY HDC-1700	Rok výroby 2014
Použité přístroje TVLogic LVM-242W, Tektronix WFM 8300, Tektronix WFM 601A, Tektronix WM 700A, Teranex 3D, prosvětlovací skříň LE 6-100, Sony HDCU-1700, MSU-900	
Poznámky 3 CCD obrazové snímače o velikosti 2/3" CCD; objektiv Fujinon 450288; max světelnost f/1,8; 14x zoom; signál 1080i z CCU; ovládání pomocí MSU-900	

Parametry digitálního signálu				
Označení parametru	Naměřené hodnoty	Hodnoty dle normy	Jednotky	Poznámky
Amplituda	775	800 ± 10 %	mV	Parametry z SDI výstupu jednotky CCU. Výstup přímo z kamery v podstatě identický.
Náběžná/sestupná hrana	139/123	≤ 270	ps	
Timing jitter (10Hz)	60	≤ 673		
Alignment jitter (100 kHz)	37	≤ 135		
Překmity	1	≤ 10	%	

Kolorimetrie		
Matice	Hodnoty	Poznámky
R-G	90	Pomocí těchto hodnot je možné docílit téměř ideálního barevného podání. Preset ITU-R 709
R-B	1	
G-R	7	
G-B	7	
B-R	16	
B-G	40	

Citlivost			
Označení parametru	Naměřené hodnoty	Jednotky	Poznámky
Citlivost při f/5,6	0,34	klx	Díky velikosti čipů vysoká citlivost. Zisk je maximálně 12 dB.
Maximální citlivost f/1,8	0,09		
Citlivost při zisku 3 dB	0,079		
Citlivost při zisku 6 dB	0,064		

Přenosová funkce gama			
Označení parametru	Naměřené hodnoty	Deklarované hodnoty	Poznámky
Exponent výkonové funkce, varianta A	0,47	0,45	Naměřené hodnoty jsou v tolerované odchylce
Exponent výkonové funkce, varianta B	0,49		

Blooming, Smearing, Infračervená odezva			
Označení parametru	Detekovatelné	Naměřené hodnoty	Poznámky
Blooming, Smearing	ne	-	
Infračervená odezva	ne	-	

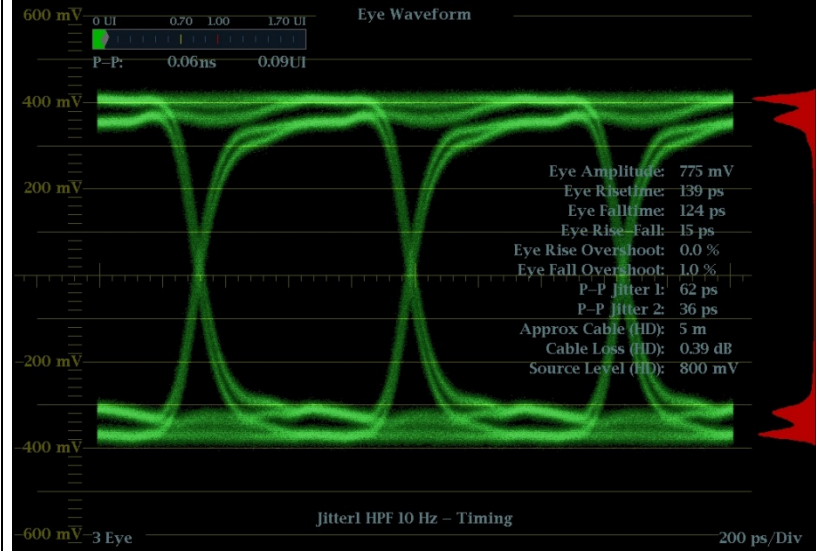
Frekvenční odezva			
Označení parametru	Modulace 30 MHz	Jednotky	Poznámky
Horizontální rozlišení	31	%	
Aliasing	Standardní. Na H/V a diagonále		

Defekty				
Označení parametru	Počet vadných pixelů	Pozice	Úroveň	Poznámky
Kanál G	0	-	-	
Kanál R	0	-	-	
Kanál B	0	-	-	

Šum

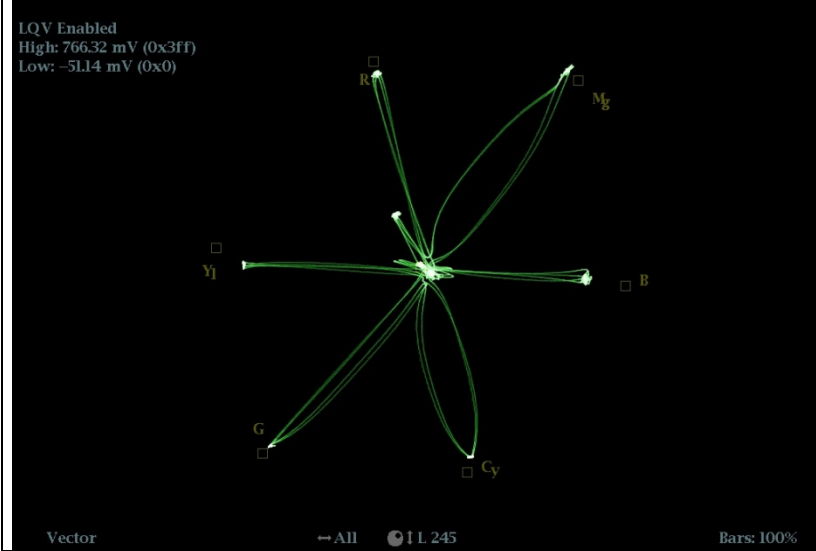
Označení parametru	Úroveň šumu	Gama on/off	Jednotky	Poznámky
Kanál G	-66,2	off	dB	Díky velikosti čipu jde o velmi dobré výsledky
Kanál B	-58,2			
Kanál R	-61,7			
PSNR	-61,5			

Obr 1 Diagram oka rozhodnutí



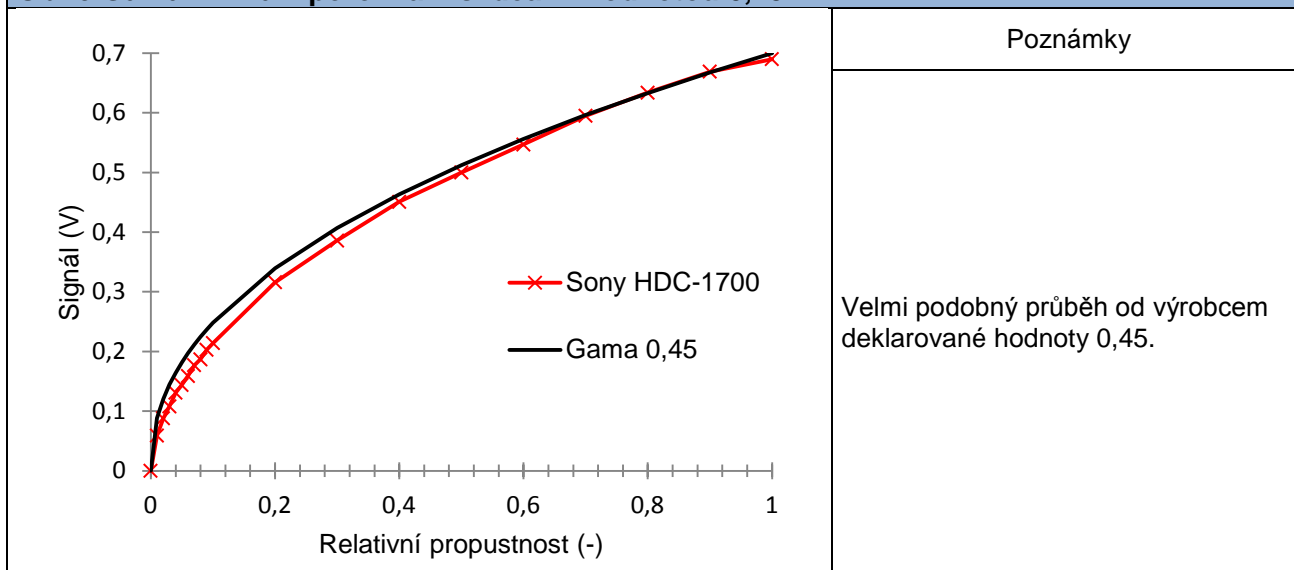
Poznámky

Obr 2 Vektorskop

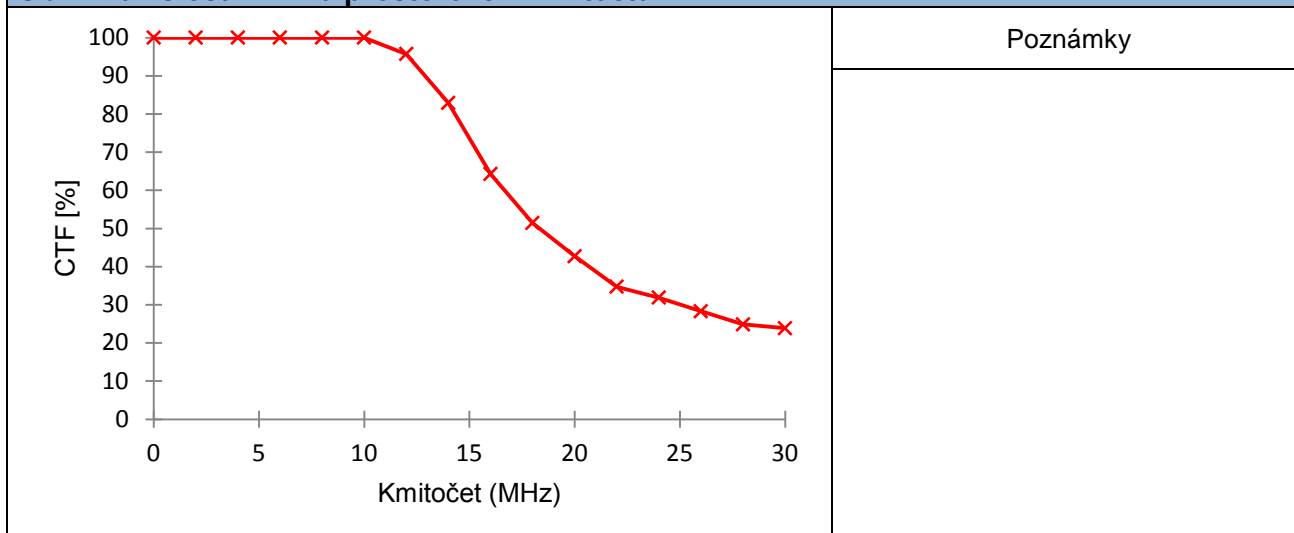


Poznámky
Téměř ideální barevné podání.

Obr 3 Gama křivka v porovnání s ideální hodnotou 0,45



Obr 4 Závislost CTF na prostorovém kmitočtu




Závěr

Kamera má díky velikosti čipů velmi dobrou citlivost. Pomocí nastavení uživatelské matice je možné docílit kvalitnějšího barevného podání. Kamera nemá ve změřených parametrech žádné nevyhovující skutečnosti, které by bránily jejímu využívání ve studiu KH 14.

Příloha B

Protokol o měření

	Útvar Videoinženýring	Datum 17.4.2015
	Vypracoval Jan Čermák	Podpis

Objekt měření	Sériové číslo I3HG00041
PANASONIC AG-AC90	Rok výroby 2012
Použité přístroje TVLogic LVM-242W, Tektronix WFM 8300, Tektronix WFM 601A, Tektronix WM 700A, AJA HA5, Teranex 3D, prosvětlovací skříň LE 6-100	
Poznámky 3 CMOC obrazové snímáče o velikosti 1/4,7"; max světelnost f/1,5; min světelnost f/11; 12x zoom; signál 1080i/576p	

Parametry digitálního signálu				
Označení parametru	Naměřené hodnoty	Hodnoty dle normy	Jednotky	Poznámky
Amplituda	765	800 ± 10 %	mV	Parametry po konverzi HDMI-SDI s využitím AJA HA5. Všechny parametry v normě
Náběžná/sestupná hrana	227/187	≤ 270	ps	
Timing jitter (10Hz)	117	≤ 673		
Alignment jitter (100 kHz)	57	≤ 135		
Překmity	1	≤ 10	%	

Kolorimetrie		
Označení parametru	Hodnota	Poznámky
Matrix	Norm1	V základním nastavení malý gamut, vyšší saturace barev, po kalibraci subjektivně vyhovující. Preset v nastavení Scene 1
Chroma Level	+4	
Chroma Phase	+3	
Master Ped	+3	
DRS	1	
Gamma	HD Norm	

Citlivost			
Označení parametru	Naměřené hodnoty	Jednotky	Poznámky
Citlivost při f/5,6	4,58	klx	Kvůli velikosti čipů malá citlivost oproti profesionálním kamerám; při vyšším zisku degradace kvality
Maximální citlivost	1,128		
Citlivost při zisku 30 dB	0,06		

Přenosová funkce gama			
Označení parametru	Naměřené hodnoty	Deklarované hodnoty	Poznámky
Exponent výkonové funkce, varianta A	0,67	neznámé	Nemožnost vypnout kolenovou funkci, výsledky jsou zkreslené
Exponent výkonové funkce, varianta B	0,32		

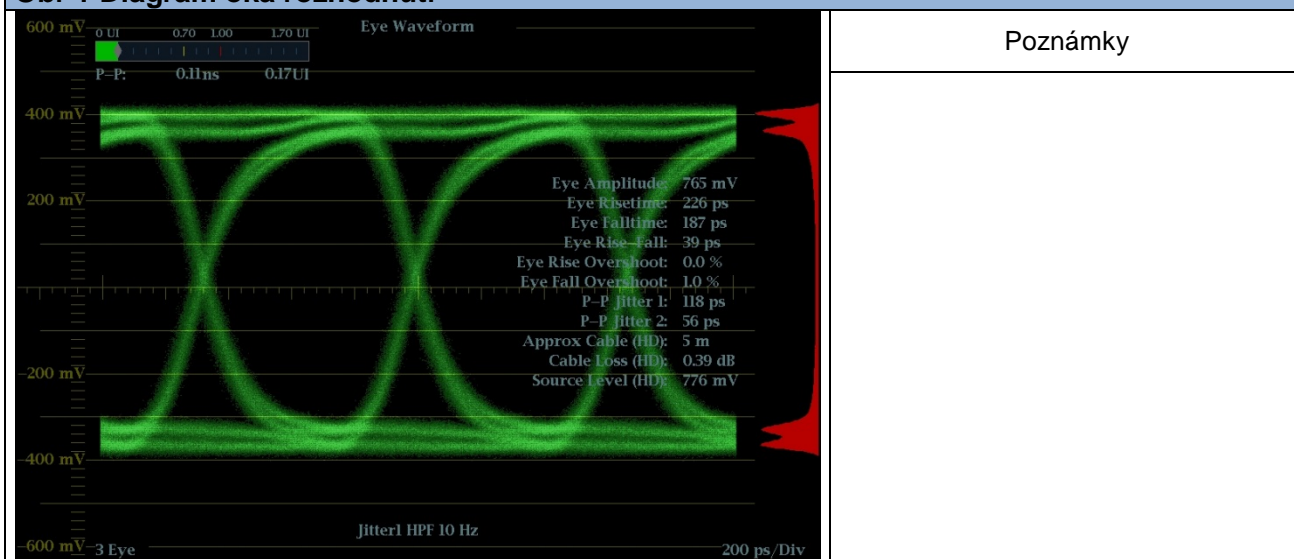
Blooming, Smearing, Infračervená odezva			
Označení parametru	Detekovatelné	Naměřené hodnoty	Poznámky
Blooming, Smearing	-	-	Slabá infračervená odezva, ve standardním provozu vyhovující
Infračervená odezva	ano	Max. 75 mV	

Frekvenční odezva			
Označení parametru	Modulace 30 MHz	Jednotky	Poznámky
Horizontální rozlišení	23,9	%	
Aliasing	Standardní. Na H/V a diagonále		

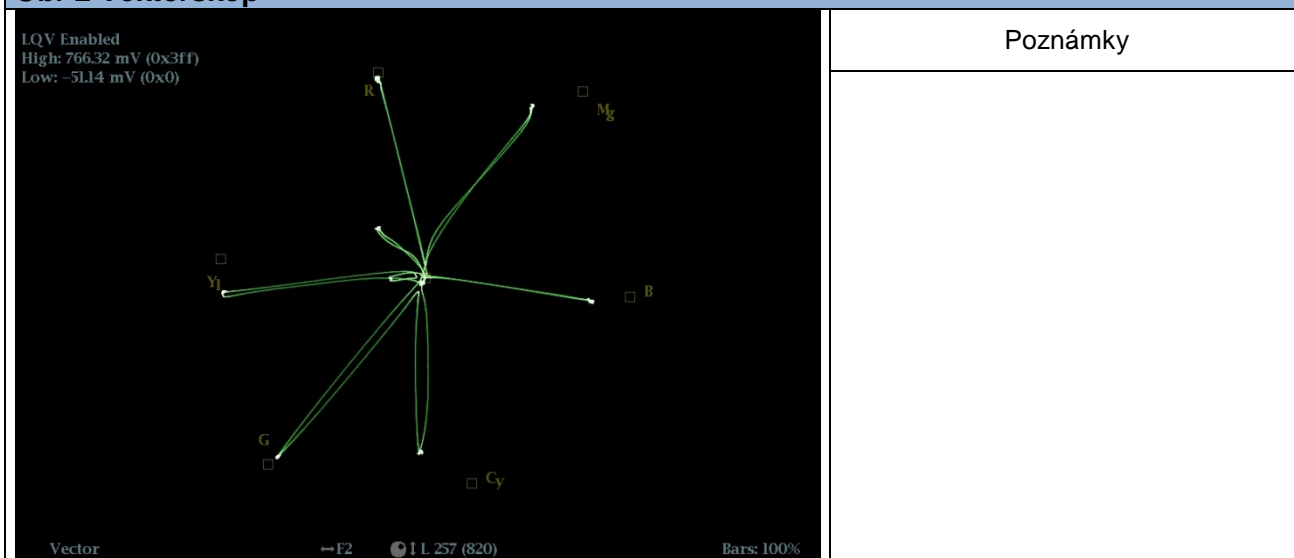
Defekty				
Označení parametru	Počet vadných pixelů	Pozice	Úroveň	Poznámky
Kanál G	-	-	-	Jediný vadný pixel je v normě a okem nedetekovatelný.
Kanál R	-	-	-	
Kanál B	1	14,97 μ s/ řádek 464 (SD)	8,5 mV	

Šum				
Označení parametru	Úroveň šumu	Gama on/off	Jednotky	Poznámky
Kanál G	-62,7	On Low	dB	I přes nemožnost vypnutí gamy jde o hodnoty v normě.
Kanál B	-57,9			
Kanál R	-60,8			
PSNR	-58,9			

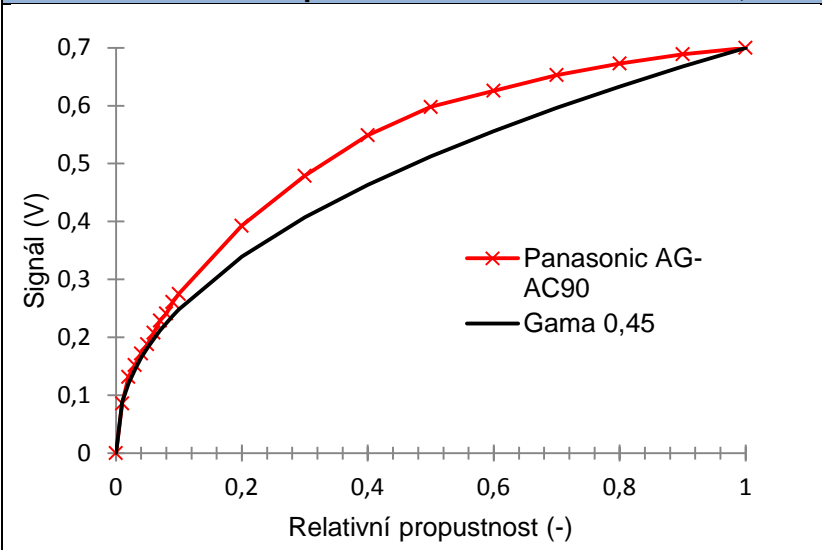
Obr 1 Diagram oka rozhodnutí



Obr 2 Vektorskop

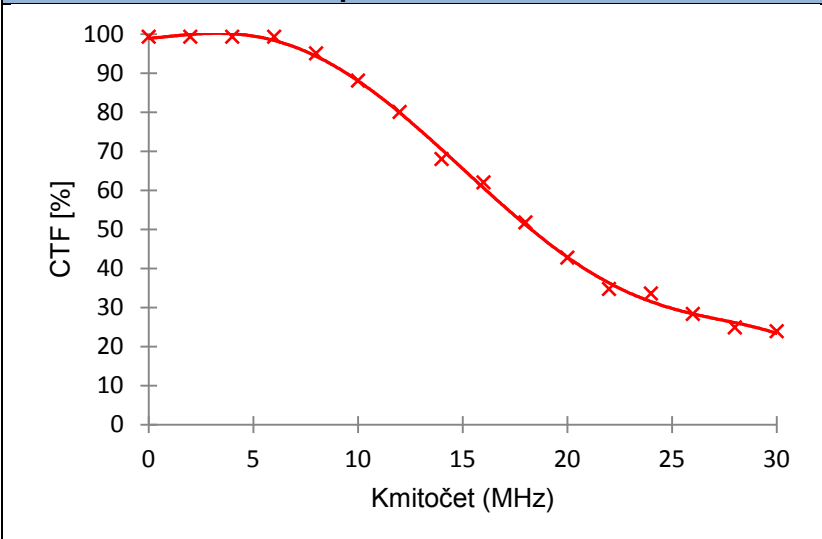


Obr 3 Gama křivka v porovnání s ideální hodnotou 0,45



Poznámky

Obr 4 Závislost CTF na prostorovém kmitočtu




Poznámky

Závěr

Kamera má přes své zaměření poměrně dobré výsledky v oblasti kolorimetrie, rozlišení či šumových charakteristik. Horší jsou hodnoty citlivosti kvůli menším čipům. Nevýhodou je nemožnost zcela vypnout a přesně nastavit gamu a kolenovou funkci.

Příloha C

Protokol o měření

	Útvar Videoinženýring	Datum 1.3.2015
	Vypracoval Jan Čermák	Podpis

Objekt měření	Sériové číslo 703672100552
CANON XA20	Rok výroby 2013
Použité přístroje TVLogic LVM-242W, Tektronix WFM 8300, Tektronix WFM 601A, Tektronix WM 700A, AJA HA5, Teranex 3D, prosvětlovací skříň LE 6-100	
Poznámky 1 CMOC obrazový snímač o velikosti 1/2,84"; max světelnost f/1,8; min světelnost f/8; 20x zoom; signál HDMI 1080p	

Parametry digitálního signálu				
Označení parametru	Naměřené hodnoty	Hodnoty dle normy	Jednotky	Poznámky
Amplituda	763	800 ± 10 %	mV	Parametry po konverzi HDMI-SDI s využitím AJA HA5. Všechny parametry v normě
Náběžná/sestupná hrana	228/191	≤ 270	ps	
Timing jitter (10Hz)	81	≤ 673		
Alignment jitter (100 kHz)	64	≤ 135		
Překmity	0	≤ 10	%	

Kolorimetrie		
Označení parametru	Hodnota	Poznámky
Colour Depth	0	V základním nastavení nejlepší gamut

Citlivost			
Označení parametru	Naměřené hodnoty	Jednotky	Poznámky
Citlivost při f/5,6	5,86	klx	
Maximální citlivost	1,52		

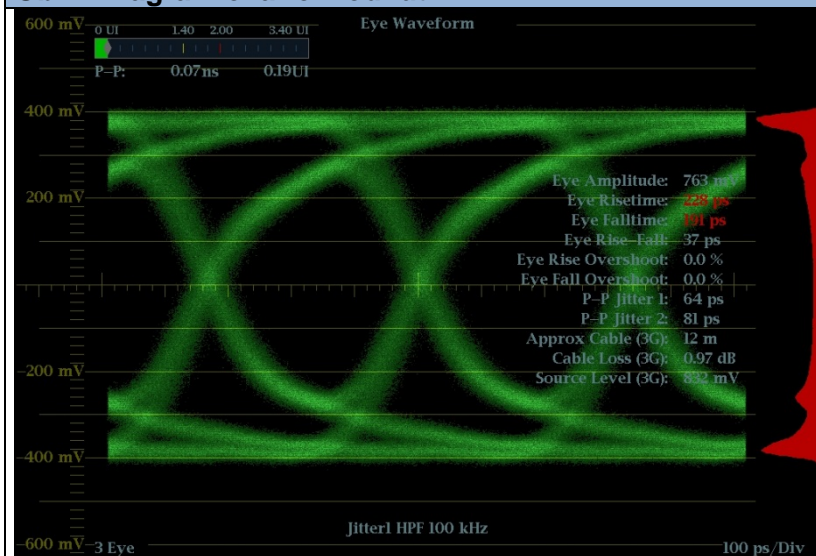
Blooming, Smearing, Infračervená odezva			
Označení parametru	Detekovatelné	Naměřené hodnoty	Poznámky
Blooming, Smearing	-	-	
Infračervená odezva	Ano	Max. 124 mV	

Frekvenční odezva			
Označení parametru	Modulace 30 MHz	Jednotky	Poznámky
Horizontální rozlišení	17,2	%	
Aliasing	Vyšší subjektivní vliv aliasingu. Na H/V a diagonále		

Defekty				
Označení parametru	Počet vadných pixelů	Pozice	Úroveň	Poznámky
Kanál G	-	-	-	Bayerova maska, tudíž možný vliv i v okolních pixelech díky interpolaci. Subjektivně nepozorovatelný.
Kanál R	1	42,30 μ s/ řádek 190 (SD)	17 mV	
Kanál B	-	-	-	

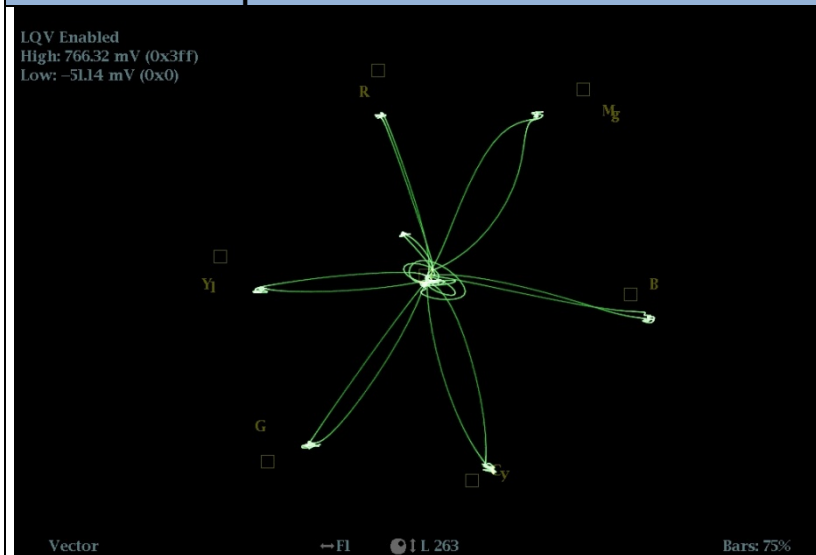
Šum				
Označení parametru	Úroveň šumu	Gamma on/off	Jednotky	Poznámky
Kanál G	-50,8	Nelze nastavit	dB	Horší hodnoty nevyhovující doporučení - 54 dB.
Kanál B	-40,4			
Kanál R	-48,5			
PSNR	-46,1			

Obr 1 Diagram oka rozhodnutí



Poznámky

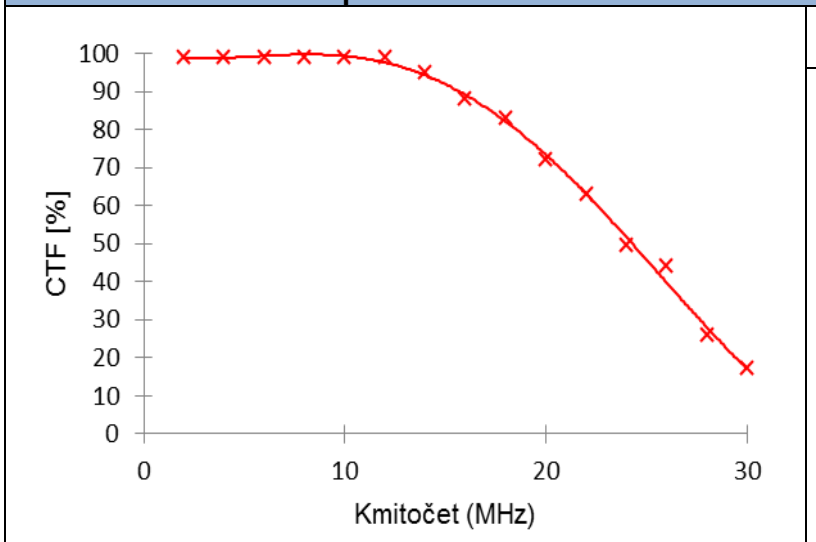
Obr 2 Vektorskop



Poznámky

Velmi kvalitní barevné podání na tento segment kamer.

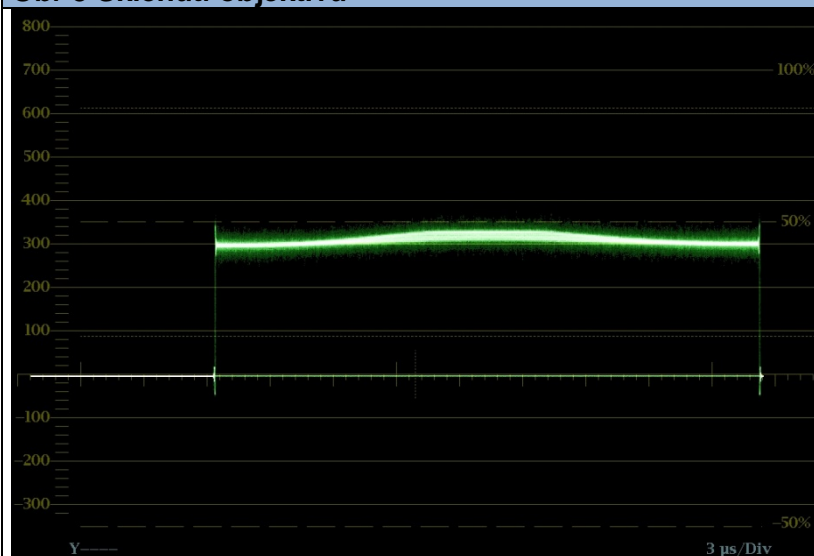
Obr 3 Závislost CTF na prostorovém kmitočtu



Poznámky

Nižší hodnota promodulování na 30 MHz. Pak poměrně rychlý růst.

Obr 3 Sklenutí objektivu



Poznámky

Na okrajích objektivu viditelný útlum.

Závěr

Kamera má kvůli velikosti čipu špatnou citlivost. Nevýhodou je nemožnost nastavení většiny důležitých parametrů (gama, kolenová funkce) a omezené manuální ovládání. Šumové charakteristiky nesplňují doporučení EBU na SNR -54 dB. Kameru lze pro webové příspěvky využívat s ohledem na výše uvedené skutečnosti (kvalitní osvětlení scény, atd.)