

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky



**Kompatibilita leteckých a vojenských displejů
při pozorování v blízkém infračerveném spektru**

Diplomová práce

Autor: Vojtěch Řehoř

Studijní program: B1701 – Fyzika

Studijní Obor: Digitální a přístrojová optika

Forma: Prezenční

Vedoucí práce: Mgr. Filip Chlup

Olomouc 2020

Prohlášení:

Čestně prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením pana Mgr. Filipa Chlupa a za užití uvedené literatury a zdrojů.

V Olomouci, srpen 2020

podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Mgr. Filipu Chlupovi za odborné konzultace a rady při vytváření této práce. Dále pak děkuji společnosti Pramacom-HT, spol. s r.o. za poskytnutí spektrometru včetně veškerého užitého příslušenství, laboratorní prostory a také umožnění výjezdu na terénní měření vyzařování noční oblohy.

Anotace:

Tato práce se zabývá především kompatibilitou multifunkčního displeje (MFD) s noktovízorem určeným pro piloty – Aviator Night Vision Imaging System (ANVIS). Požadovanou vyzařovací charakteristiku multifunkčního displeje udává výrobní dokumentace AERO Vodochody AEROSPACE a.s., která vychází z vojenského amerického standardu MIL-STD-3009, a je určena pro lehký bojový letoun L-159.

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout, ověřit a realizovat vhodnou geometrii a postup měření optických parametrů MFD. Geometrie a postupy měření musí korespondovat s implementací MFD do kokpitu letounu L-159. Je tak nutno zohledňovat možné úhly pohledů v kokpitu, dále pak rozdílné okolní světelné podmínky při denních či nočních letech. Mimo měření velkých rozsahů jasů (pro denní či noční lety s ANVIS) včetně jejich rovnoměrnosti rozložení byla měřena chromatičnost, kontrast a dále i podsvícené ovládací prvky MFD. V teoretické části byla zahrnuta specifika odlišná od běžných fotometrických měření, jako jsou NVIS barvy v diagramu chromatičnosti CIE 1976 UCS, NVIS třídy a jejich filtry pro ANVIS apod. Další dílčí cíle této práce jsou popis principu a kalibrace užitého spektrometru, ověřovací pozorování MFD přes ANVIS a spektrometrické měření noční oblohy v exteriéru.

Navržené měřicí metodiky a naměřené hodnoty rozhodnou o vhodnosti integrace MFD do letounu L-159.

Klíčová slova:

MFD, ANVIS, MIL-STD-3009, Spektrometr, Chromatičnost, CIE 1976 UCS.

Abstract:

This thesis focuses mainly on the multifunction display compatibility (MFD) with Aviator Night Vision Imaging System (ANVIS), a night vision device designed for pilots. The required radiation of the multifunction display is specified in AERO Vodochody AEROSPACE a. s. production documentation that is based on the US military standard MIL-STD-3009, and is intended for the L-159 light combat aircraft.

The main goal of the diploma thesis is to design, verify and implement a suitable geometry and procedure for the MFD optical parameters measuring. The geometry and measurement procedures must correspond with the implementation of the MFD in the L-159 aircraft cockpit. Therefore, possible viewing angles in the cockpit shall be taken into account, as well as different ambient light conditions during day or night flights. In addition to wide ranges of brightness measuring (for day or night flights with ANVIS) including their uniform distribution, the chromaticity, contrast and backlit MFD controls were measured. The theoretical part included specifics different from common photometric measurements, such as NVIS colors in the chromaticity diagram CIE 1976 UCS, NVIS classes and their filters for ANVIS, etc. and spectroradiometric measurement of the night sky outdoors.

The proposed measuring methodologies and measured values will determine the suitability of the MFD integration into the L-159 aircraft.

Keywords:

MFD, ANVIS, MIL-STD-3009, Spectroradiometer, Chromaticity, CIE 1976 UCS.

Obsah

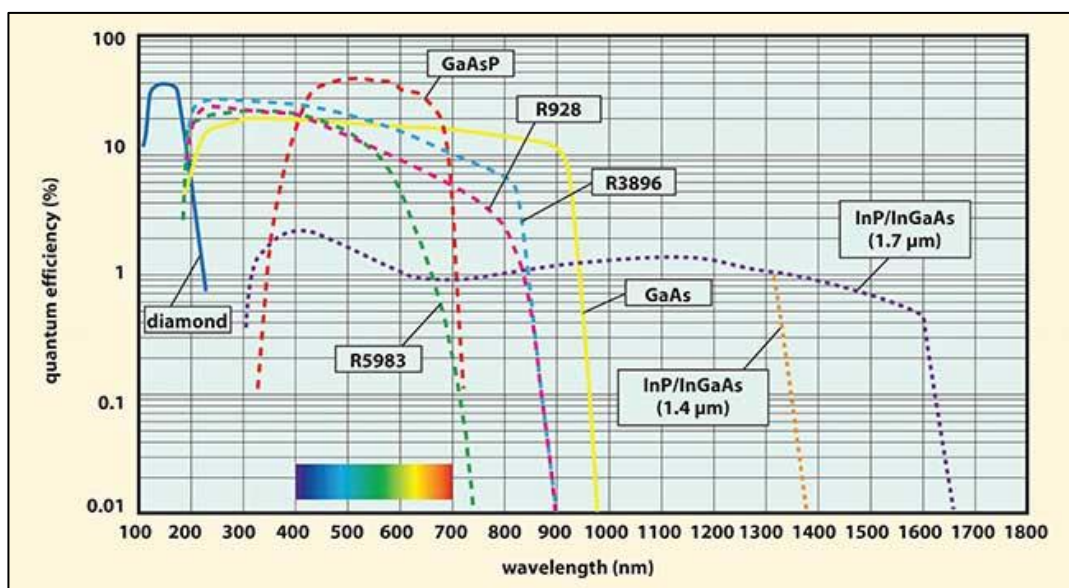
1	Teoretická část	7
1.1	ANVIS (Aviator Night Vision Imaging System)	7
1.1.1	Základní princip ANVIS	9
1.1.2	ANVIS typu AVS-9	12
1.2	Multifunkční displej (MFD)	14
1.3	Vojenský standard MIL-STD-3009	16
1.3.1	Základní členění ANVIS	16
1.3.2	NVIS třídy	17
1.3.3	NVIS filtry	19
1.3.4	Vybrané parametry určující kompatibilitu zobrazovacích systémů s ANVIS ...	23
1.4	Spektroradiometr Gamma Scientific GS-1290-NVIS-2-RM	34
2	Praktická část	42
2.1	Kalibrace spektroradiometru Gamma Scientific GS-1290-NVIS-2-RM	42
2.1.1	Spektrální kalibrace spektroradiometru	42
2.1.2	Amplitudová kalibrace spektroradiometru	45
2.2	Ověření užitého širokospektrálního zdroje	48
2.3	Technologie Optolite Emishield Micromesh	50
2.4	Jas multifunkčního displeje (MFD)	51
2.4.1	Kontrast MFD a ovládacích tlačítek	51
2.4.2	Jas MFD při zobrazovacích režimech DAY, NGT, NVIS	54
2.4.3	Rovnoměrnost jasu MFD	55
2.4.4	Jas podsvícených tlačítek MFD	57
2.5	Chromaticnost MFD a podsvícených tlačítek	59
2.5.1	Chromaticnost MFD	59
2.5.2	Chromaticnost podsvícených tlačítek MFD	60
2.6	Ověřovací pozorování MFD pomocí ANVIS	61
2.7	Měření vyzářování noční oblohy v terénu	62
3	Závěr	66
4	Zdroje	67

1 Teoretická část

V následujících kapitolách bude nejprve stručně popsán obecný princip noktovizorů, na který naváže kapitola ANVIS typu AVS-9, pro který se určovala kompatibilita s multifunkčním displejem (MFD). Další část bude popisovat samotný MFD. Kapitola 1.3 bude pojednávat o standardu pro letectví a bude tak obsahovat většinu specifických parametrů z oblasti kompatibility ANVIS se zobrazovacími systémy v kokpitu při nočních letech. Poslední kapitola teoretické části bude popisovat základní princip spektrometrů, spektroradiometrů a jejich odlišností. Zakončena bude popisem specifik užitého spektroradiometru Gamma Scientific GS-1290-NVIS-2-RM.

1.1 ANVIS (Aviator Night Vision Imaging System)

Termín ANVIS je do češtiny překládán jako brýle nočního vidění či noktovizor pro pilota letounu. Obecně se tedy jedná se o binokulární přístroj, který zesiluje zbytkové světlo noční oblohy (zář hvězd, měsíční svit apod.). Toto zesílení je umožněno díky klíčovému prvku noktovize, čímž je mikrokanálový zesilovač jasu obrazu (MKZJO). Různé typy ANVIS se mimo jiné liší ve spektrální citlivosti, která je z větší části obsažena ve viditelné části spektra, ale standardně s přesahem do blízké IR oblasti, tedy přibližně do 950 nm. Jsou však i možnosti, jako je např. InP/InGaAs, kde se citlivost blíží až k 1,7 μm (viz obr. č. 1).



Obrázek 1: Závislost citlivosti fotokatody na vlnové délce vyjádřená pomocí kvantové účinnosti. Převzato z [11].

Noktovizory konkrétně užívané jako ANVIS, mají nadstandardní požadavky ve srovnání s noktovizory určenými pro pozemní užití. Například to je: definovaná spektrální citlivost (viz kapitola 1.3 NVIS třídy), vysoká čistota obrazu (luminoforu) MKZJO, vyšší hodnoty FOM (násobek středového rozlišení [č/mm] a hodnoty SNR (Signal to noise ratio)), apod. Další požadavky jsou kladeny na mechanismus přílbového uchycení pro vysoké přetížení, ale současné bezpečné odpojení ANVIS v případě katapultáže. V neposlední řadě na vlastnosti optické soustavy noktovizoru jako jsou NVIS filtry, zvětšení a minimální aberace například zkreslení, otvorová vada, apod.



Obrázek 2: Nahoře vpravo MKZJO staršího typu s drátovým připojením napájení, vlevo a uprostřed již standardně napájený MKZJO přítlačnými kontakty a průměrem fotokatody 18 mm.



Obrázek 3: Montáž MKZJO do noktovizoru AVS-9. Převzato od Pramacom-HT, spol. s r.o. (Nikol Lach, Vojtěch Zálešák).

MKZJO je hlavní část noktovizoru a udává tedy parametry jako je jasový zisk (poměr zesílení světla z předmětové roviny do obrazové roviny noktovizoru), čistota (v obraze se mohou objevovat vlivem technologie výroby natavené defekty, či nečistoty), SNR (Signal to noise ratio), FOM (Figure Of Merit), EBI (Equivalent Background Illumination), halo efekt, rozlišení, MTF apod. Samozřejmě na vybrané parametry má dílčí vliv také daná optická soustava noktovizoru (zorné pole, zvětšení, hloubka ostrosti, MTF, FOM, atd.).

Pro dělení typů MKZJO se užívá z historického vývoje pojem generace 1. až 4., které vytvořila americká vláda. Není však již relevantní členit veškeré MKZJO pouze do těchto generací, jelikož v současnosti existuje celá řada výrobců, mimo těch amerických, jejichž MKZJO mají rozdílnou konstrukci. Již tedy nelze směrodatně dělit MKZJO do generačních řad, přesto je generace MKZJO tak zavedený pojem, že jej řada institucí využívá dodnes. Například 3. generace je definována materiálem fotokatody GaAs

a odpovídající rozšířenou citlivostí. Dále iontovou bariérou, která eliminuje nežádoucí ionty, které by mohly poškozovat fotokatodu. Další novou vlastností oproti předchozím generacím je funkce Auto-Gating, která reguluje jasový zisk (vysokofrekvenčním spínáním napětí fotokatody), což mimo jiné zabraňuje oslnění uživatele. [5]

Standardně kity (těla) noktovizorů umožňují volbu implementace pro několik typů MKZJO s odlišnými optickými vlastnostmi, které pak mění kvalitu noktovizoru jako celku a tím definují možnosti jeho užití. MKZJO se v současnosti vyrábí ve dvou nejčastějších rozměrových variantách, a to s průměrem fotokatody 18 mm, nebo 16 mm.

1.1.1 Základní princip ANVIS

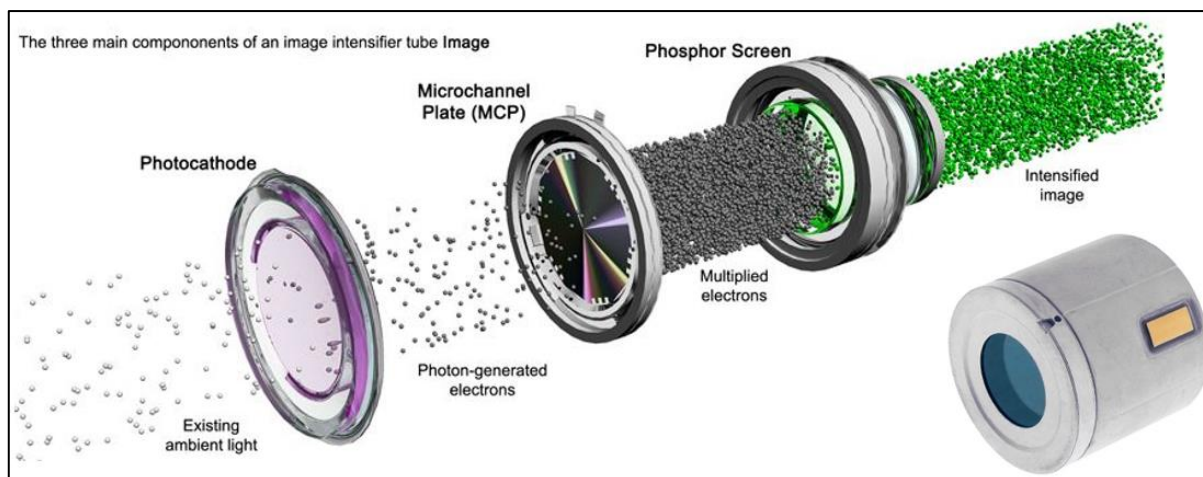
MKZJO pracují s fokusovaným zářením (zbytkovým osvětlením) na jeho první plochu – fotokatodu. Relativní spektrální citlivost noktovizoru, jako celku, tedy neovlivňuje pouze fotokatoda na MKZJO, ale první omezení spektra nastane na objektivu (viz kapitola NVIS filtry). Na fotokatodě dochází k přeměně obrazové informace (fotonů) na proud elektronů, někdy také označovaný jako fotoelektrony. Tato přeměna je uskutečněna pouze v případě, kdy vstupující (dopadající) záření na fotokatodu překonává mezní frekvenci daného materiálu pro uskutečnění vnějšího fotoefektu. Přičemž platí zákon zachování energie:

$$h \times f = W_v + E_k, \text{ kde} \quad (1.1) [5]$$

h	je Planckova konstanta ($6,626075 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)
f	je frekvence záření
W_v	je výstupní práce
E_k	je kinetická energie uvolněného elektronu

Následně emitované elektrony jsou pomocí vysokého rozdílu napětí (řádově kV) urychlovány a směřovány do mikrokanálkové destičky (MCP).

Tato destička (MCP) je složena až z 10^6 fotonásobičů, které jsou v těsné blízkosti a vytváří hexagonální strukturu. Zde díky následným několikanásobným odrazům dochází k násobení elektronů. Tento jev je uskutečněn za pomoci kaskádovité sekundární emise na dynodách fotonásobiče [5].



Obrázek 4: Schematická sestava částí MKZJO. Převzato z [12].

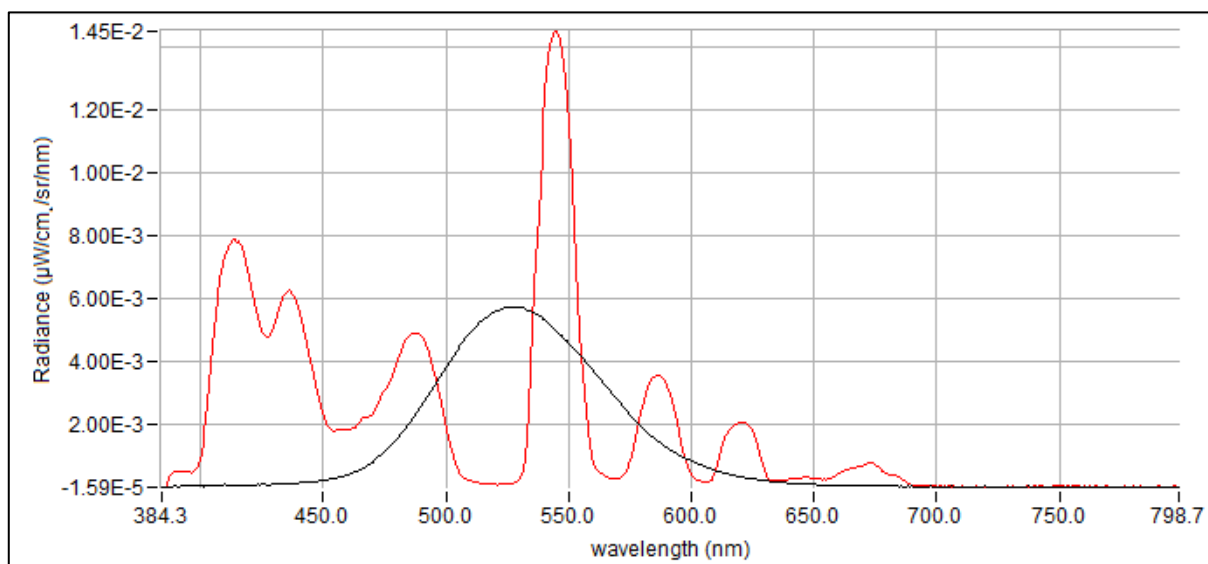
Tyto znásobené (až 10 000x) elektrony jsou směřovány na stínítko, které provádí přeměnu elektronů na světlo (fotony) viditelné okem. Přeměna je uskutečněna díky fotoluminiscenci s velmi rychlou odezvou, řádově ms (v některých případech až μ s). Jedná se o excitaci elektronu (díky absorbované energii) ze základní energetické hladiny na vyšší energetickou hladinu a následný zpětný přechod (případně přes metastabilní hladinu) na základní energetickou hladinu, který je doprovázen emisí energie ve formě viditelného světla.

Stínítko se skládá z optických vláken, luminoformu a hliníkové vrstvy, která dopomáhá vodivému kontaktu luminoformu, a tím zvyšuje jeho světelnou účinnost téměř až k 100 %. Druh luminoformu (označení P22, P43, P45 apod. viz obrázek 5.) je udán materiálem (oxidy např. gadolinium, lanthan, yttrium apod.), který má vliv na spektrální charakteristiku výsledného obrazu. [5]



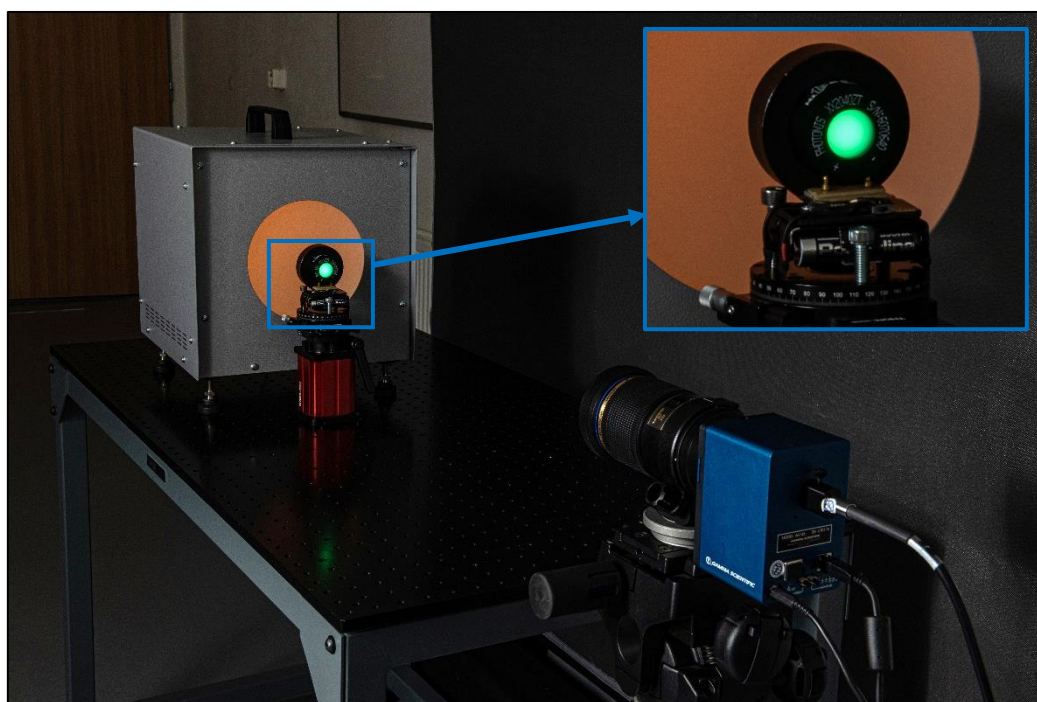
Obrázek 5: Vlevo obraz stínítka MKZJO s luminoforem typu P22, vpravo s typem P45.

Níže je srovnávací graf z laboratorního měření pro oba typy luminoforů:



Graf 1: Naměřená spektrální charakteristika luminoforu typu P22 – černá křivka a typu P45 – červená křivka.

Měření probíhalo v zatměné laboratoři, kdy byl samotný MKZJO vložen pouze do přípravku pro napájení a těsně před fotokatodou byla umístěna rovina s homogenním osvětlením 100 mlx. Samotné stínítko MKZJO bylo tedy měřeno napřímou bez vlivu případného okuláru noktovizoru.



Obrázek 6: Měření spektrální charakteristiky luminoforu MKZJO.

Volba barvy výsledného obrazu na stínítku má mimo subjektivní význam komfortu pozorování také vliv na případnou adaptaci na tmou po užití noktovizoru.

1.1.2 ANVIS typu AVS-9

Jak již bylo zmíněno ANVIS neboli brýle nočního vidění pro pilota (vojenských, záchranných nebo policejních složek) mají vícero nadstandardních požadavků na zobrazení (v porovnání s noktovizory pro pozemní užití). Pro užití ANVIS v letounech Armády České republiky, jako je L-159, nebo JAS-39C Gripen byly zvoleny brýle nočního vidění typu AN/AVS-9 (V), zkráceně AVS-9. Z optických parametrů pro AVS-9 je to například FOM > 2000, SNR > 28, středové rozlišení alespoň 64 č/mm. AVS-9 musí také spadat celkovou spektrální citlivostí do třídy NVIS-C (viz kapitola 1.4.2.3), jelikož letoun typu L-159 má průhledový displej, který musí být umožněno pilotovi pozorovat i přes AVS-9 a bez oslnění odečítat jeho hodnoty.

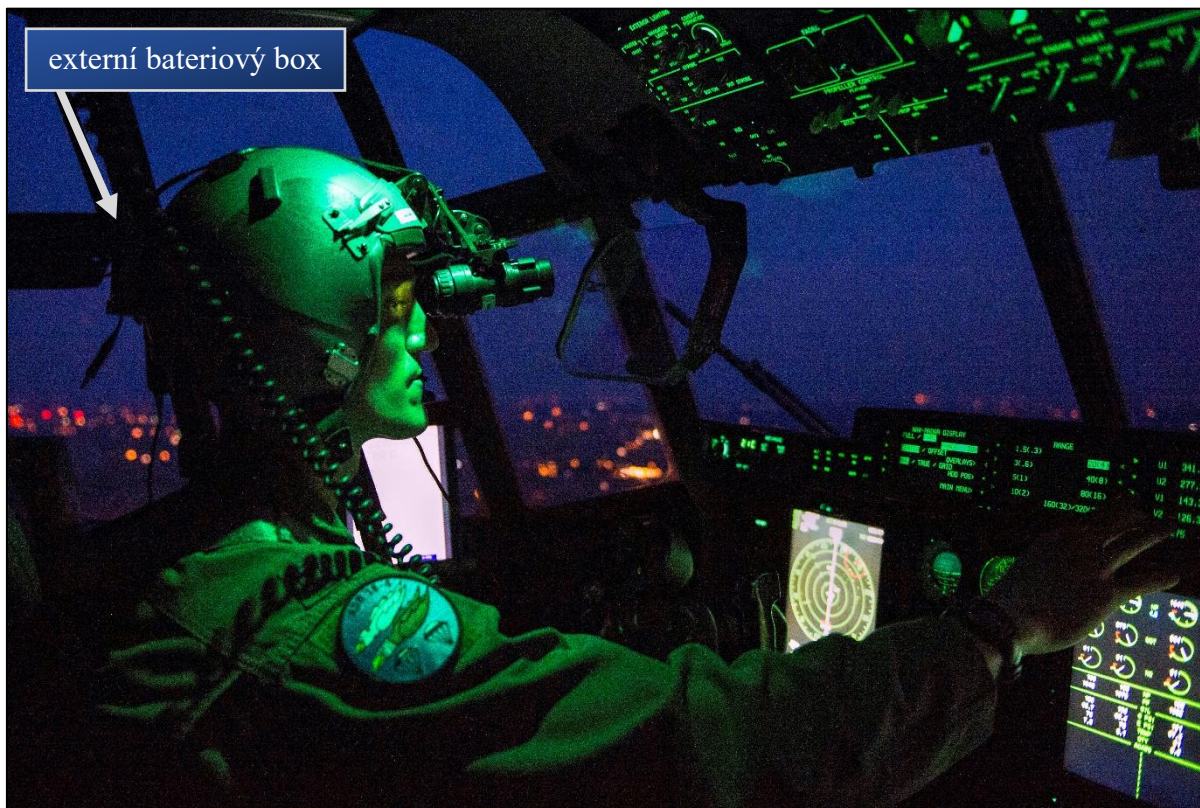
U ANVIS je žádoucí co nejmenší hmotnost, která v případě AVS-9 je 550 g. Dále uchycení na přilbě pilota musí být uzpůsobeno pro případné nouzové užití katapultáže z kokpitu – v tomto případě se ANVIS odpojí bez ohrožení pilota. Při nočních letech s ANVIS piloti užívají externí bateriový box (pro napájení ANVIS) standardně s několika vloženými kusy AA baterií, který se připevňuje na zadní část přilby. První důvod je zajištění určité pojistky pro případ selhání baterie přímo v ANVIS (obvykle 1 ks AA baterie). Druhým důvodem je pak pohodlí pilota – bateriový box v zadní části přilby totiž plní funkci “protizávaží“ k ANVIS. Tímto je tedy dosaženo lepšího vyvážení pro pohodlnější používání celku. Konkrétně u AVS-9 není samostatně baterie přímo v kitu noktovizoru, ale je obsažena v mezikuse přilbového adaptéru.



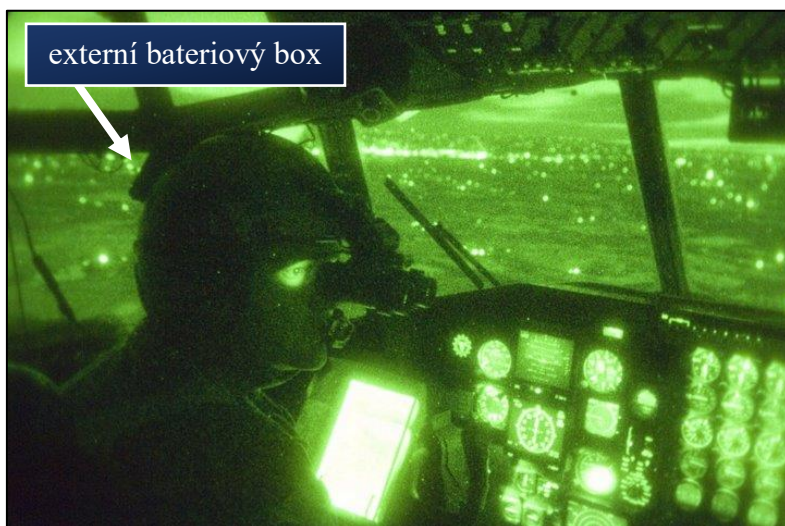
Obrázek 7: AVS-9 na přilbě HGU-55. Převzato z [15].



Obrázek 8: AVS-9. Převzato od výrobce z [10].



Obrázek 9: Pilot při užití AVS-9 s externím bateriovým boxem. Převzato z [16].



Obrázek 10: Pilot při užití AVS-9 s externím bateriovým boxem. Převzato od Pramacom-HT, spol. s r.o.



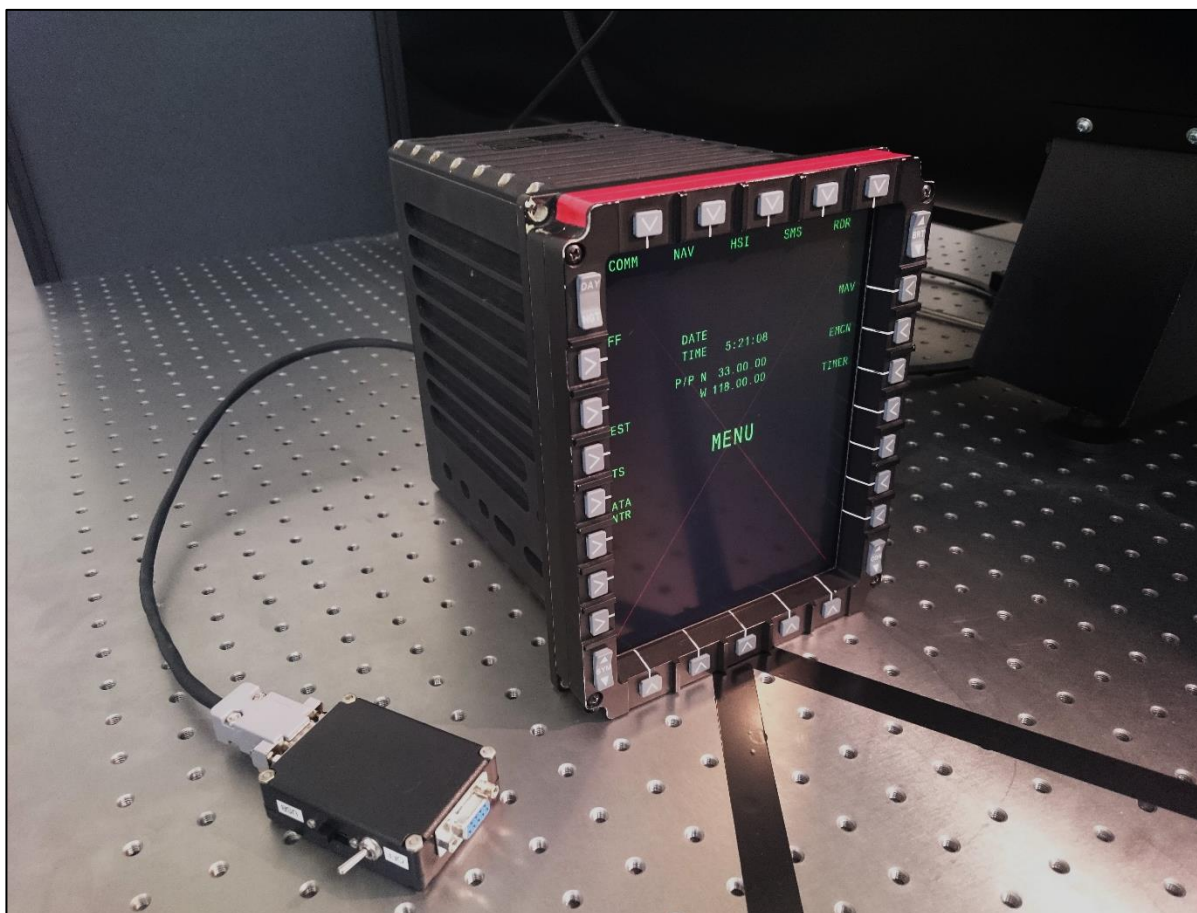
Obrázek 11: Externí bateriový box na 4 ks AA baterií. Převzato z [17].

Jak je patrné z obr. č. 9 a 10, pilot používá ANVIS předsazené před očima tak, aby mu byl umožněn pohled na přístrojovou desku a prostor kokpitu podhledem pod noktovizorem a současně pohled přes noktovizor z kokpitu ven. Správně zvolená třída NVIS filtru a MKZJO umožní kompatibilitu s daným vybavením jak kokpitu, tak vnějších světelných prvků letounu tak, aby nedocházelo k oslnění pilota, případně přesvětlení MKZJO a tím k halo efektu. Pilot má tedy možnost pozorovat přes ANVIS ukazatele v kokpitu i výhled do prostoru vně kokpitu.

1.2 Multifunkční displej (MFD)

MFD je barevný LCD displej 5x7 palce (přesně 5,07 x 6,75), tedy o úhlopříčce 8,44 palce a rozlišení 1024 x 768 pixelů, což odpovídá 128 pixelům na palec. Ovládání MFD je zajištěno 24 postranními hardwarovými tlačítky a 4 kolébkovými tlačítky. Každé tlačítko má daný znak podsvícený v oblasti NVIS green-B dle MIL-STD-3009 (viz kapitola 2.5.2). Displej byl účelově vyvinut, pro užití v kokpitu letounu L-159 společnosti AERO Vodochody AEROSPACE a.s. Mezi jeho odlišnosti od standardních displejů patří velký rozsah nastavení jasu, definovaná chromatičnost, velký kontrast atd. MFD musí být dobře čitelný na přímém denním slunci a současně být schopen zobrazovat takové hodnoty jasu, aby při nočních letech neoslňoval ANVIS a byl při jejich použití čitelný. Tím je kladen další požadavek, a to na kompatibilitu s ANVIS nejen pro jeho jas, ale také spektrální charakteristiky v souladu s MIL-STD-3009, nebo interní výrobní dokumentací V-CIDS-159-0003E společnosti AERO Vodochody AEROSPACE a.s. K dalším specifickým vlastnostem patří vnitřní ohřívání, pro provoz ve velmi nízkých teplotách, či zajištění vysokofrekvenčního stínění včetně pro oblasti LCD panelu. Celý MFD je testován pro extrémní rozsah operačních teplot včetně teplotních šoků, dále pak vibračních a rázových testů, tlakových zkoušek a v neposlední řadě testů vodotěsnosti.

MFD má tři základní režimy zobrazení, které se liší v nastavení jasu a chromatičnosti. Jsou to režimy DAY, NGT a NVIS. Režim DAY slouží pro zobrazování s nejvyššími hodnotami podsvícení MFD, tedy pro denní lety. Režim NGT je určen do horších světelných podmínek (šero, těsně po západu slunce, či před rozbřeskem apod.), ale stále ještě pilot nevyužívá ANVIS. Mód NVIS, jak již název napovídá, je cílen pro noční lety za užití ANVIS, tudíž MFD má v tomto režimu ze všech tří nejnižší hodnoty jasu. Každý z režimů má výchozí nastavené hodnoty podsvícení, které jsou regulovatelné v určitém vhodném rozmezí (viz výsledky měření v kapitole 2.4.2).



Obrázek 12: Foto MFD s postraními ovládacími tlačítky.



Obrázek 13: MFD při zatemněné laboratoři – můžeme vidět podsvícení ovládacích tlačítek.



Obrázek 14: MFD ze zadní strany propojeno s napájením a přidatným prototypem ovladače pro přepnutí na zobrazovací režim NVIS.

1.3 vojenský standard MIL-STD-3009

Ministerstvo obrany Spojených států amerických, odbor vojenského letectví, se sídlem v Pentagonu vydalo 2. února 2001 nový standard MIL-STD-3009. Jedná se o standard nahrazující předchozí MIL-L-85762A z roku 1988, který například neobsahuje třídu NVIS-C. MIL-STD-3009 specifikuje emisní charakteristiky zobrazovacích systémů a subsystémů v kokpitu letounů pro kompatibilitu s ANVIS.

Následující vybrané kapitoly popisují především charakteristiky zobrazovacích systémů z pohledu MIL-STD-3009, včetně podmínek jejich měření a následných výpočtů. Také jsou zde zahrnuty kapitoly o členění ANVIS podle typu technologie a podle spektrální citlivosti a propustnosti objektivů ANVIS.

1.3.1 Základní členění ANVIS

- Typ I. Jedná se o konfiguraci, kdy pilot má předsazený noktovizor (ANVIS) a přímo přes něj sleduje okolí, současně mu je umožněno podhledem pozorovat zobrazovací systémy v kokpitu.
- Typ II. V případě druhého typu je také pozorován zesílený obraz z ANVIS, ale ne napřímo. Obraz z ANVIS je promítán na průhledný zobrazovací panel v zorném poli pilota tzv. Head-Up Display (HUD), s možností zobrazení i dalších informací, podobně jako je tomu u průhledového displeje.[1]



Obrázek 15: ANVIS typu I. Převzato z [19].



Obrázek 16: ANVIS typu II. Převzato z [18].

1.3.2 NVIS třídy

Jedná se o tři třídy (viz graf č. 2), které definují relativní citlivost ANVIS pomocí přesně zadaných filtrů. Každá třída tedy představuje spektrální propustnost objektivu ANVIS s jeho NVIS filtrem.

1.3.2.1 Třída NVIS-A

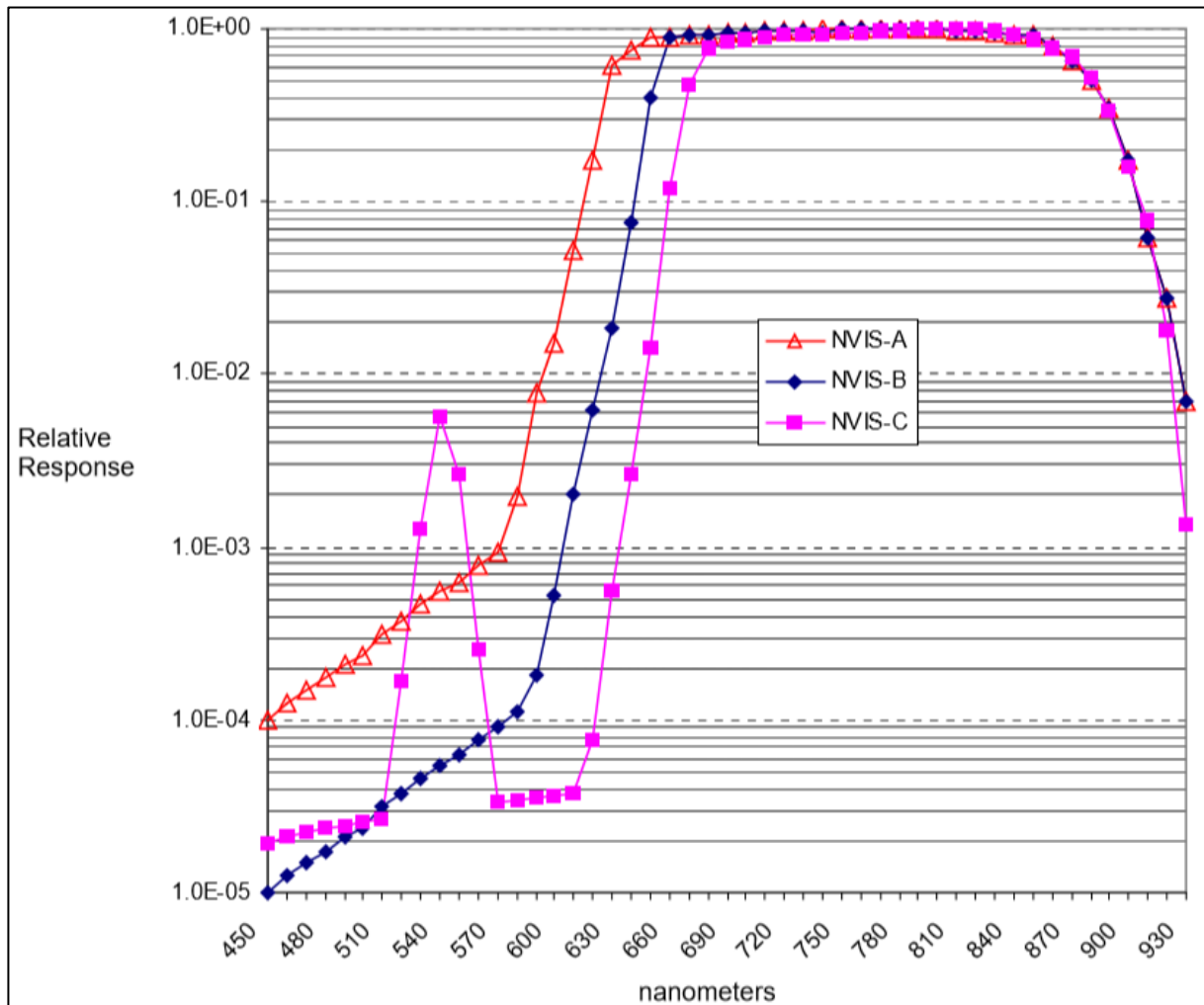
Jedná se o nejstarší NVIS třídu, která se vztahuje především na kvazimonochromatické zobrazovací systémy v kokpitech (ručičkové ukazatele, podsvícená tlačítka atd.). Odpovídá době, kdy ještě nebyly implementovány barevné displeje do letounů. Využívá se primárně ve vrtulnících, protože umožňuje především velmi dobré pozorování venkovního terénu. Vlnová délka 625 nm je spodní hranicí relativní citlivosti, což nám omezuje užití barevných multifunkčních displejů. [2]

1.3.2.2 Třída NVIS-B

NVIS-B třída je určena pro letouny s vyšší letovou hladinou, než u třídy NVIS-A. Spodní hranice relativní citlivosti se posouvá na 635 nm a také je snížena relativní citlivost v oblasti 450 až 635 nm. Tyto faktory umožní širší využití barev u avionických zobrazovacích systémů ve srovnání s třídou NVIS-A. [2]

1.3.2.3 Třída NVIS-C

U třídy NVIS-C začíná hranice relativní citlivosti až na 670 nm. Tím pádem je tedy možné použít plně barevný multifunkční displej, kde nám červená barva nezpůsobí přesvětlení výsledného obrazu. Dalším výrazným rysem třídy NVIS-C je pík zvýšené relativní citlivosti v oblasti 540 nm. Tento pík je určen pro umožnění pozorování průhledového displeje. Průhledový displej implementovaný v letounu L-159, nebo JAS-39C Gripen má kvazimonochromatickou charakteristiku vyzařování, která se pohybuje právě v blízkosti 540 nm. Díky tomuto píku se třída NVIS-C někdy hovorově označuje jako "leaky green". [1]



Graf 2: NVIS třídy a jejich relativní citlivost v závislosti na vlnové délce. Převzato z [1].

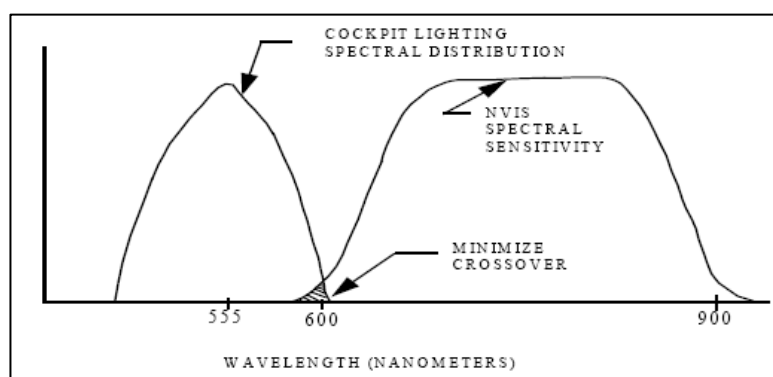
Na NVIS třídy je také možno pohlížet, jako na zobrazení spektrální oblasti, která bude díky ANVIS umožněna pozorovat očima. Nebude však totožné spektrum v předmětové rovině (před ANVIS) se spektrem v obrazové rovině, jelikož stínítko udá výslednou barvu obrazu. Jistá podobnost bude v intenzitě, do které však zasahuje také vícero faktorů (spektrální citlivost fotokatody, NVIS filtry atd.) které mohou snadno způsobit nepoměrné zobrazení intenzit na stínítku ANVIS.

1.3.3 NVIS filtry

Jak již bylo zmíněno, spektrální citlivost noktovizoru neovlivňuje pouze citlivost fotokatody u zvoleného MKZJO, ale jako první člen vymezující citlivost je objektiv a jeho případné NVIS filtry. Tyto filtry jsou realizovány za pomoci tenkých napařených vrstev oxidů kovů. Jedním ze základních principů filtrace spektra pomocí tenkých vrstev je navození destruktivní interference pro nežádoucí vlnové délky, které hodláme odfiltrovat, nebo naopak snížení celkové odraznosti (antireflexní vrstvy) pro žádoucí propustné pásmo. Používají se kombinace dvou a více napařených oxidů jako je oxid křemičitý (SiO_2), oxid titaničitý (TiO_2), fluorid hořečnatý (MgF_2), atd. Přičemž každý oxid má svou spektrální propustnost, se kterou je nutno počítat. Kombinují se tedy vhodné oxidy s vyšším indexem lomu (H) a nižším (L). Tímto, a také tloušťkou vrstev (obvykle násobek vlnové délky např. $\frac{1}{4} \lambda$) zavádíme žádoucí rozdíly optických drah mezi dopadajícím a odraženými zářením. Vznikají tak typy vrstev jako HL, LHL, LH a jejich násobky. Tyto filtry tedy společně s fotokatodou vymezí spektrální citlivost ANVIS.

Pro kompatibilitu je dále nutné vymezit spektrální charakteristiku všech zobrazovacích systémů v kokpitu. Díky standardu MIL-STD-3009 a jeho předchůdci MIL-L-85762A je možné měřit a specifikovat vhodnou spektrální vyzařovací charakteristiku zobrazovacích systémů pro dané NVIS třídy. Obecně platí, že by měl být minimální překryv pro spektrální citlivost ANVIS s vyzařovaným spektrem zobrazovacích systémů v kokpitu.

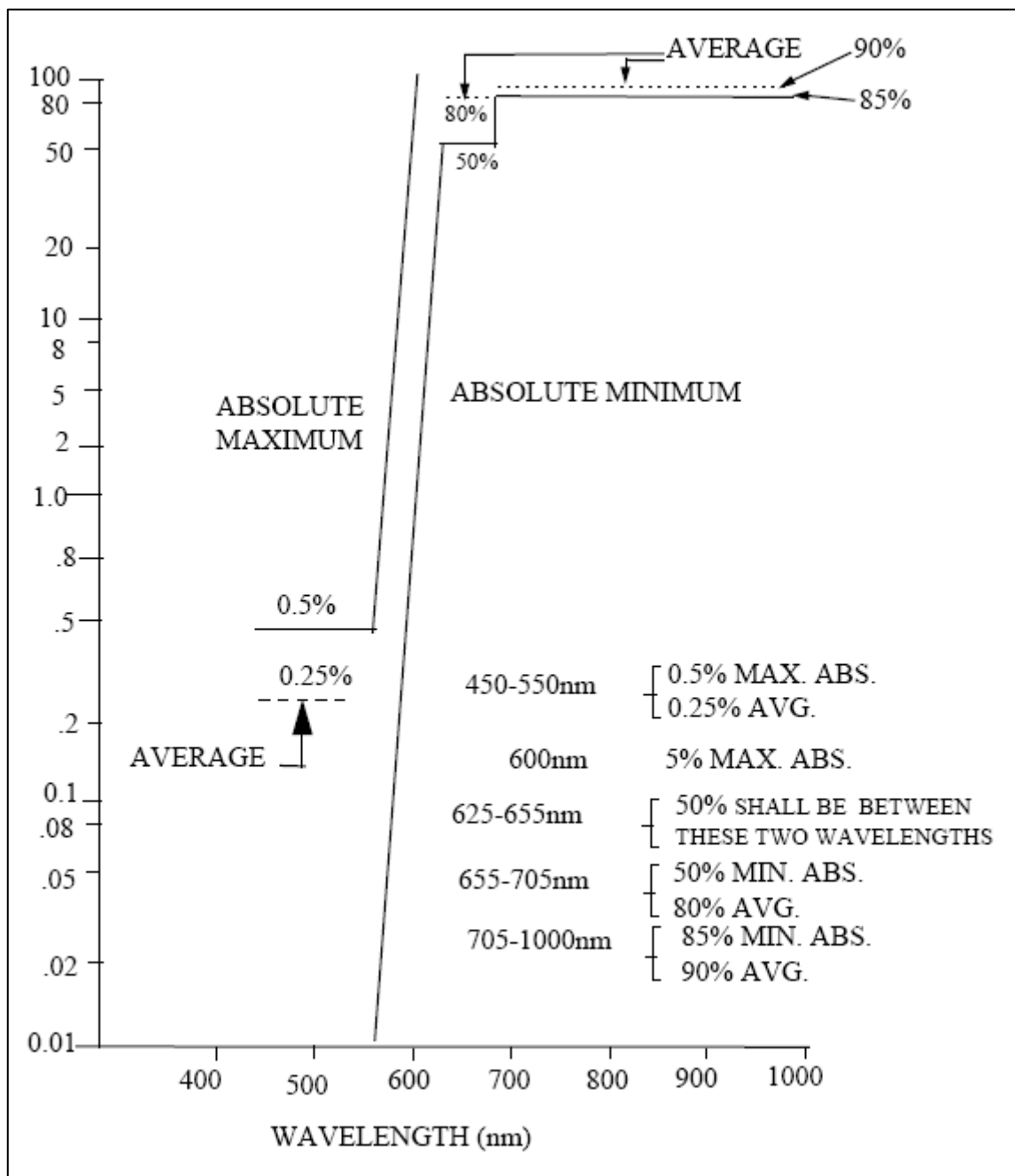
Před těmito standardy dostali výrobci pouze požadavek na kompatibilitu zobrazovacího systému s ANVIS a sami tedy interpretovali, zda je systém kompatibilní, či nikoliv. Někteří výrobci byli úspěšnější než jiní, jejichž systémy při pozdějším ověření nesplnily MIL-L-85762A, přesto, že byly prohlášeny za kompatibilní. [1]



Graf 3: Zobrazení spektrální citlivosti ANVIS a spektrální charakteristiky zobrazovacích systémů v kokpitu. Převzato z [1].

1.3.3.1 Filtr typu NVIS-A

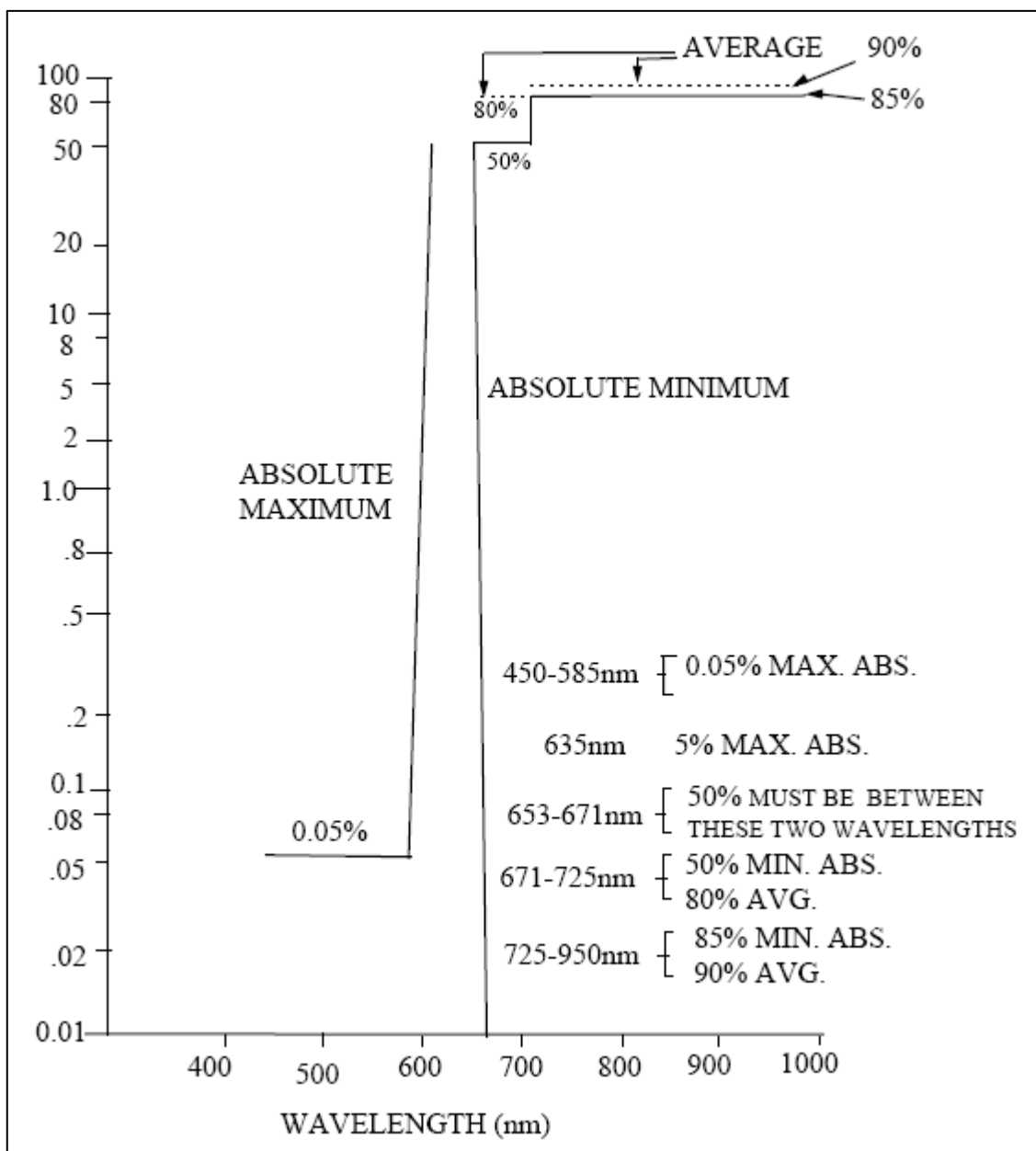
Níže v grafu je vyjádřena spektrální propustnost filtru v závislosti na vlnové délce. Nelze realizovat dokonalý ostrý přechod mezi propustnou a nepropustnou částí spektra, proto jsou zde uvedeny i limity pro splnění požadované spektrální charakteristiky. Z transmisní křivky, je patrné, že pro realizaci tohoto filtru byl užít princip High-pass filtru, který má propustnost až od vymezené vlnové délky (cut-off) v tomto případě od 600 nm.



Graf 4: Zobrazení propustnosti objektivu ANVIS pro třídu NVIS-A. Převzato z [1].

1.3.3.2 Filtr typu NVIS-B

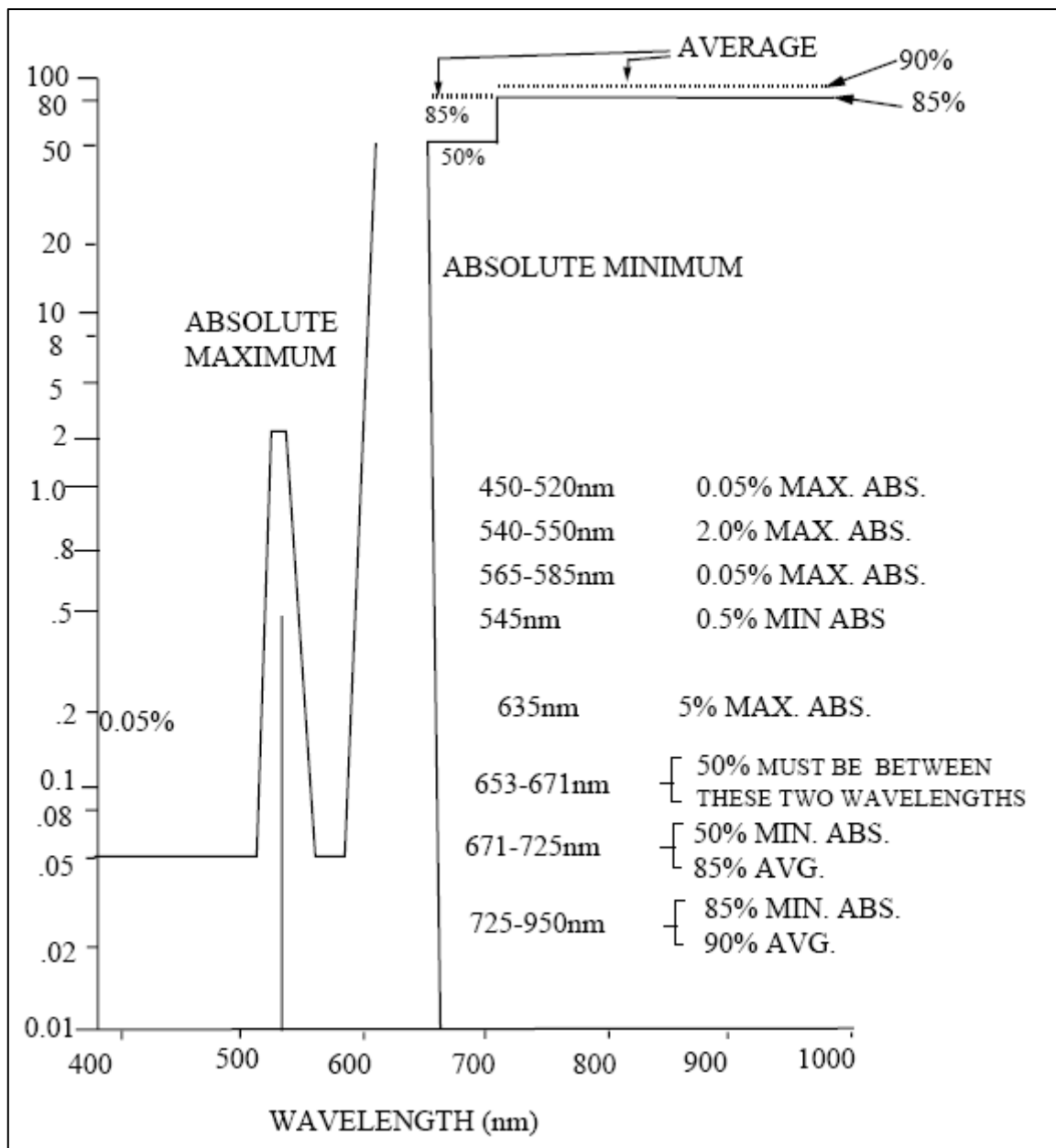
Níže v grafu je vyjádřena spektrální propustnost filtru v závislosti na vlnové délce. Jsou zde uvedeny i limity pro splnění požadované transmisní charakteristiky dané třídy. Ve srovnání s filtrem NVIS-A se posouvá začátek propustnosti až do oblasti 635 nm. Také se zvyšuje o jeden řád požadavek na eliminaci kratších vlnových délek, tedy pod 635 nm.



Graf 5: Zobrazení propustnosti objektivu ANVIS pro třídu NVIS-B. Převzato z [1].

1.3.3.3 Filtr typu NVIS-C

Jak můžeme vidět v grafu, transmise filtru typu NVIS-C začíná až u hranice 670 nm. Tato skutečnost právě umožňuje sledování barevných displejů v kokpitu. Také je zde oproti předchozím NVIS filtrů zanesen pík pro průhledový displej, který zobrazuje kvazimonochromaticky v oblasti 540 nm. Zde je tedy užita kombinace High-pass filtru s úzkopásmovým Band-pass filtrem pro 540-550 nm.



Graf 6: Zobrazení propustnosti objektivu ANVIS pro třídu NVIS-C. Převzato z [1].

1.3.4 Vybrané parametry určující kompatibilitu zobrazovacích systémů s ANVIS

V této kapitole bude nastíněna obecná teorie barev (od jejich zrakového vjemu až po výpočty objektivních parametrů) čerpaná především od pana Habla ze Základů světelné techniky, 2009. Následně kapitola volně přejde na výpočty spektrální záře, jasů, NVIS barev a na závěr kontrastu MFD. Nejdříve budou nastíněny výchozí a poté odvozené vztahy pro výpočty užití při měření v praktické části.

Pojem barva označuje pouze subjektivní odezvu lidského zrakového vjemu na daný světelný podnět. Celý tento proces umožňuje zraková dráha. Je to poměrně dlouhý řetězec prvků, který začíná u zpracování dopadajícího záření na sítnici, pokračuje přeměnou na odpovídající elektrický impuls, který je zrakovým nervem dále přenášen a vyhodnocován až v okcipitálním laloku mozku, tedy v týlní oblasti hlavy.

Protože barva, jak bylo nastíněno, je psychosenzorické povahy, je třeba pro laboratorní přesné objektivní měření definovat barevný podnět.

Barevný podnět lze definovat s pomocí křivky zahrnující závislost poměrné spektrální hustoty zářivého toku $\Phi_{e\lambda}$ na vlnové délce λ . Přičemž hodnoty $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ se vztahují k maximální hodnotě závislosti spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce (λ). [4]

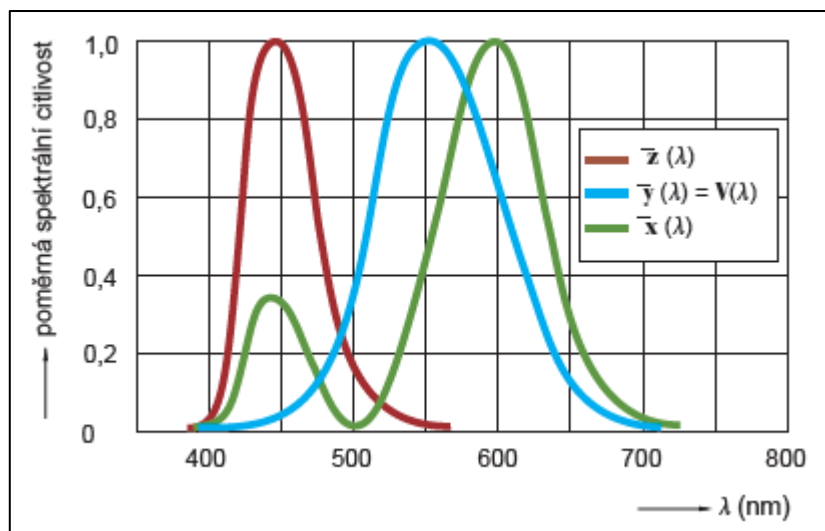
$$\Phi_{e\lambda \max} = \left(\frac{d\Phi_{e\lambda}}{d\lambda} \right)_{\max} ; \quad (1.1) [4]$$

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \frac{\left(\frac{d\Phi_{e\lambda}(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\lambda}}{\left(\frac{d\Phi_{e\lambda}(\lambda)}{d\lambda} \right)_{\max}} \quad (1.2) [4]$$

Díky tomu tedy lze objektivně popsat barevný vjem bez vnášení subjektivního vnímání barev lidským okem. Pro přesnou definici barvy je třeba využít některou z kolorimetrických soustav. Základní myšlenkou těchto soustav je kombinace tří měrných zdrojů (světél), díky jejichž aditivnímu míchání lze vytvořit libovolný barevný podnět. Proto se tyto soustavy někdy též nazývají trichromatické. Pro definování určitého barevného podnětu je zapotřebí tedy tři hodnot, jež se nazývají trichromatické složky. Tyto složky jsou označovány velkými písmeny jako např: X, Y, Z; R, G, B apod. Pro jejich výpočet se využijí kolorimetrické koeficienty značené následovně: [4]

$$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda) ; \bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$$

Tyto složky nám udávají množství barevných podnětů z měrných zdrojů (světla) dané trichromatické soustavy. Za pomoci těchto složek definujeme monochromatickou část spektra udanou konstantní hodnotou zářivého toku v pásmu zkoumaných vlnových délek. Níže v grafu č. 7 můžeme vidět křivky funkcí kolorimetrických koeficientů pro trichromatickou soustavu XYZ. [4]



Graf 7: Kolorimetrické koeficienty pro trichromatickou soustavu X, Y, Z. Převzato z [4].

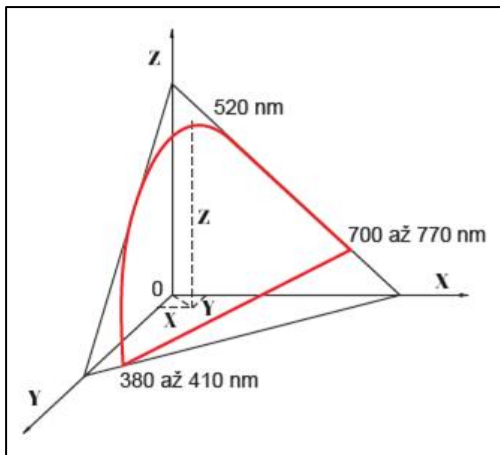
Trichromatické složky například pro soustavu XYZ se vypočítají za pomoci násobení spektrální hustoty zářivého toku $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ s kolorimetrickými koeficienty a následného integrování tohoto násobku přes celé pásmo zkoumaných vlnových délek [4].

$$X = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda ;$$

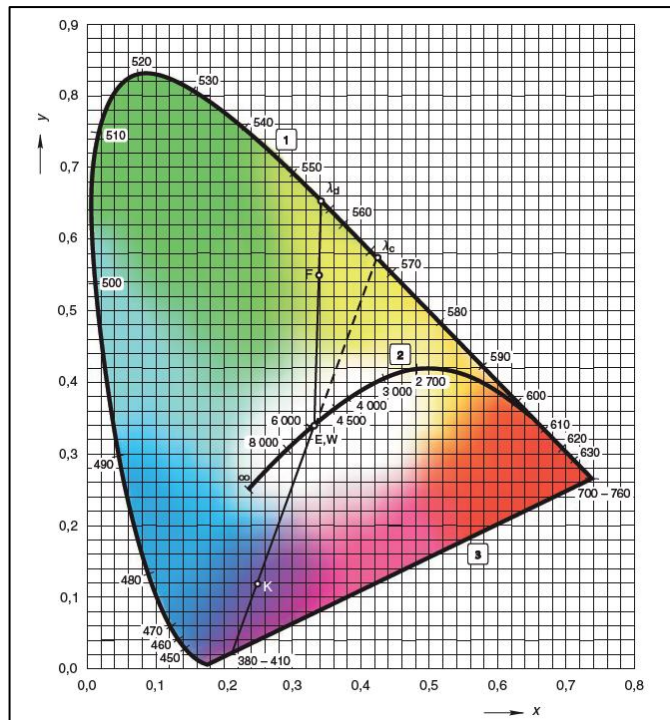
$$Y = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda ;$$

$$Z = \int_0^{\infty} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (1.3) [4]$$

Jak píše pan Habel v Základech světelné techniky, 2009, trichromatické složky jsou na sobě nezávislé a definují barevný podnět – barevný tón, sytost barvy a intenzitu, coby světelný tok, nebo jas. Je možno je znázornit v trojrozměrné soustavě. Pokud se protne tato trojrozměrná soustava XYZ s rovinou udanou jednotkovými úsečky začínajícími v počátku, vytvoří se v tomto prostoru tvar trojúhelníku, který je označován jako diagram chromatičnosti. Na obrázku 16. je znázorněn standardní případ, kdy velikost úsečky na všech třech osách kolorimetrické soustavy XYZ je rovna jedné. [4]



Obrázek 17: Diagram chromatičnosti v rovině $X + Y + Z = 1$. Převzato z [4].



Obrázek 18: Diagram chromatičnosti kolorimetrické soustavy XYZ v pravoúhlých souřadnicích x, y . Převzato z [4].

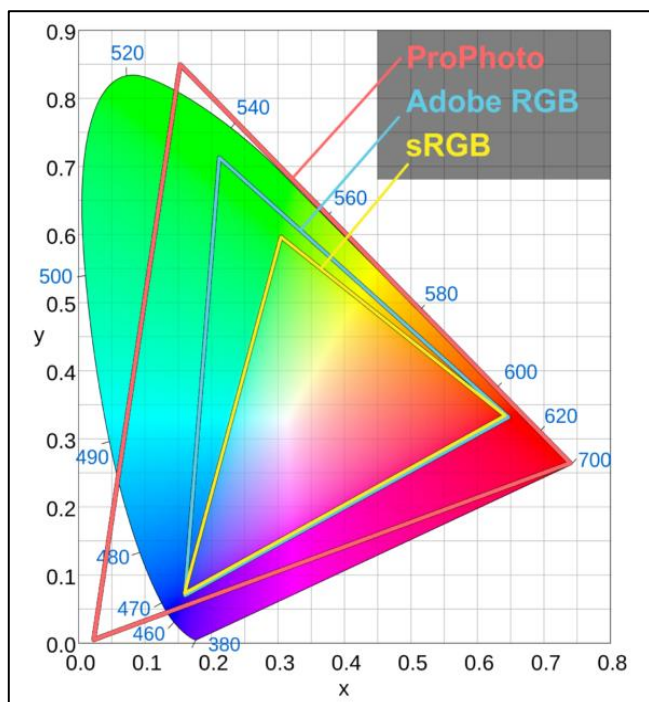
Na obr. č. 17 vidíme, že čisté spektrální barvy leží na křivce mezi stranami trojúhelníku. Každý bod uvnitř libovolného trichromatického diagramu definuje jednu určitou barvu [4].

Pokud se zabýváme pouze barvou bez ohledu na velikost spektrální hustoty zářivého toku (případně jasu), měříme tedy pouze hodnotu barevného tónu a sytosti, tak nám vystačí rovinný diagram chromatičnosti. V tomto diagramu k definování barevného podnětu potřebujeme dvě trichromatické souřadnice, které jsou obvykle značeny malými písmeny (např. x, y, z), jejichž výpočet provedeme ze znalosti trichromatických složek [4]:

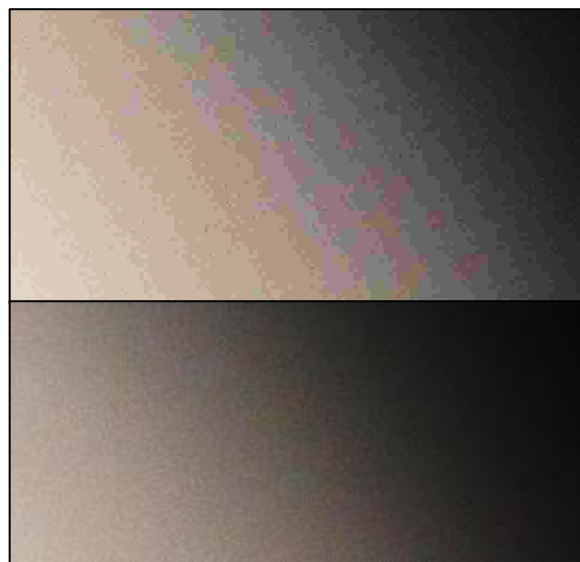
$$\begin{aligned}
 x &= \frac{X}{X+Y+Z}; \\
 y &= \frac{Y}{X+Y+Z}; \\
 z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (1.4) [4]
 \end{aligned}$$

Díky skutečnosti, že součet trichromatických složek je roven 1, stačí tedy znát pouze dvě složky. V soustavě XYZ také platí, že trichromatická složka Y je úměrná světelnému toku či jasu daného barevného podnětu. Jas tedy lze vypočítat pomocí vztahu: $L = 683Y$ ($\text{cd} \times \text{m}^2$) [4].

Tento diagram se dále využívá například pro znázornění tzv. barevného prostoru, označovaného jako gamut. Jde o oblast v diagramu chromatičnosti vymezenou daným souborem zdrojů, kterou je schopen daný systém zobrazovat za předpokladu aditivního míchání barev. Například u LCD displejů jsou zdrojem jednotlivé RGB subpixely, tedy jejich zobrazovací charakteristiky. Gamut sRGB zvládají pokrýt z velké části běžné monitory, zatímco větší barevné prostory, jako je Adobe RGB, jak již název napovídá, jsou určeny pro grafické profesionální monitory (práce s fotografiemi, grafikou apod.). V případě, že hodláme s těmito rozšířenými prostory pracovat, je již nutností např. u digitální fotografie využívat větší barevnou hloubku v RAW formátech, než je standardních 8 bitů (na kanál) v JPG. Mezi zřejmou výhodou širšího pojetí odstínů a sytostí barev lze též připočítat i zamezení nežádoucího efektu posterizace (ostré přechody mezi jednotlivými hodnoty jasu či odstínů barev). Pokud však hodláme pracovat s širším gamutem, a tím i vyšší bitovou hloubkou, je nutno s tímto pojmut kompatibilitu celého řetězce – od záznamu přes grafické možnosti PC (podpora grafické karty a softwaru), monitoru, až po samotný tisk. Je možné také převádět data z širšího gamutu do užšího např. z Adobe RGB do sRGB, zde však opět hrozí riziko vytvoření posterizace.



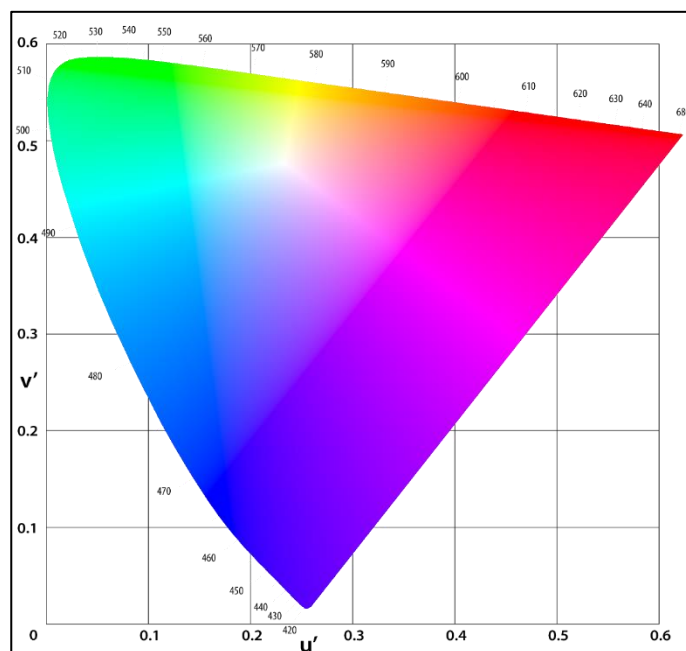
Obrázek 19: Zobrazení daných gamutů v diagramu chromatičnosti XYZ. Převzato z [20].



Obrázek 20: Nahoře příklad vzniku posterizace při nevhodném zpracování fotografie do JPEG formátu, dole původní fotografie v RAW formátu ve vyšší bitové hloubce.

V kolorimetrické soustavě CIE 1931 (XYZ) jsou uvedené zdroje (měrná světla) pouze teoretická, nikoliv realizovatelná. Proto ani stejně veliké rozdíly v některých místech této soustavy nemohou být okem vnímány jako stejnou mírou rozdílnosti. Pro určování chromatičnosti světel je tedy nutno využít rovnoměrnou kolorimetrickou soustavu. Od roku 1976 jsou to soustavy CIE LUV a CIE LAB, přičemž rovinný diagram CIE 1976 UCS vychází z CIE LUV, která je koncipována pro určování chromatičnosti světel. CIE LAB je cílen na měření kolority např. textilních materiálů. [4]

Tato práce se bude dále věnovat především trichromatické soustavě CIE LUV 1976, tedy například trichromatické souřadnice (u' a v') budou vztaženy k diagramu chromatičnosti CIE 1976 UCS (uniform chromaticity scale), proto výpočty budou následujícími úpravami, dle MIL-STD-3009, vztaženy k tomuto rovinnému diagramu chromatičnosti.



Obrázek 21: Rovinný diagram chromatičnosti CIE 1976 UCS s trichromatickými souřadnicemi u' a v' . Převzato z [14].

Pro výpočty jasových parametrů platí následující vztahy:

$$L = 683 \int_{380}^{780} K(\lambda)N(\lambda) d\lambda, \text{ kde} \quad (1.5) [1]$$

L je jas (Luminance) v jednotkách fL (footlambert), nebo cd/m^2

- $K(\lambda)$ je normalizovaná spektrální citlivost oka podle CIE 1931 standardizovaného pozorovatele
- $N(\lambda)$ je spektrální zář vyzařována komponenty ($\text{W/m}^2 \text{ sr nm}$)
- $d\lambda$ je integrace podle vlnové délky (λ) s krokem 5 nm dle MIL-STD-3009

Pro výpočty chromatičnosti primárních zdrojů záření (displejů, konzolí apod.) platí:

$$N(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{R(\lambda)} \quad (1.6) [1]$$

$$X = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1.7) [1]$$

$$Y = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (1.8) [1]$$

$$Z = \int_0^\infty \Phi_{e\lambda}(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (1.9) [1]$$

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.0) [1]$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2.1) [1]$$

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad (2.2) [1]$$

$$v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z}, \text{ kde} \quad (2.3) [1]$$

- $N(\lambda)$ je spektrální zář emitovaná měřenými komponenty
- $I(\lambda)$ je proud detektoru v ampérech
- $R(\lambda)$ je spektrální citlivost spektrometru ($\text{Ampéry cm}^2 \text{ sr nm/W}$)
- $d\lambda$ značí integraci podle vlnové délky (λ) s krokem 5 nm
- \bar{x} je funkce kolorimetrického koeficientu podle CIE 1931 (pro trichromatickou složku X)
- \bar{y} je funkce kolorimetrického koeficientu podle CIE 1931 (pro trichromatickou složku Y)
- \bar{z} je funkce kolorimetrického koeficientu podle CIE 1931 (pro trichromatickou složku Z)
- X, Y, Z jsou trichromatické složky soustavy XYZ

u', v' jsou trichromatické souřadnice diagramu chromatičnosti CIE 1976 UCS

x, y jsou trichromatické souřadnice diagramu chromatičnosti CIE 1931

Veškerá měření spektrální záře, jasu a chromatičnosti (s jedinou výjimkou měření kontrastu MFD při simulaci slunečního záření) se provádí v temné místnosti, která dle MIL-STD-3009 má podmínky definované jako neměřitelná spektrální zář pro měřené pásmo 380 až 930 nm, nebo maximálně ovlivnění do 1% z hodnoty měřeného parametru.

Výpočet škálovacího faktoru (S) pro NVIS zář:

$$S = \frac{L_r}{L_m}, \text{ kde} \quad (2.4) [1]$$

L_r je požadovaná úroveň jasu pro udanou hodnotu NVIS záře z tabulky III. v MIL-STD-3009.

L_m je jas změřený a průměrovaný výpočtem se stejnými daty, které jsou užity při výpočtu (2.5) a (2.6)

Ověření pro platný škálovací faktor musí být provedeno, pokud existují pochybnosti o tom, že jas a zář displeje nebo osvětlovací techniky mohou použít stejný škálovací faktor. Pokud nemohou být jas a zář displeje, nebo osvětlovací techniky škálovány společně, je třeba zář měřit při jasu udaném v tabulce III. [1]

Výpočet NVIS záře (NR_A) při specifickém jasu zobrazovacího systému třídy NVIS A:

$$NR_A = S \int_{450}^{930} G_A(\lambda)N(\lambda) d\lambda \quad (2.5) [1]$$

Výpočet NVIS záře (NR_B) při specifickém jasu zobrazovacího systému třídy NVIS B:

$$NR_B = S \int_{450}^{930} G_B(\lambda)N(\lambda) d\lambda, \text{ kde} \quad (2.6) [1]$$

$G_A(\lambda)$ je relativní NVIS citlivost zobrazovacího systému třídy NVIS A (viz tabulka IV.)

$G_B(\lambda)$ je relativní NVIS citlivost zobrazovacího systému třídy NVIS B (viz tabulka V.)

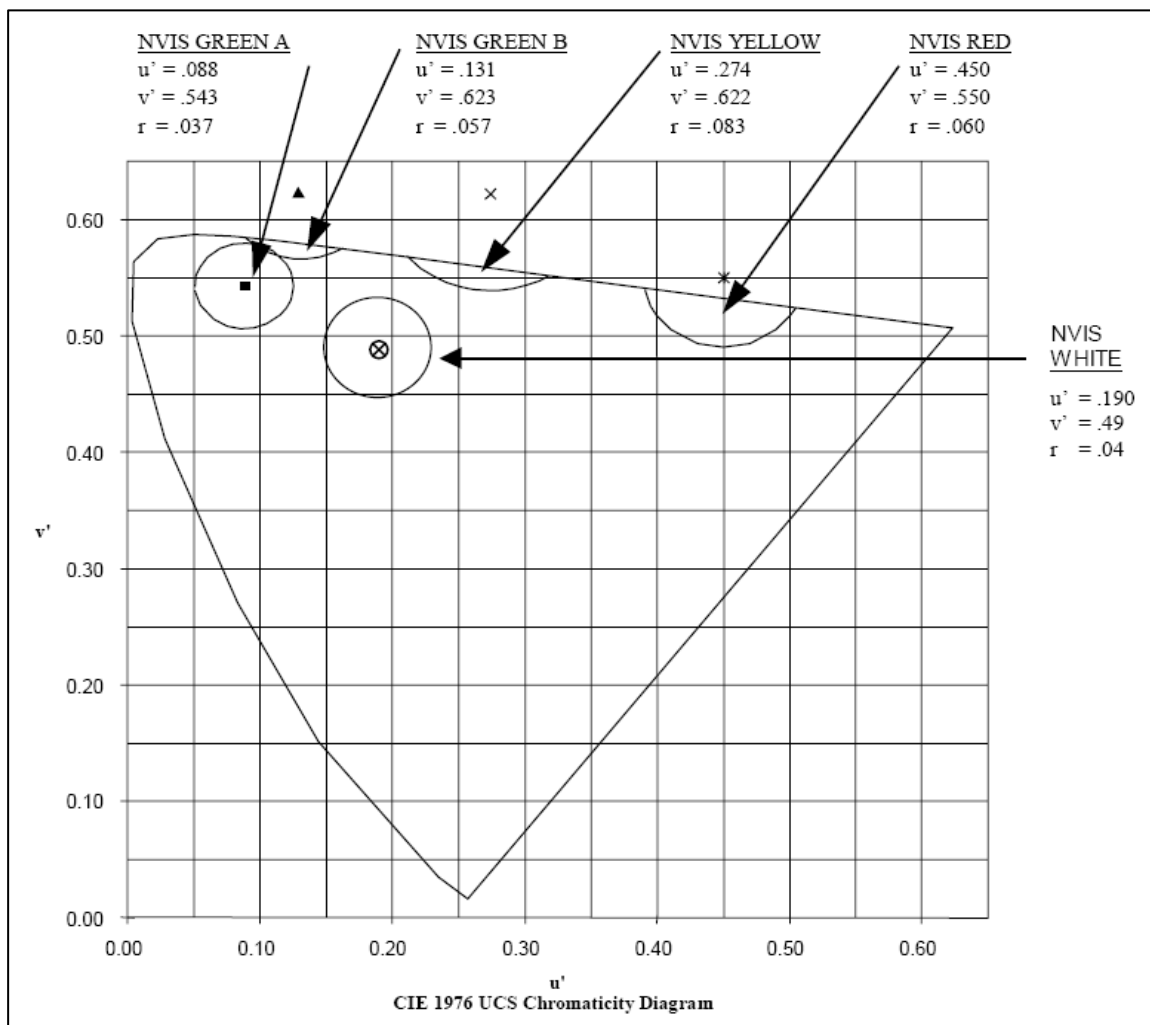
S je škálovací faktor

$d\lambda$ je integrace podle vlnové délky (λ) s krokem 5 nm dle MIL-STD-3009

Podsvícené prvky na přístrojové desce kokpitu, jako jsou ukazatele, symboly, či znaky mají definované souřadnice podle MIL-STD-3009, který přímo zavádí 5 NVIS barev (NVIS GREEN A, NVIS GREEN B, NVIS YELLOW, NVIS RED, NVIS WHITE). Každá tato barva je udána přesně vymezenou oblastí v soustavě CIE 1976 UCS – kruhem s udaným středem a definovaným poloměrem podle následujícího vztahu:

$$(u' - u'_1)^2 + (v' - v'_1)^2 \leq r^2, \text{ kde} \quad (2.7) [1]$$

- u', v' jsou naměřené trichromatické souřadnice v diagramu CIE 1976 UCS
- u'_1, v'_1 jsou definované trichromatické souřadnice určující střed kruhu dané NVIS barvy v diagramu CIE 1976 UCS
- r je poloměr kruhu se středem $(u'_1; v'_1)$, který vymezuje oblast v diagramu chromatičnosti CIE 1976 UCS pro danou NVIS barvu – udává tak povolenou toleranci odchylky od středu dané NVIS barvy.



Obrázek 22: Diagram chromatičnosti CIE 1976 UCS s vyznačenými oblastmi NVIS barev. Převzato z [1].

MIL-STD-3009 definuje typy zdrojů (primární, sekundární, HUD atd.) pomocí hodnot jasů (fL) a chromatičnosti do oblastí NVIS barev. Primárním zdrojem je myšlen např. displej, konzoly, ovládací panel rádia. Pro většinu parametrů zobrazovaných na displejích je nastavena třída NVS green A. Tato skutečnost vyplývá z vývoje displejů v letectví – z tzv. monochromatických displejů, případně průhledových, které vyzařují také pouze kvazimonochromaticky např. zelenou barvu.

V této práci je ale měřen barevný displej, i pro potřeby denního užití, kdy pilot nevyužívá ANVIS a pozoruje displej (MFD) pouze očima. Tyto podmínky MIL-STD-3009 vůbec nespecifikuje, jelikož se zabývá případy nočních letů. V NVIS barvách tedy (MIL-STD-3009) není obsažena modrá barva z několika důvodů. Prvotně na tuto část spektra není ANVIS citlivé, jelikož noktovizory mají za úkol zesilovat (násobit) zbytkové světlo po soumraku. Citlivé mají být tedy především na oblast delších vlnových délek světla s přesahem do záření blízké infračervené oblasti. Tyto oblasti jsou totiž v případě záře noční oblohy (odražený svit měsícem a zář hvězd) nejvíce zastoupeny, jak je vidět v praktické části v kapitole 2.7. Krátkovlnná část světla je obsažena v přímém (denním) slunečním svitu, kde její UV oblast se značně rozptýlí v ozonové vrstvě zemské atmosféry. Proto pro potřebu měření trichromatických souřadnic včetně modré barvy byly stanoveny referenční trichromatické souřadnice pro jednotlivé barvy dle výrobní dokumentace V-CIDS-159-0003E.

Výpočet kontrastu MFD

Jedná se o kontrast jasů MFD pro zobrazení černé (minimální jas) a bílé (maximální jas). Výpočet byl prováděn dle standardního vztahu č. 2.8, kdy kontrast (K) je podíl rozdílu a součtu jasů (fL) při zobrazení maximálního jasu (I_{max}), tedy bílé a minimálního jasu (I_{min}), tedy černé na multifunkčním displeji (viz vztah č. 2.8).

$$K = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad 2.8 \quad [13]$$

TABLE II. Chromaticity requirements.

Lighting component(s)	Para.	TYPE I					TYPE II														
		Class A			Class B		Class A			Class B											
		u'1	v'1	r	cd/m ² (fL)	NVIS Color	u'1	v'1	r	cd/m ² (fL)	NVIS Color	u'1	v'1	r	cd/m ² (fL)	NVIS Color					
Primary	4.3.4.1	.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A	Same as Class A	.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A	Same as Class A								
Secondary	4.3.4.2	.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A		.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A									
Illuminated controls	4.3.4.3	.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A		.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A									
Compartment lighting	4.3.4.4	.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A		.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A									
Utility, map, work, and inspection	4.3.4.5	.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A		.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A									
	4.3.4.5	.190	.49	.04	0.343 (0.1)	White		.190	.49	.04	0.343 (0.1)	White									
Caution and advisory signals	4.3.4.6	.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A		.088	.543	.037	0.343 (0.1)	Green A									
Jump lights	4.3.4.7	.088	.543	.037	17.2 (5.0)	Green A		.088	.543	.037	17.2 (5.0)	Green A									
		.274	.622	.083	51.5 (15.0)	Yellow		.274	.622	.083	51.5 (15.0)	Yellow									
Special lighting components where increased display emphasis by highly saturated (monochromatic) color is necessary, or adequate display light readability cannot be achieved with "GREEN A"	All of the above	.131	.623	.057	0.343 (0.1)	Green B		.131	.623	.057	0.1	Green B									
Warning signal	4.3.4.8.1	.274	.622	.083	51.5 (15.0)	Yellow	.274	.622	.083	51.5 (15.0)	Yellow	.274	.622	.083	51.5 (15.0)	Yellow					
		NOT APPLICABLE					.450	.550	.060	51.5 (15.0)	Red	NOT APPLICABLE									
Master caution signal	4.3.4.8.2	.274	.622	.083	51.5 (15.0)	Yellow	Same as Class A					.274	.622	.083	51.5 (15.0)	Yellow	Same as Class A				

Where:
u'1 and v'1 = 1976 UCS chromaticity coordinates of the center point of the specified color area.
r = radius of the allowable circular area on the 1976 UCS chromaticity diagram for the specified color.
fL = footlamberts

Tabulka II: Požadované trichromatické souřadnice pro dané zobrazovací systémy. Převzato z MIL-STD-3009.

TABLE III. NVIS radiance requirements (metric units)

Lighting components	Paragraph	TYPE I			TYPE II										
		Class A		Class B	Class A		Class B								
		Not Less Than: (nNR _A)	Not Greater Than: (nNR _A)	cd/m ²	Not Less Than: (nNR _B)	Not Greater Than: (nNR _B)	cd/m ²	Not Less Than: (nNR _A)	Not Greater Than: (nNR _A)	cd/m ²	Not Less Than: (nNR _B)	Not Greater Than: (nNR _B)	cd/m ²		
Primary	4.3.5.1	---	0.17	0.343	1/ Same as Class A	---	0.17	0.343	1/ Same as Class A						
Secondary	4.3.5.2	---	0.17	0.343		---	0.17	0.343							
Illuminated controls	4.3.5.3	---	0.17	0.343		---	0.17	0.343							
Compartment	4.3.5.4	---	0.17	0.343		---	0.17	0.343							
Utility, map, work, and inspection lights	Green	4.3.5.5	---	0.17		0.343	---	0.17		0.343					
	White	4.3.5.5	---	1.0		0.343	---	1.0		0.343					
Caution and advisory lights	4.3.5.6	---	0.17	0.343		---	0.17	0.343							
Jump lights	4.3.5.7	17.1	50	17.1		16	47	17.1		---	50	17.1	---	47	17.1
Warning signal	4.3.5.8	50	150	51.5		47	140	51.5		---	150	51.5	---	140	51.5
Master caution signal	4.3.5.8	50	150	51.5		47	140	51.5		---	150	51.5	---	140	51.5
Emergency exit lighting		50	150	51.5	47	140	51.5	---	150	51.5	---	140	51.5		
Electronic and electro-optical displays (monochromatic)		---	0.17	1.71	---	0.16	1.71	---	0.17	1.71	---	0.16	1.71		
Electronic and electro-optical displays (multi-color)	White	---	2.3	1.71	---	2.2	1.71	---	2.3	1.71	---	2.2	1.71		
	MAX	---	12	1.71	---	11	1.71	---	12	1.71	---	11	1.71		
HUD systems	4.3.5.10	1.71	5.1	17.1	1.6	4.7	17.1	---	17	17.1	---	1.6	17.1		

Where:
nNR_A = nano NVIS radiance requirements for Class A equipment.
nNR_B = nano NVIS radiance requirements for Class B equipment.
"nano", abbreviated "n", represents a factor of 10⁻⁹, which is factored out of the radiance numbers in this table.
cd/m² = Candela per square meter, sometimes called "nits".

NOTE 1. For these lighting components, Class B equipment shall meet all Class A requirements of this specification. The relative NVIS response data for Class A equipment, G_A(λ) (table III.a.), shall be substituted for G_B(λ) to calculate NVIS radiance.

Tabulka III: Hodnoty NR_A, NR_B daných zobrazovacích systémů pro výpočet NVIS záře podle požadovaného jasu (v metrických jednotkách). Převzato z MIL-STD-3009.

1.4 Spektrometr Gamma Scientific GS-1290-NVIS-2-RM

Pro měření spektrálních charakteristik existuje celá řada odlišných metod, ale obecně vzato se spektroskopie považuje právě za jedno z nejpřesnějších odvětví optiky. Pomocí přidružených metod lze měřit např. emisní zářivý tok, absorpenci (transmitanci), luminiscenční tok záření, tok rozptýleného záření atd.

Níže bude popsán alespoň základní princip hojně užívaného měření s pomocí spektrometrů. Dále bude nastíněn rozdíl mezi spektrometry a spektrometry a poté kapitola přejde k popisu specifického spektrometru společnosti Gamma Scientific, se kterým byla prováděna měření v praktické části.

Spektrometry mají vlastní definovaný širokospektrální zdroj záření a určují tak, jakým způsobem ovlivní měřený předmět toto známé pásmo vlnových délek. Používají se dvě typické konfigurace. První za pomoci monochromátoru (hranolu, nebo difrakční mřížky) a clony postupně oddělí jednotlivá úzká pásma (frekvence), které nechává jednotlivě interagovat (propouštět, absorbovat nebo odrážet) se vzorkem a následně vyhodnocovat jeho intenzitu pomocí detektoru za vzorkem. Druhou variantou je nechat interagovat se vzorkem celé spektrum zdroje najednou a monochromátorem oddělovat jednotlivé frekvence až po průchodu vzorkem. Těmito konfiguracemi lze převážně měřit propustnosti (absorbanci) a odrazivosti ve spektrální oblasti použitého zdroje. Jedná se tedy hlavně o “pasivní optické parametry“, nikoliv o vlastní vyzařování zkoumaného předmětu. Postup těchto metod obvykle začíná měřením charakteristiky sestavy bez vloženého zkoumaného předmětu (záznam neovlivněné referenční křivky). Následně se provádí měření se vzorkem, jež se posléze porovnává s původní referenční křivkou. Díky tomu lze určit, jakým způsobem ovlivňuje měřený předmět spektrální pásmo daného zdroje spektrometru. Tyto metody jsou užívány pro měření propustnosti, či odrazivosti rovinné optiky jako jsou převážně filtry, planparalelní destičky, ochranná skla apod., dále pro sférickou i asférickou optiku (objektivy, okuláry, dalekohledy a další podsestavy a sestavy), v neposlední řadě pro laboratorní měření roztoků (biologických vzorků, chemické analýzy apod.). V případech zkoumání spektrální propustnosti roztoků je obvykle roztok vkládán do referenční nádoby (kyvety), která je nejprve měřena bez vzorku a poté se vzorkem, aby bylo umožněno odečíst charakteristiku samotné kyvety.

Záleží na druhu aplikace, ale spektrometry jsou realizovány, jako otevřené sestavy, či standardní uzavřené. Pro měření sférické a asférické optiky, sestav atd., kde je předpoklad častých změn v konfiguraci geometrie měření, či rozměrnějších měřených předmětů se volí

zpravidla otevřený typ spektrometru. Ten využívá další komponenty, jako kolimátory, integrační koule, světlovody atd. Je zde i možnost změny samotného zdroje záření, za předpokladu kompatibility všech prvků sestavy pro danou spektrální oblast, čím lze rozšířit spektrální oblast měření. Softwarově pak bývá možnost sloučit naměřené křivky do jednoho výsledného grafu.

Oproti tomu uzavřený typ spektrometru jako je např Perkin-Elmer na obr. č. 23, má nutné komponenty již obsaženy. Také místo pro konfiguraci geometrie měření je vymezeno uzavíratelným (světlotěsným) prostorem pro měřený vzorek.



Obrázek 23: Spektrometr Perkin-Elmer Lambda 1050. Převzato z [21].

Spektroradiometry oproti spektrometrům nemají vlastní přesně definovaný zdroj záření, ale měří neznámý zářivý tok. Vyhodnocování samotného zářivého toku měřeného předmětu, je umožněno díky přesné kalibraci detektoru (jak amplitudové, tak spektrální, jimž bude věnována další kapitola). Měřená spektrální zář je buď emitována přímo měřeným předmětem (displej, LED diody apod.), případně odrážena z jiných okolních zdrojů záření.

Základním principem je směřovat záření zkoumaného předmětu na difrakční mřížku, která prostorově rozdělí měřené spektrum na jednotlivé spektrální čáry (frekvence), které jsou pak vyhodnocovány CCD chlazeným detektorem. Detektor vychází z přesné odezvy, kterou vyvolal standardizovaný zdroj záření, která je uložena jako kalibrační soubor pro danou aperturu zorného pole (případně další prvky, jako objektiv, světlovod atd. které v konfiguraci mohou ovlivnit měření).

Spektroradiometr Gamma Scientific GS-1290-NVIS-2-RM má externí měřicí hlavici, která obsahuje šest apertur zorného pole (5°, 2°, 1°, 0,5°, 0,33°, 0,1°), mezi nimiž volíme dle konkrétních podmínek měření. Na této externí měřicí hlavici je makro (zoomovací) objektiv 180 mm 1:3,5 a dále je pak její součástí LED zdroj, jež slouží pro zobrazení (přes aperturu zorného pole a objektiv) měřeného spotu na předmětovou rovinu, což nám umožní přesné zaměření oblasti, která bude měřena. Toto promítnutí spotu také slouží pro hrubé zaostření roviny v měřeném místě. Finální ostření pak probíhá na připojeném notebooku v softwaru LightTouch, ve kterém je možnost zobrazit obrazovou rovinu přes měřicí hlavici současně s promítnutým spotem neboli přesnou oblastí měření. Externí měřicí hlavice je propojena se samotným spektroradiometrem pomocí světlovodu (Fiber Optic Probe), do kterého je právě fokusováno záření pro následné měření spektroradiometrem a vyhodnocením naměřených hodnot v PC softwaru LightTouch. Díky tomu může být realizováno měření i v prostorově náročných podmínkách, jako je například kokpit stíhacího letounu. Nutno však brát v potaz minimální zaostřovací vzdálenost objektivu přibližně 56 cm a realizaci zatemnění. Výpočty trichromatických souřadnic, NVIS spektrální záře a jasu jsou prováděny softwarově v programu LightTouch. Jak již bylo u MFD uvedeno, jedná se o displej s velkým rozsahem zobrazení jasů, z čehož vyplývá, že spektroradiometr pro tato měření musí být schopen měřit stejný rozsah, ideálně o několik řádů větší, aby se předešlo vysoké míře šumu či hodnot jasů limitovaných přeexponováním CCD detektoru. V následujících dvou tabulkách jsou uvedeny vybrané parametry užitého spektroradiometru, včetně případů zvolené dané apertury zorného pole.

Specifikace spektroradiometru Gamma Scientific GS-1290-NVIS-2-RM *	
parametr	hodnota
spektrální citlivost	380 – 1100nm
spektrální rozlišení	0,9 nm
přesnost určení vlnové délky (Wavelength Accuracy)	> 0,5 nm
polarizační chyba	< 1%
ohnisková vzdálenost makroobjektivu	180 mm
velikosti apertur zorného pole	5°, 2°, 1°, 0,5°, 0,33°, 0,1°
délka světlovodu (Fiber Optic Probe)	2 m

* Hodnoty uvedené v tabulce převzaty od výrobce z [7].

Specifikace jednotlivých apertur zorného pole v externí měřící hlavici *			
apertura	rozsah jasů [cd/m ²]	tolerance chromatičnosti	velikost měřené oblasti (spotu) [mm] pro pracovní vzdálenost 279 mm
5,0°	1,5 x 10 ⁻⁵ až 3,6 x 10 ⁴	x, y: ± 0,002	10,49
2,0°	2,2 x 10 ⁻⁵ až 5,4 x 10 ⁴	x, y: ± 0,002	4,20
1,0°	9,0 x 10 ⁻⁵ až 2,2 x 10 ⁵	x, y: ± 0,0025	2,08
0,5°	3,4 x 10 ⁻⁴ až 8,3 x 10 ⁵	x, y: ± 0,0025	1,02
0,33°	1,6 x 10 ⁻⁴ až 3,9 x 10 ⁶	x, y: ± 0,0025	0,64
0,1°	9,0 x 10 ⁻³ až 2,2 x 10 ⁷	x, y: ± 0,0025	0,17

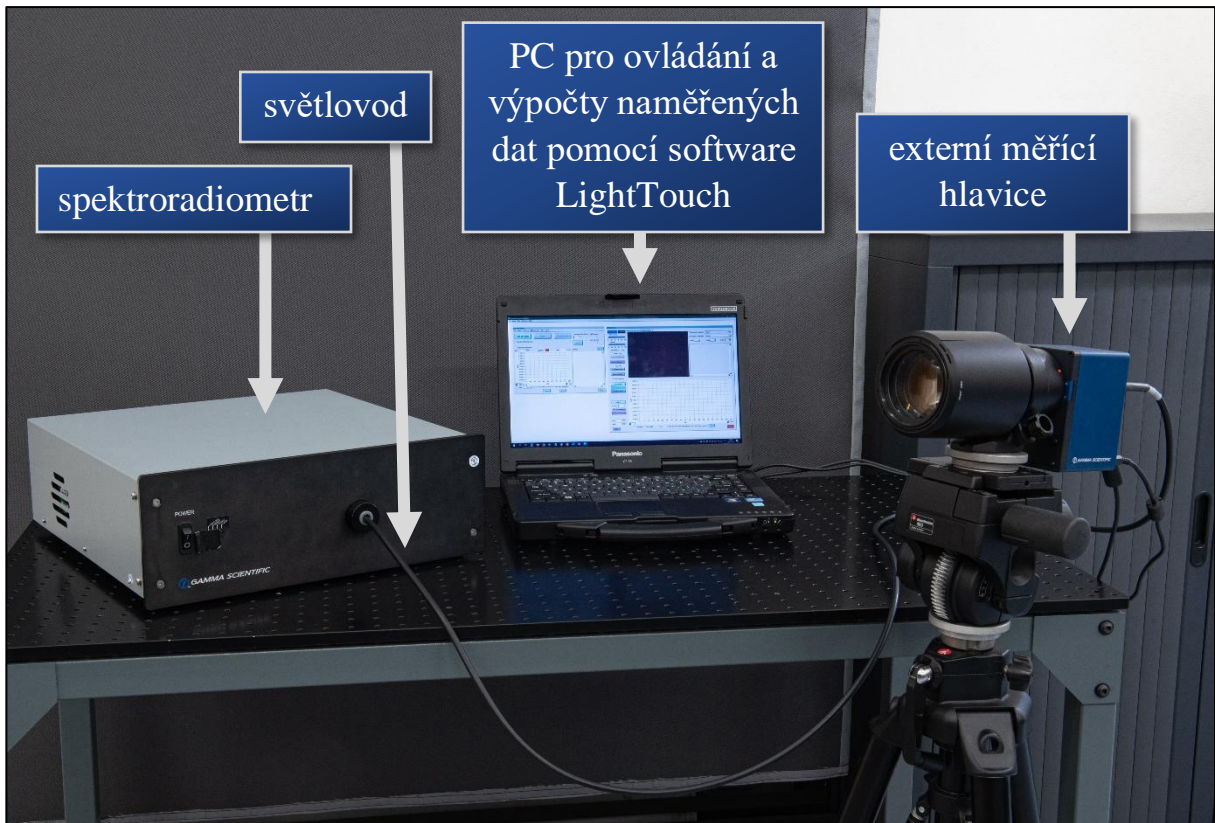
* Hodnoty uvedené v tabulce převzaty od výrobce z [7].

Každé spektrometrické měření začínalo hrubým zaostřením promítaného měřícího spotu na měřenou oblast (LCD displej, podsvícené tlačítko, ukazatel atd.), přičemž se zvolila optimální velikost apertury. Kalibrační soubory a samotná měření záře (amplitudy – intenzity) jsou normovány (vztaženy) k prostorovému úhlu. Z toho důvodu se volí srovnatelná velikost apertury zorného pole s měřenou plochou vyzařování. V případě plošných zdrojů s rovnoměrným rozložením jasů, jako je např. níže uvedený kalibrační zdroj RS-12DN, nezávisí výsledek měření na volbě velikosti apertury zorného pole.

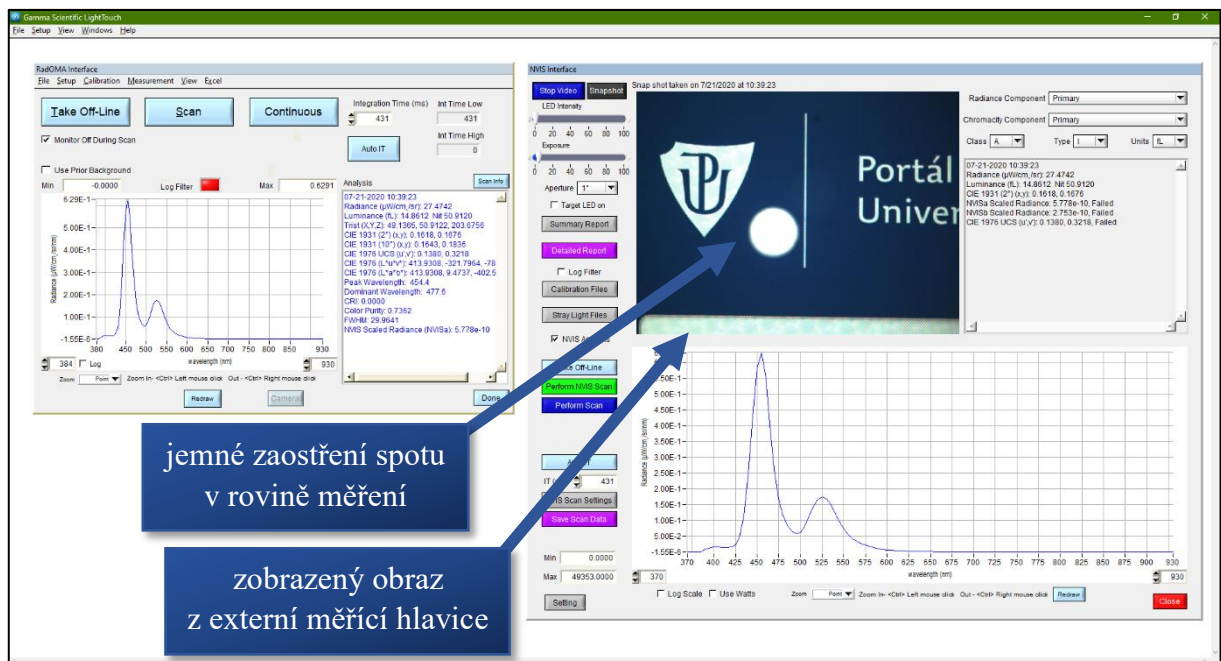
Následovalo jemné ruční zaostření obrazu zobrazeného v softwaru LightTouch, kde se i zadal kalibrační (amplitudový) soubor pro zvolenou aperturu. Následně se na externí hlavici přeprnula závěrka do režimu měření, tedy fokusace záření do světlovodu. V této chvíli se zatemnila laboratoř a spustilo se automatické nastavení integračního času měření (doba snímání podle nasycení pixelů CCD detektoru). Pro nízko-úrovňová měření se může čas pohybovat v řádu jednotek minut. Pokud nastalo přexponování detektoru, bylo třeba zadat ručně integrační čas. Při spuštění měření se vypnul displej notebooku, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Pro každé měření byl vyhodnocen adaptivní (dynamický) čas expozice podle SNR a dále také odečten teplotní šum detektoru.

V průběhu vytváření této práce byl spektrometr u výrobce kvůli zakoupení nového modelu externí měřící hlavice a současně byl rekalibrován. Tato nová měřící hlavice umožňuje měnit aperturu zorného pole i softwarově v programu LightTouch, ale byla ponechána i možnost volby apertury manuálně přes tlačítko na zadní straně hlavice. Stejně tak regulaci intenzity promítaného měřícího spotu lze nově ovládat pouze přes prostředí LightTouch. Další změnou je LED dioda (v externí měřící hlavici), která má nyní bílou barvu, nikoliv červenou, jako tomu bylo u předešlého modelu. Z tohoto důvodu lze vidět např. při měření chromatičnosti

na podsvětleném tlačítku MFD červený spot (měření s původní hlavicí), zatímco při měření odrazu měsíčního svitu na zeleném listoví v kapitole 2.7, je patrný bílý spot měřené oblasti (měření s novou hlavicí).



Obrázek 24: Kompletní sestava spektrometru Gamma Scientific GS-1290-NVIS-2-RM.



Obrázek 25: Softwarové prostředí LightTouch (náznorné měření displeje PC s webovou stránkou UP).



Obrázek 26: Současný nový model externí měřící hlavice s připojeným světlovodem.

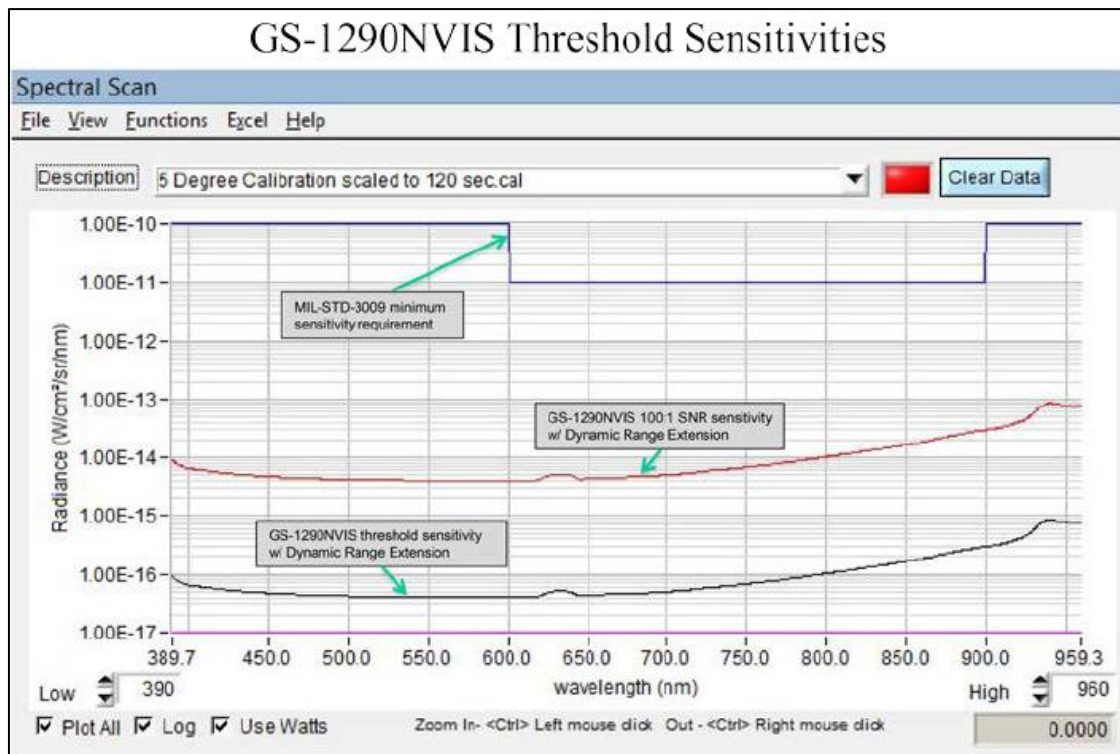


Obrázek 27: Předěšlý model externí měřící hlavice s manuálně otočnou kalotou obsahující clony zorného pole.

Měření nízkých jasů, jako je podsvícení zobrazovacích subsystémů, jsou náročná na citlivost spektrometru, která byla limitována v MIL-STD-3009 (Appendix A.3.2) jako minimální poměr signál : šum 10:1, aby šum minimálně ovlivňoval měření. Jelikož tento poměr je na spektrometry v některých situacích velmi náročný, byla v MIL-STD-3009 zavedena následující podmínka. V případě splnění podmínky, kdy pro jas nebo zář zobrazovacího systému je platný stejný škálovací faktor jako pro osvětlovací techniku, lze zvýšit jas tohoto zobrazovacího systému pro NVIS zář L_r (0,1fL) až na 15 fL. Díky tomuto se tedy zvyšuje i poměr signál:šum, což klade menší nároky na citlivost spektrometrů. Ovšem je nutné splnit podmínku totožného škálování, která není splněna např. u LCD displejů. [6]

Jedním z hlavních zdrojů šumu u spektrometrů je šum vznikající na samotném CCD detektoru označován jako temný proud či teplotní šum. Jedná se o případ, kdy vlivem tepla CCD generuje signál, i když na detektor žádný nedopadá. Pro minimalizaci tohoto šumu, který se nelineárně vztahuje k operační teplotě detektoru a také jeho okolí, je v případě spektrometru Gamma Scientific použito dvoustupňové chlazení. Teplota CCD detektoru je tak stabilně udržována na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šum tohoto typu lze zaznamenat při dokonalém zatemnění detektoru, což umožní následné odečtení tohoto šumu od měření. Jako další zdroj nežádoucího šumu měření lze považovat parazitní světlo (zář). Tento šum ovlivní spektrální čistotu měření, tedy to, jak přesně bude daná vlnová délka odpovídat naměřeným hodnotám. Parazitní zář může do měření vnést velkou chybu, pokud se například dostane až k samotnému CCD detektoru. Tam může způsobit odezvu v místě citlivosti čipu např. pro blízkou IR oblast, která nemusí být vůbec obsažena v měřeném záření, ale díky tomuto se přesto ve výsledku měření objeví a zcela jej tak degraduje. Použitý spektrometr společnosti Gamma Scientific má tento šum eliminován na velmi nízkou hodnotu, konkrétně pro 633 nm (oblast přechodu citlivosti NVIS tříd) může ovlivňovat měření řádově pod 10^{-4} . Další eliminaci šumu zajišťuje adaptivní (dynamický) integrační čas, který zohlední poměr signál:šum (SNR) v celém měřeném spektru a upraví tak výsledný užitý integrační čas měření (expozici) pro danou část spektra. Běžné spektrometry provádí pouze jedno měření, pro které provedou nastavení expozice tak, aby maximální hodnota signálu byla těsně pod horní hranicí rozsahu citlivosti CCD čipu, tedy těsně pod jeho přexponováním. To může ale mít za následek velký šum, pokud jsou současně v oblasti měření vedle vysokých i nízké hodnoty jasu. [6]

Díky těmto korekcím šumu je možno dosahovat vysokého dynamického rozsahu citlivosti spektrometru s dynamickými hodnoty SNR, jako je tomu u užitého spektrometru Gamma Scientific. Díky tomu může používat velmi malé apertury zorného pole, které mají samozřejmě zásadní vliv na velikost měřené záře dopadající na detektor spektrometru. [6]



Obrázek 28: Zobrazení prahových citlivostí spektrometru Gamma Scientific (černá a červená křivka) spolu s minimální požadovanou citlivostí spektrometru dle MIL-STD-3009 (modrá křivka). Převzato od výrobce z [6].

Z výše uvedených důvodů je užitý spektrometr vhodný pro nízko-úrovňové měření dle standardu MIL-STD-3009.

2 Praktická část

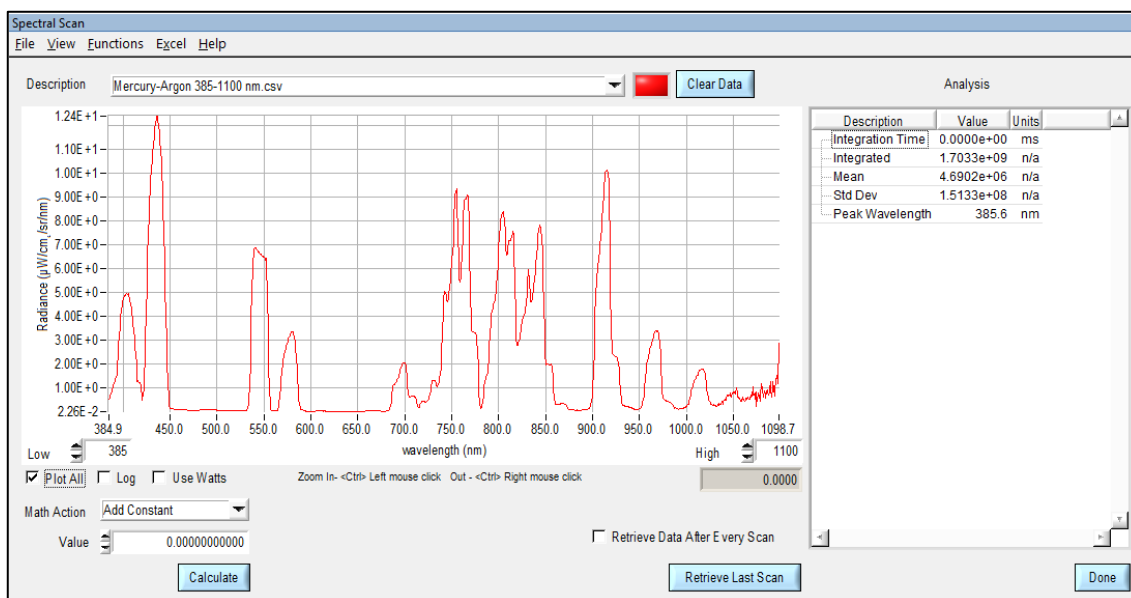
V následujících kapitolách bude uveden princip kalibrace spektrometru, ověřovací měření užitého širokospektrálního zdroje, krátká kapitola objasňující síťovou strukturu implementovanou v MFD a následná měření se zpracovanými výsledky. U jednotlivých měřených parametrů bude vždy uvedena geometrie měření a zhodnocení výsledků vzhledem k charakteru daného parametru.

2.1 Kalibrace spektrometru Gamma Scientific GS-1290-NVIS-2-RM

Následující dvě kapitoly budou objasňovat principy kalibrace spektrometru. Pro měření byla platná kalibrace přímo od výrobce, která byla v průběhu měření opětovně ověřována. Nejprve bude zmíněn princip spektrální a poté amplitudové kalibrace použitého spektrometru Gamma Scientific. Současně budou uvedeny výsledky vlastních kalibrací srovnávané s kalibrací výrobce.

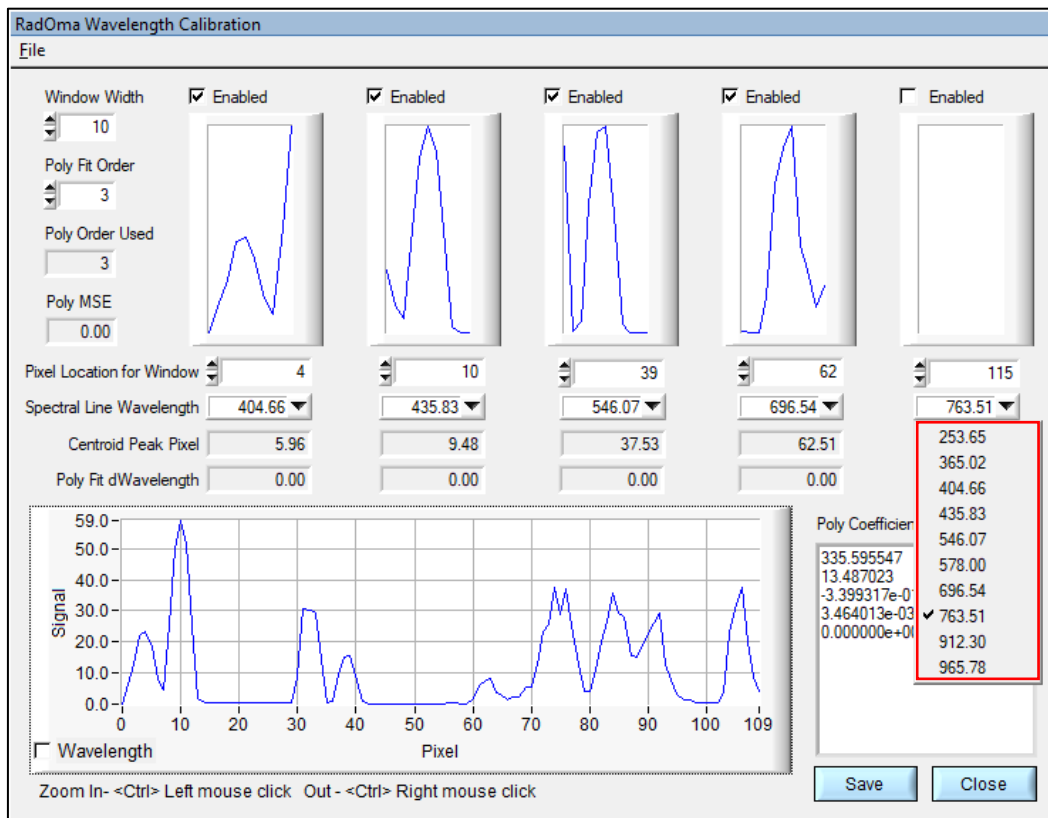
2.1.1 Spektrální kalibrace spektrometru

Spektrální kalibrací je myšlena kalibrace spektrometru pro přesné určení vlnové délky. Nejedná se tedy o kalibraci hodnoty měřené záře (amplitudy – intenzity), ale pouze o kalibraci určování frekvenčních složek záření. Pro tento typ kalibrace slouží zdroj záření typu Mercury-Argon NM-22L, jehož spektrum je naměřeno níže.



Obrázek 29: Spektrální charakteristika zdroje záření Mercury-Argon NM-22L.

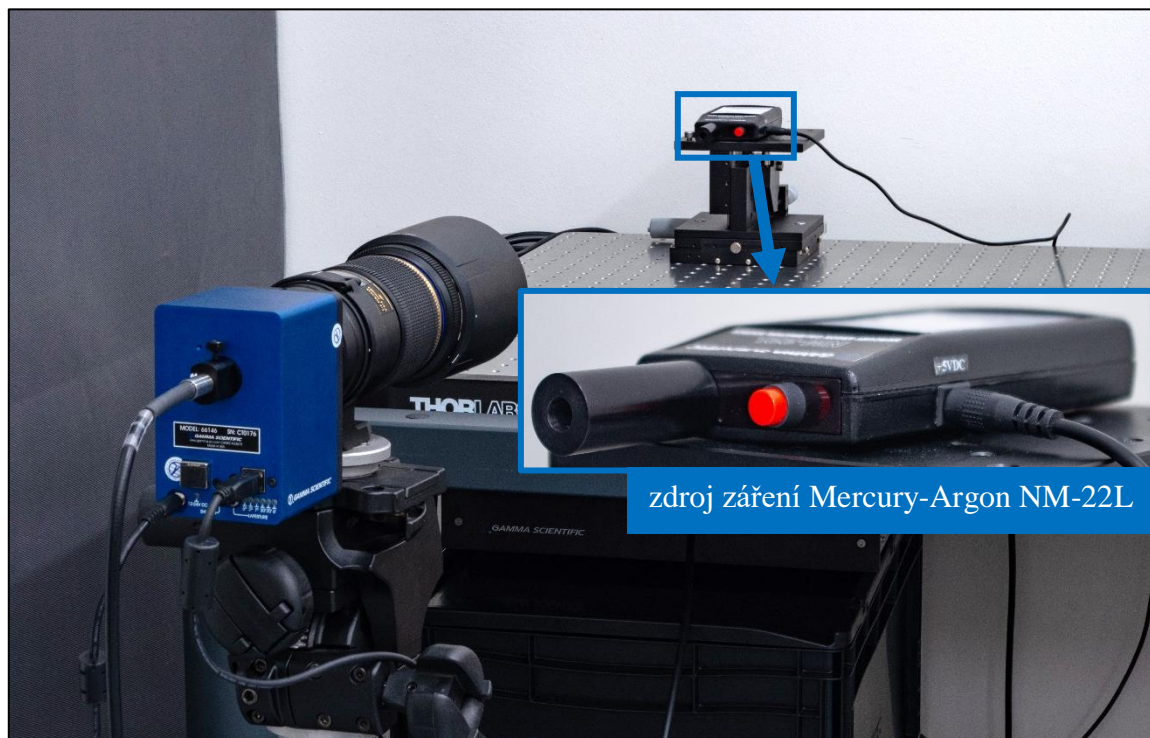
Postup spektrální kalibrace vychází ze zaznamenané spektrální záře standardizovaného zdroje záření Mercury-Argon, který má střední hodnoty úzkopásmových spektrálních maxim na určených vlnových délkách. Díky tomuto naměřenému spektru je možno následně přidružit k jeho jednotlivým píků (střední hodnotě úzkopásmového maxima) dané oblasti (pixely) CCD čipu. Pro toto je možné graf s naměřeným spektrem zvětšit a střední hodnotu píku tak přiřadit přesněji. Při vytváření kalibrací je nutné zamezit ovlivnění jinými zdroji záření, proto se tato měření provádí při dokonale zatemněné laboratoři.



Obrázek 30: Průběh přiřazování střední hodnoty píků naměřeného spektra Mercury-Argon zdroje daným pixelům detektoru spektorradiometru.

V obr. č. 30 již v celkovém grafu neodpovídají píky vlnovým délkám, ale daným pixelům CCD detektoru. Je proto nutné zorientovat se ve spektru pomocí spektrálního skenu, kde je normováno pro vlnovou délku. V červeném rámečku obr. č. 30 je výpis středních hodnot píků ve spektru Mercury-Argon zdroje záření, které jsou standardně užívány při spektrální kalibraci. Díky tomuto dosáhneme správné odezvy detektoru spektorradiometru na odpovídající vlnovou délku.

Ověřovací měření spektrální kalibrace probíhalo v zatměné laboratoři, kdy vzdálenost mezi externí měřicí hlavicí a měřeným zdrojem záření Mercury-Argon NM-22L byla 1 metr a byla užita apertura zorného pole 1°, která překryla celou oblast vyzařování tohoto zdroje.



Obrázek 31: Geometrie měření při kontrole spektrální kalibrace.

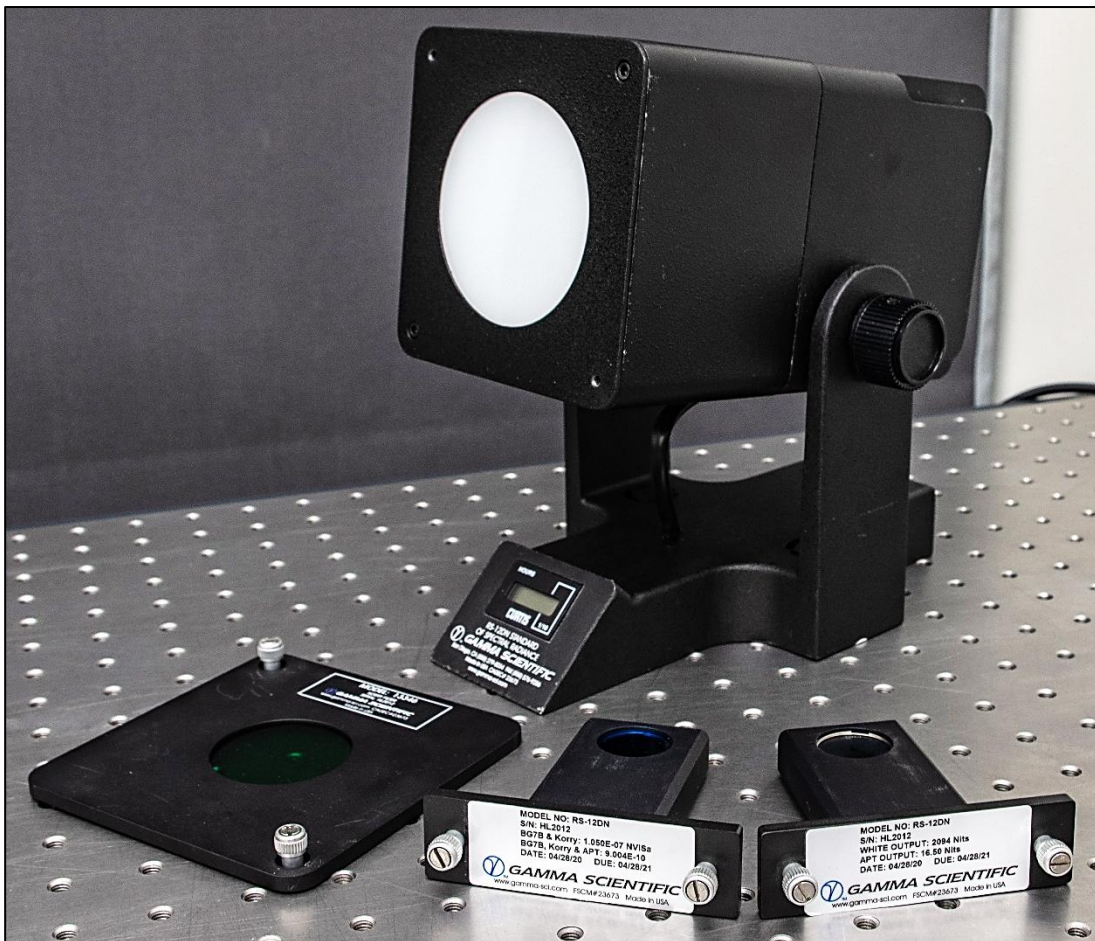
Naměřené hodnoty při ověřování spektrální kalibrace jsou uvedeny níže v tabulce:

Ověřovací měření spektrální kalibrace na Mercury-Argon NM-22L		
střední hodnoty píku zdroje Mercury-Argon NM-22L [nm]	naměřená vlnová délka střední hodnoty píku [nm]	rozdíl střední hodnoty píku Mercury-Argon NM-22L od naměřené střední hodnoty píku [nm]
404,66	404,31	0,35
435,83	435,32	0,51
546,07	545,81	0,26
579,07	578,91	0,16
696,54	696,54	0,00
763,51	763,95	0,44
912,30	911,81	0,49
965,78	965,41	0,37
1013,98	1014,21	0,23

Směrodatná odchylka rozdílů mezi udávanou a naměřenou vlnovou délkou střední hodnoty píku je 0,16 nm. Tímto tedy byla ověřena a kvantifikována přesnost spektrální kalibrace, která se projevila ve všech uváděných měřeních s tímto spektrometrem.

2.1.2 Amplitudová kalibrace spektrometru

Pro amplitudovou kalibraci, podobně jako pro spektrální, jsou nutné standardizované zdroje záření, které mají největší nároky na přesné hodnoty vyzařovaných intenzit v daných oblastech spektra. V tomto případě se jedná o kalibrační zdroj RS-12DN s rozšířením o filtry a apertury. Je to širokospektrální zdroj, který má přesně definovaný jas ve výstupní rovině, kterou představuje difuzní plocha, která vytváří zakončení částečné integrační koule implementované uvnitř tohoto zdroje. V této výstupní rovině je dosaženo homogenity jasu 97%.



Obrázek 32: Zdroj RS-12DN pro amplitudovou kalibraci včetně filtrů a apertury.

Kalibrační zdroj je nutno po zapnutí nejdříve nechat ustálit, k čemuž slouží signalizační kontrolka (cca 10 minut). Pokud se provádí kalibrace na větších aperturách zorného pole (v externí měřící hlavici spektrometru), čili 1° a větší, je třeba vložit do zdroje RS-12DN (mezi zdroj záření a integrační kouli) aperturu, která sníží jas ve výstupní rovině z 2094 Nitů na 16,5 Nitů, čímž zabrání přexponování detektoru. Nit je dříve užívaná jednotka jasu a odpovídá jedné kandelě na metr čtvereční (cd/m^2).

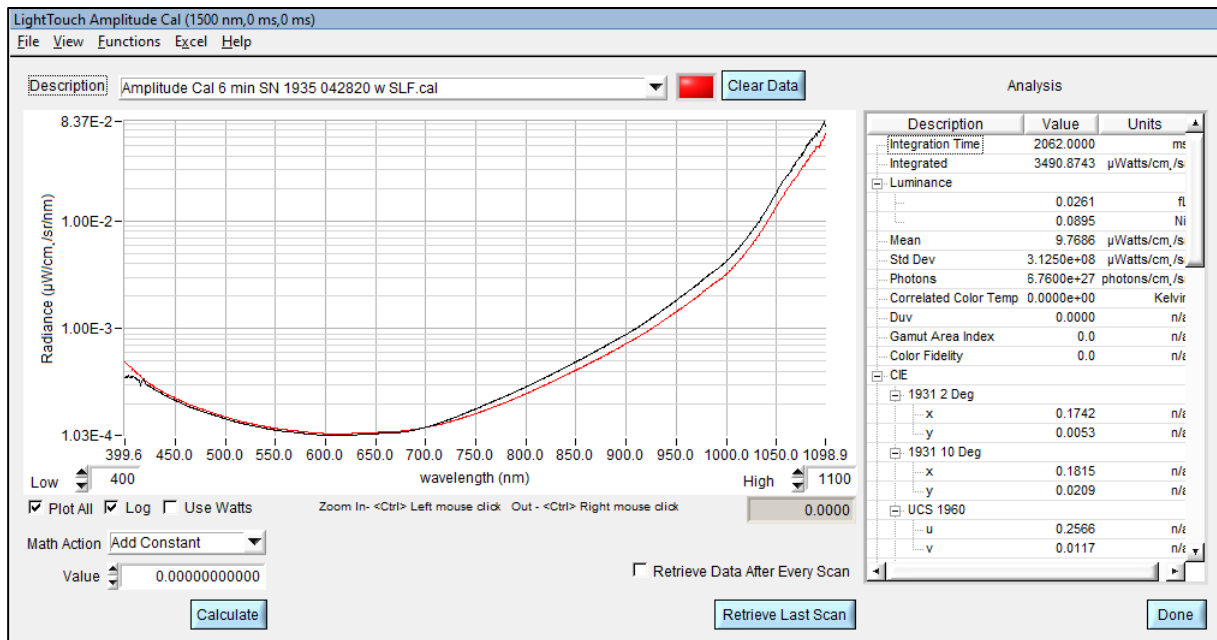
Při amplitudové kalibraci je tedy nutno počítat i s použitou aperturou zorného pole externí měřící hlavice, proto se vytváří kalibrační soubory zvlášť pro každou z šesti velikostí apertur. Kalibrace se tedy provádí opět v zatemněné laboratoři. Zdroj se umístí před externí měřící hlavici do nejbližší roviny, kterou je objektiv schopen zaostřit, což odpovídá 56 cm. Tento krok je z důvodu zajištění opakovatelnosti měření – kalibrace, jelikož amplituda záření klesá s kvadrátem vzdálenosti. Následně je vložen soubor, obsahující výrobcem udaný vliv parazitního světla pro konkrétní aperturu zorného pole. Jednotlivá měření daných apertur se porovnávají s již naměřenými kalibračními daty od výrobce pro stejný zdroj záření i aperturu zorného pole. Amplitudová kalibrace má jednotný postup měření pro všechny velikosti apertur zorného pole, níže bude uveden příklad pro aperturu zorného pole $0,1^\circ$.

Pro ověřování nastavené citlivosti spektrometru v případech nízkých hodnot jasu slouží přidané filtry, které upravují výstupní spektrální zář zdroje. Je tedy možno konfigurovat zdroj pro měření v hodnotách požadovaného jasu při výpočtech NVIS záře např. z tabulky III.



Obrázek 33: Ověřování amplitudové kalibrace spektrometru se zdrojem RS-12DN (při měření byla laboratoř zatemněna a displej notebooku vypnut).

Níže v obr. č. 34 je zobrazení amplitudové kalibrace pro zvolenou aperturu zorného pole 0,1° od výrobce (černá křivka) a ověřovací kalibrace vytvořené v laboratoři při prověřování spektorradiometru. V grafu je použito logaritmické škálování hodnot záře.



Obrázek 34: Ověřovací měření amplitudové kalibrace na apertuře zorného pole 0,1°.

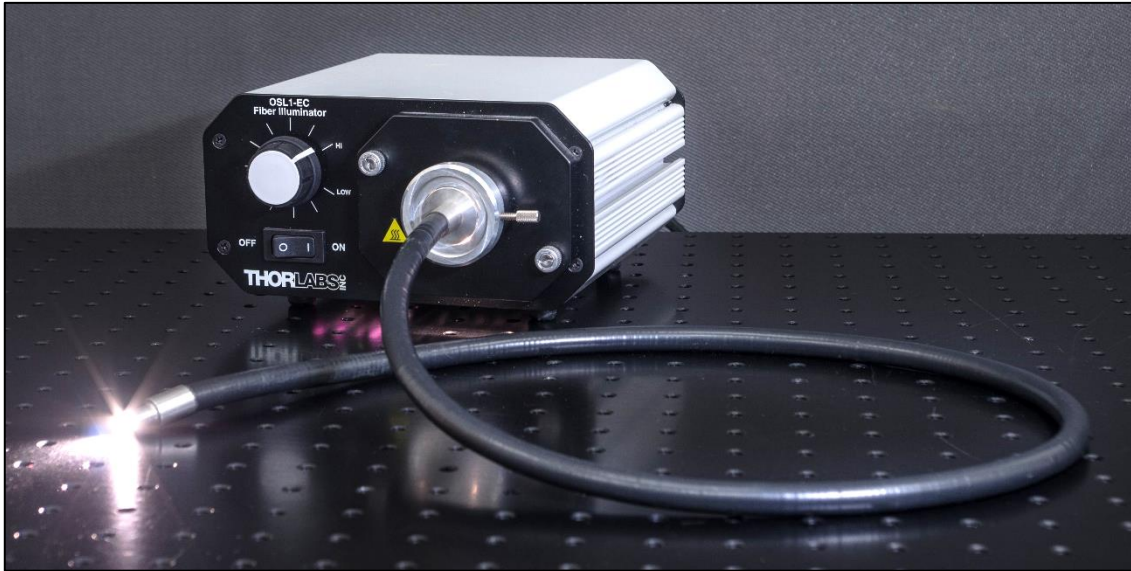
V tabulce níže jsou porovnány zaznamenané hodnoty naměřené záře s hodnoty záře v kalibračním souboru od výrobce.

Odchytky amplitudové kalibrace pro vybranou aperturu zorného pole 0,1°			
vlnová délka [nm]	zář z kalibračního souboru výrobce [$\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}$]	kontrolní měření záře [$\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}$]	rozdíl záře kalibračního souboru výrobce a naměřené [$\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}$]
400	$4,79907903 \times 10^{-4}$	$3,53578711 \times 10^{-4}$	$1,26329192 \times 10^{-4}$
500	$1,52319597 \times 10^{-4}$	$1,4632802 \times 10^{-4}$	$0,05991577 \times 10^{-4}$
600	$1,06890213 \times 10^{-4}$	$1,03369333 \times 10^{-4}$	$0,03520880 \times 10^{-4}$
700	$1,22512225 \times 10^{-4}$	$1,22451806 \times 10^{-4}$	$0,00060419 \times 10^{-4}$
800	$2,52390688 \times 10^{-4}$	$2,9005314 \times 10^{-4}$	$0,37662452 \times 10^{-4}$
900	$7,27971666 \times 10^{-4}$	$8,91051604 \times 10^{-4}$	$1,63079938 \times 10^{-4}$
1000	$3,21269571 \times 10^{-3}$	$4,15790034 \times 10^{-3}$	$0,94520463 \times 10^{-3}$

Směrodatná odchylka od střední hodnoty výsledných odchylek záře pro vlnové délky 400 - 900 nm je $0,65 \times 10^{-4} \mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{sr}/\text{nm}$. Tímto postupem tedy byla ověřena a kvantifikována přesnost amplitudové kalibrace pro danou aperturu zorného pole, která se projevila v uváděných měřeních spektorradiometru.

2.2 Ověření užitého širokospektrálního zdroje

Pro vybraná, později uvedená, měření na MFD bylo třeba simulovat sluneční zář. Byl tedy zvolen halogenový širokospektrální zdroj, jehož spektrální zář byla pomocí spektrometru a luxmetru ověřena.

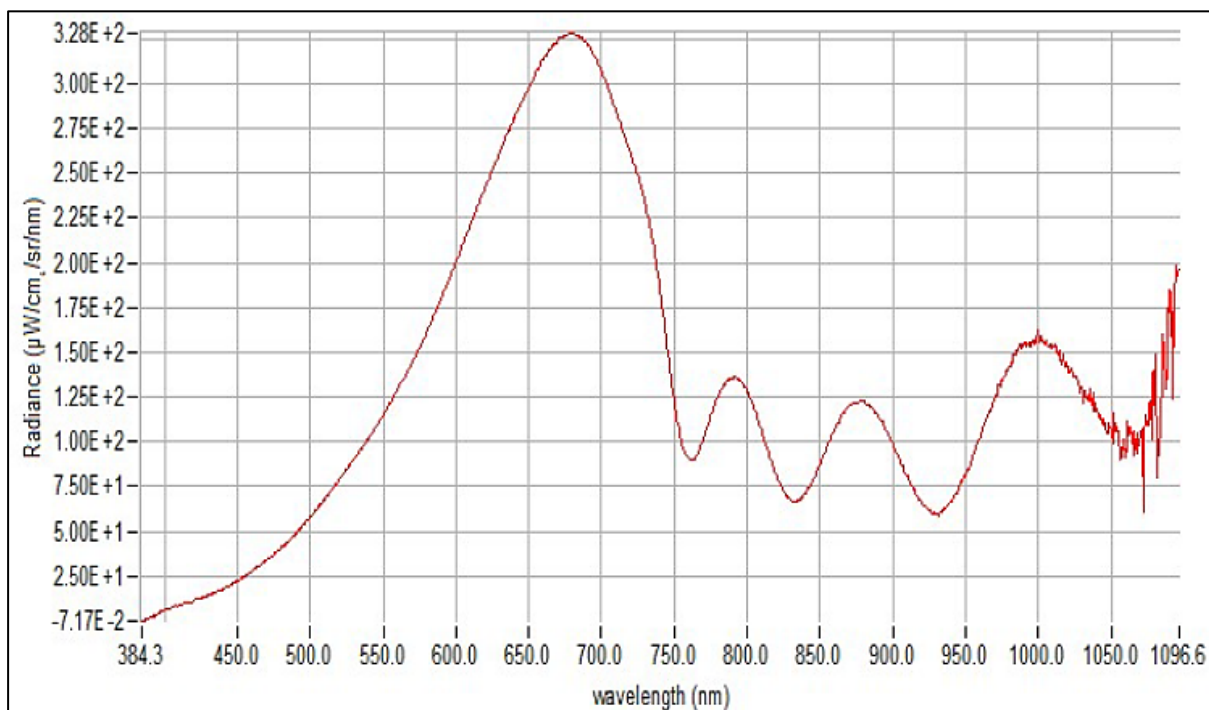


Obrázek 35: Širokospektrální zdroj THORLABS fiber illuminator OSL1-EC se světlovodem.

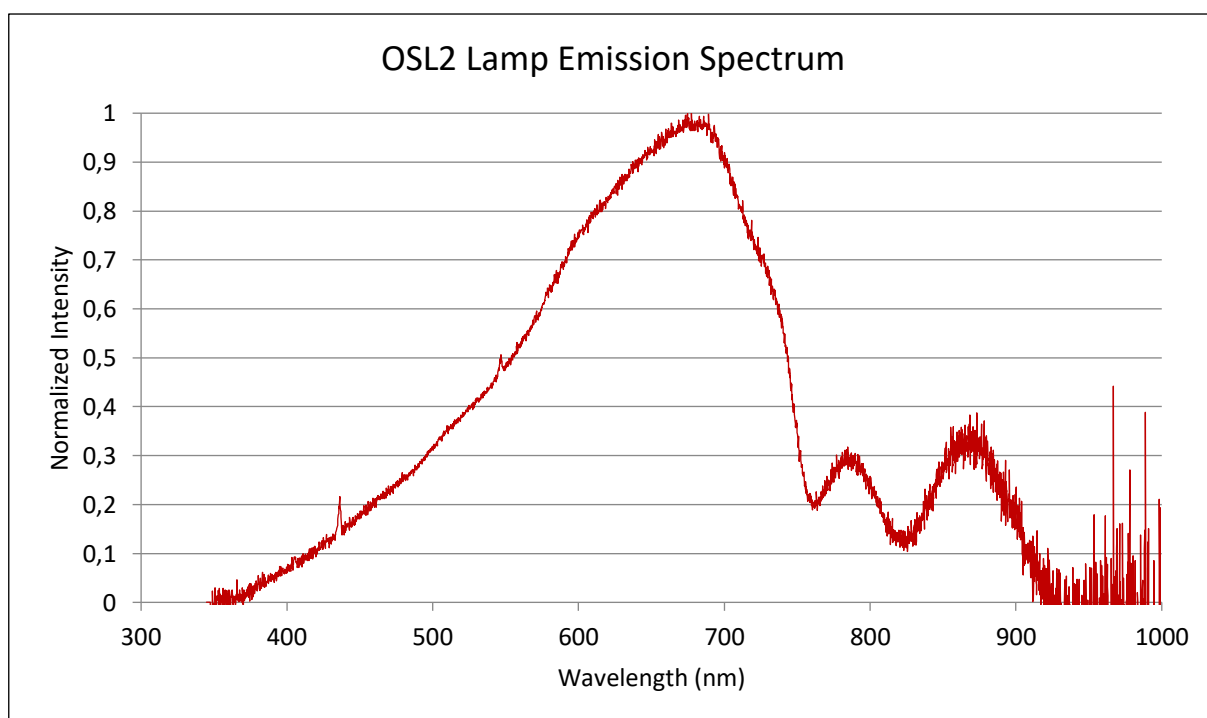
THORLABS uvádí následující charakteristiku tohoto halogenového zdroje:

Parametr	Hodnota
výstupní osvětlení	40 000 fc
rozsah regulace intenzity výstupu	1000:1 (0 až 100%)
barevná teplota	3200 K (standard EKE lampa při maximální intenzitě)
životnost halogenového zdroje	250 až 10 000 hodin
operační teplota	0 až 40 °C
vstupní napětí	110 až 120 VAC, 220 až 240 VAC, 180 W max.

Spektrum udávané výrobcem je zobrazeno níže v grafu č. 9. Graf má výrobce již pojmenovaný jako OSL2 Lamp Emission Spectrum, jelikož bylo měřeno spektrum novějšího modelu širokospektrálního zdroje. Sám výrobce ale uvádí, že halogenová lampa OSL2 je totožná, jako v předchozích modelech OSL1, což bylo ověřeno shodou naměřeného spektra s udávaným. Vyzářovací charakteristiku zdroje ovlivní i užití daného typu světlovodu. Proto bylo provedeno ověřovací měření, ve kterém je zobrazena konkrétní spektrální zář ustáleného zdroje s použitím světlovodu. V této konfiguraci byl zdroj použit pro simulaci slunečního záření.



Graf 8: Naměřená spektrální zář zdroje THORLABS fiber illumination OSL1-EC včetně s užitého světlovodu.



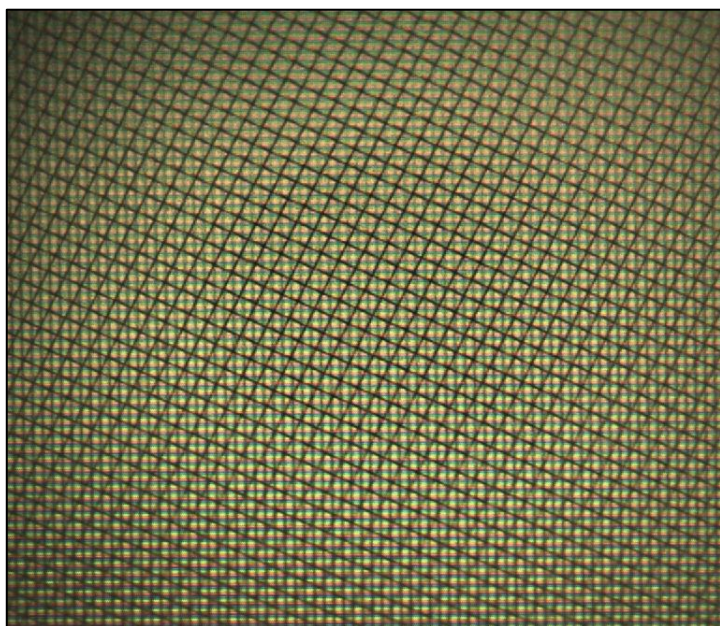
Graf 9: Spektrum udávané THORLABS pro fiber illumination OSL2. Převzato od THORLABS [9].

V grafu č. 9 je patrná vyšší míra šumu nad 800 nm, která je v této oblasti běžná pro spektrometry bez adaptivního přizpůsobení expozice hodnotám SNR v měřeném spektru.

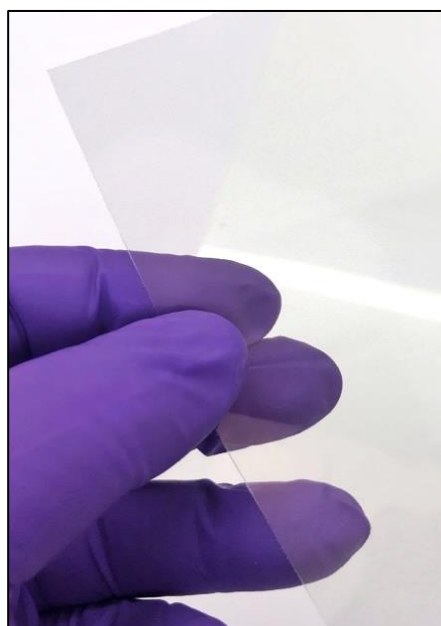
2.3 Technologie Optolite Emishield Micromesh

Při zaostřování MFD byla v určité vzdálenosti před jednotlivými subpixely patrná přesná pravidelná struktura – síť (viz obr. č. 36). Orientace této sítě byla pod úhlem 45° z důvodu zamezení případného překrytí celého sloupce, nebo řádku pixelů či RGB subpixelů, které by mohlo vyvolovat moaré efekt narušující tak čitelnost MFD. Síť nebyla patrná pouhým okem, protože tloušťka jednotlivých linek byla srovnatelná s jednotlivými RGB subpixely, jak je patrné z obrázku.

Jedná se o technologii nazývanou Optolite Emishield Micromesh, nebo také Low EMI Micro-Mesh. Je to leptaná tenká vrstva (síť) černěné mědi, případně niklu, na tenký skleněný, či plastový podklad. Díky tomu je zaručena nezbytná vodivost této sítě, jež plní funkci vysokofrekvenčního stínění MFD. Tyto vrstvy se vyrábí s vysokou propustností (i 90%) pro VIS až IR oblasti a tloušťky jednotlivých linek se pohybují řádově v jednotkách až desítkách mikrometrů. Volbu parametrů této sítě ovlivňují požadavky na stínění udávané jako útlum (EMI shielding) v dB pro frekvenční pásmo v jednotkách až tisících MHz, dále pak počet pixelů na palec (čím vyšší, tím klesá možnost efektu moaré), propustnost pro dané displejem vyzařované pásmo vlnových délek, tloušťka vrstvy atd. Jako rozšíření je možnost tuto síť pokrýt také tzv. Indium Tin Oxide vrstvou (ITO), která plní funkci odporového povlaku, díky kterému je umožněno měnit teplotu v této vrstvě displeje a tím zabránit např. kondenzaci vzdušné vlhkosti na displeji. [8]



Obrázek 36: Síť (Emishield Micromesh) na MFD v rovině těsně před jednotlivými RGB subpixely, které jsou již bohužel pouze částečně v hloubce ostrosti.



Obrázek 37: Emishield Micromesh nanesená na PET podkladu. Převzato z [8].

2.4 Jas multifunkčního displeje (MFD)

V této kapitole budou obsaženy především jasové parametry MFD měřené při zobrazení bílé barvy. Jedná se tedy o měření kontrastu, jasu při daných zobrazovacích režimech, rovnoměrnosti jasu MFD. Budou zde i zahrnuty kapitoly s měřením jasu, kontrastu a chromatičnosti podsvícených ovládacích tlačítek po obvodu MFD.

2.4.1 Kontrast MFD a ovládacích tlačítek

Tento kontrast byl měřen při simulaci slunečního svitu s pomocí výkonného halogenového širokopásmového zdroje THORLABS fiber illuminator OSL1-EC. K tomuto zdroji byl připojen světlovod, který plnil funkci difuzního rozptýlení záře a jejího směrování na MFD.

2.4.1.1 Kontrast MFD

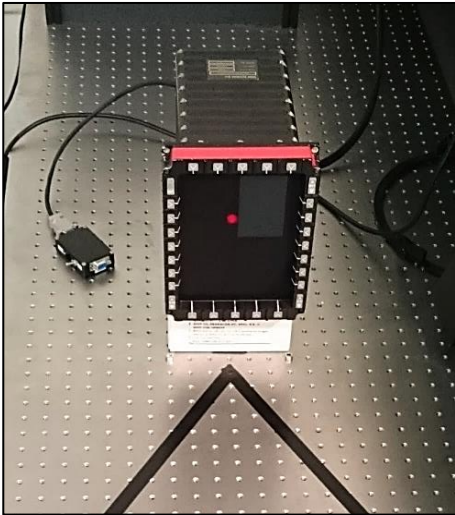
Kontrast MFD byl měřen jako poměr maximálního možného jasu displeje a minimálního jasu displeje ze vztahu 2.8 z kapitoly 1.3.4.

Měření kontrastu MFD bylo dle předpokladu velmi závislé na geometrii a intenzitě osvětlení MFD širokospektrálním zdrojem. Pro níže uvedenou geometrii měření bylo naměřeno osvětlení v rovině MFD 3 273 lux, což odpovídá 304 fc (1 lux \approx 10,76391 fc).

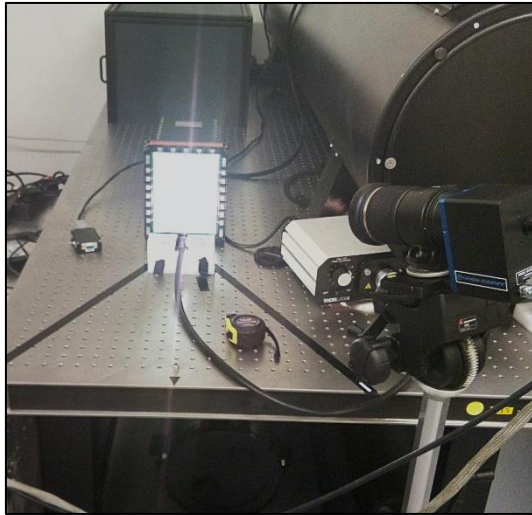
Výrobní dokumentace V-CIDS-159-0003E udává minimální kontrastní poměr $K = 0,5$ v celém rozsahu okolních podmínek. Pro toto měření je v MFD implementován test zobrazení bílého obdélníku s ostrým přechodem na černé pozadí (viz obr. č. 38). S pomocí světlovodu bylo záření zdroje směřováno na multifunkční displej.

Geometrie měření byla následující:

- Apertura spektrometru 1°
- MFD nastaven na maximální hodnotu svítivosti.
- Čelo světlovodu širokospektrálního zdroje vzdáleno od středu MFD 30 cm
- Vzdálenost měřicí hlavičky spektrometru od středu MFD 40 palců (101,6cm)



Obrázek 38: Zobrazení testu pro měření kontrastu (jas MFD není na foto v maximálním nastavení jasu).



Obrázek 39: Příprava širokospektrálního zdroje před začátkem měření.

Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky:

Kontrast MFD při maximálním nastavení jasu a denním osvětlení			
Jas pro zobrazení bílé [fL]	Jas pro zobrazení černé [fL]	Kontrast	Rozdíl jasů [fL]
187,6	1,676	0,98	185,92

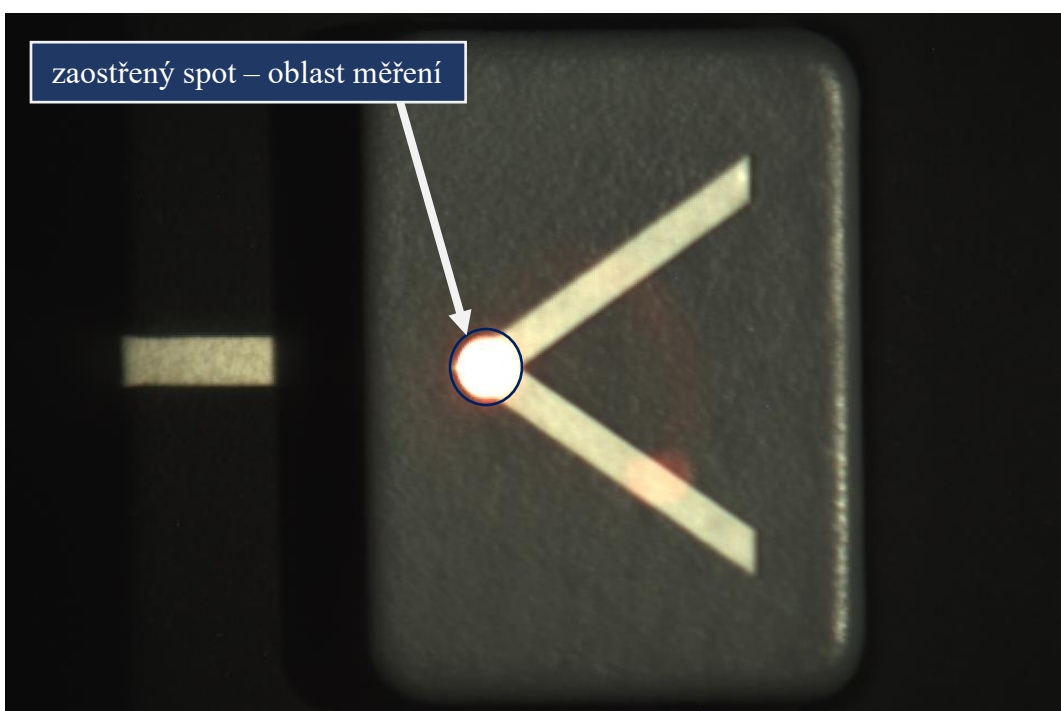
Hodnota kontrastu byla určena výpočtem z naměřených jasů dle vztahu 2.8 v kapitole 1.3.4. Limita kontrastu z výrobní dokumentace V-CIDS-159-0003E, tedy $K > 0,5$ byla v tomto případě překonána s rezervou. Displeje s takto vysokým kontrastem jasů se považují za perfektně čitelné na slunci.

2.4.1.2 Kontrast ovládacích tlačítek MFD

Jedná se o měření jasu bílého symbolu šipky na tlačítku MFD v poměru s jasem podkladové části tlačítka, na které je tento symbol, tedy kontrast symbolu k jeho pozadí.

Geometrie měření byla následující:

- Čelo světlovodu širokospektrálního zdroje vzdáleno od tlačítka 30 cm
- Vzdálenost měřící hlavičky spektrometru od tlačítka byla 40 palců (101,6cm)
- Apertura spektrometru $0,1^\circ$
- LED podsvícení tlačítek vypnuto



Obrázek 40: Měření kontrastu tlačítka MFD při simulaci denního osvětlení.

Naměřené hodnoty jsou zaneseny do tabulky:

Kontrast ovládacího tlačítka při denním osvětlení			
Jas bílé plošky symbolu [fL]	Jas podkladové části tlačítka [fL]	Kontrast	Rozdíl jasů [fL]
131,6	4,561	0,93	127,04

Hodnota kontrastu byla určena výpočtem z naměřených jasů dle vztahu 2.8 v kapitole 1.3.4. Měřené tlačítko MFD má kontrast také vysoký, i přes to, že podklad bílého symbolu byl tmavě šedý, nikoliv černý. Limita výrobní dokumentace V-CIDS-159-0003E, tedy opět $K > 0,5$ byla překonána s rezervou.

2.4.2 Jas MFD při zobrazovacích režimech DAY, NGT, NVIS

Jak již bylo nastíněno výše v kapitole 1.4 Multifunkční displej má přednastavené hodnoty podsvícení pro každý jednotlivý zobrazovací režim zvlášť (DAY/NGT/NVIS). Po zvolení daného režimu máme tedy výchozí hodnotu podsvícení displeje, kterou je možné pomocí tlačítek dále regulovat. Abychom získali přehled o rozsahu jasových možností jednotlivých režimů, je třeba změřit hodnotu maximálního a minimálního podsvícení v daném režimu. Měření se provádí při zobrazení bílé barvy přes celý displej.

Geometrie měření byla následující:

- Apertura spektrometru 1°
- Čelo světlovodu vzdáleno od středu MFD 30 cm
- Vzdálenost měřicí hlavy spektrometru od středu MFD 20 palců (101,6cm)

Naměřené výsledky hodnot podsvícení bílého pozadí jednotlivých režimů:

Jas zobrazovacích režimů DAY, NGT, NVIS na MFD			
zobrazovací režim MFD	minimum [fL]	výchozí [fL]	maximum [fL]
DAY	1,98800	127,00000	185,30000
NGT	0,01277	0,88960	1,11400
NVIS	0,00520	0,04500	0,26160

Rozsah hodnot jasu MFD při daných zobrazovacích režimech je odpovídající rozsahu daných okolních podmínek. Pilot má však při každém režimu možnost kolébkovým tlačítkem regulovat hodnotu jasu v celém jeho naměřeném rozsahu jasu.

2.4.3 Rovnoměrnost jasu MFD

Rovnoměrnost či homogenita jasu multifunkčního displeje byl další měřený parametr. Jedná se o měření jasu (fL) pro 5 zadaných bodů rozmístěných na ploše displeje – střed a 4 rohy. V technických podmínkách není přesně specifikována oblast měření, je pouze zadána jako horní – levá, horní – pravá, dolní – levá a dolní – pravá. Proto byla zvolena vzdálenost 1 palec úhlopříčně od daného rohu displeje. Pokud by byl měřen displej o větší úhlopříčce obrazovky, tak by rozhodně bylo vhodné měřit více bodů.

Změřil se tedy jas pro každý bod zvlášť a následně se určila rovnoměrnost jasu, jako odchylka [%] od nejvyššího naměřeného jasu pro daný režim zobrazení (viz tabulka s výsledky níže).

Jelikož pozorovatel – pilot nemá v kokpitu letounu L-159 příliš velké dispozice pozorovat displej při rozdílných stranových posunech, ale spíše náklonech hlavy, byla navržena měřicí metoda založená na náklonu externí měřicí hlavice spektrometru, nikoliv posunu měřicí hlavice, jako je tomu při typickém továrním měření standardních LCD obrazovek.

Geometrie měření byla následující:

- Temná komora (zatemněná laboratoř).
- Vzdálenost měřicí hlavice spektrometru od středu MFD 40 palců (101,6cm)
- Apertura spektrometru 1°
- Vycentrování měřicího spotu na střed MFD současně s nastavením měřicí hlavice spektrometru do normály k rovině MFD.

Naměřené hodnoty jasu pro jednotlivé režimy a umístění měřícího spotu na MFD:

Rovnoměrnost jasu MFD			
Měřená oblast MFD	Naměřený jas [fL]	Nejvyšší jas v dané skupině [fL]	Odchylka jasu od nejvyššího v dané skupině [%]
Zobrazovací režim DAY při maximálním nastavení jasu			
Střed	185	191,7	4
Horní levý roh	155,3	191,7	23
Horní pravý roh	182,3	191,7	5
Dolní levý roh	150,8	191,7	27
Dolní pravý roh	191,7	191,7	0
Zobrazovací režim DAY při výchozím nastavení jasu			
Střed	118,8	124,7	5
Horní levý roh	100,3	124,7	24
Horní pravý roh	118	124,7	6
Dolní levý roh	97,57	124,7	28
Dolní pravý roh	124,7	124,7	0
Zobrazovací režim NGT při výchozím nastavení jasu			
Střed	0,8876	0,9296	5
Horní levý roh	0,7584	0,9296	23
Horní pravý roh	0,8849	0,9296	5
Dolní levý roh	0,7372	0,9296	26
Dolní pravý roh	0,9296	0,9296	0
Zobrazovací režim NVIS při maximálním nastavení jasu			
Střed	0,2361	0,2393	1
Horní levý roh	0,1715	0,2393	40
Horní pravý roh	0,2213	0,2393	8
Dolní levý roh	0,1921	0,2393	25
Dolní pravý roh	0,2393	0,2393	0

V tomto případě jsou patrné vyšší rozdíly v naměřené rovnoměrnosti jasu MFD. Jak je vidět, rozdíly nastaly především pro body měřené na levé části MFD, což odpovídá prvotně zamýšlenému horizontálnímu uložení MFD v kokpitu. Rozdíly jasu však nebyly okem pozorovány jako skvrny, či forma rušivé struktury – jednalo se o plynulý přechod, který nebyl okem patrný ani při změně zobrazovacích režimů, či jejich regulaci jasu.

Tento typ displeje byl již dříve v letounech použit, ale byl orientován horizontálně, nikoliv vertikálně, jak je tomu u letounu L-159. Proto při rotaci kolem svislé osy byl při velkých pozorovacích úhlech patrný horší kontrast mezi jednotlivými přechody úrovní jasů. K takto velkému úhlu, pod kterým byly změny patrné, se pilot v kokpitu nemůže (z prostorových důvodů) dostat. Také se tato skutečnost projevila na měření rovnoměrnosti jasu MFD.

Naměřené hodnoty těsně splnily požadavky pro implementaci MFD do kokpitu letounu L-159 dané výrobní dokumentací V-CIDS-159-0003E. Ta požadovala rovnoměrnost svítivosti MFD pro všechny režimy zobrazení do 30 %, s výjimkou levé strany MFD, která má limit udaný 40 %.



Obrázek 41: MFD při pravém bočním pohledu.



Obrázek 42: MFD při levém bočním pohledu.

2.4.4 Jas podsvícených tlačítek MFD

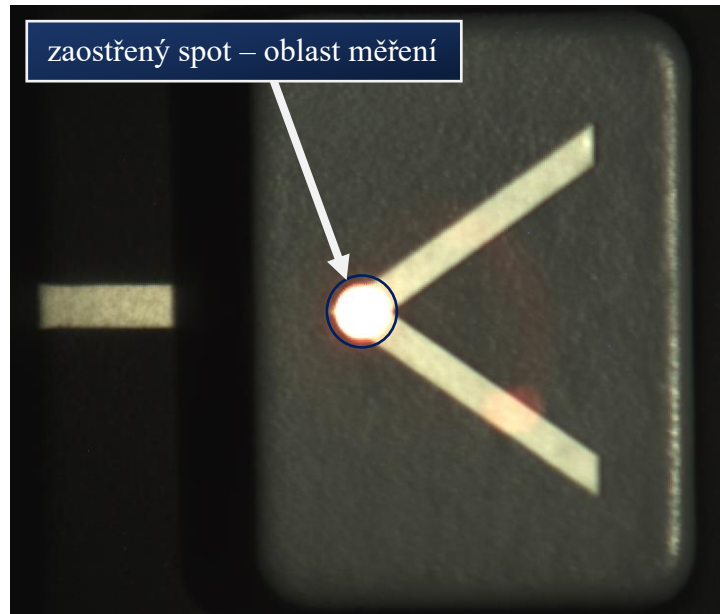
24 tlačítek a 4 kolébkové voliče, které jsou rozmístěny po obvodu MFD jsou podsvíceny stejnými LED diody pro noční lety. Měření proto opět probíhalo v zatemněné místnosti a měřily se dvě protilehlá tlačítka, která se při pozorování přes ANVIS jevila s malým rozdílem jasů. Zbylá tlačítka se v jasů přibližně shodovala.

Geometrie měření byla následující:

- Temná komora (zatemněná laboratoř).
- Vzdálenost měřicí hlavičky spektroradiometru od středu MFD 40 palců (101,6cm)
- Apertura spektroradiometru $0,1^\circ$
- Napájecí napětí LED podsvícení nastaveno na $5\text{ V} \pm 0,05\text{ V}$



Obrázek 43: MFD s podsvícenými obvodovými tlačítky (symbol šipky) v zatemněné laboratoři.



Obrázek 44: Zobrazení zaostřeného měřicího spotu do podsvícené části (symbolu šipky) tlačítka MFD. Tlačítko je pro ukázkou měřeného místa osvětleno – při měření bylo zatemněno.

Naměřený jas daných tlačítek:

Jas podsvíceného symbolu tlačítka MFD		
Pozice tlačítka na MFD	vypnuto (fL)	zapnuto (fL)
Levé prostřední	0	0,31
Pravé prostřední	0	0,3748

Ukázalo se, že vzájemný procentuální rozdíl jasů tlačítek byl v nejhorším případě pod 21%. Přičemž obě tlačítka byla při sledování přes ANVIS komfortně zobrazena s optimálním jasnem. Halo efekt, který by vyvolal případný příliš vysoký jas tlačítka, nenastal.

2.5 Chromatičnost MFD a podsvícených tlačítek

Měření chromatičnosti se rozumí určování daných trichromatických souřadnic u' a v' pro soustavu CIE 1976 UCS, jak bylo popsáno v teoretické části.

Měření je dále členěno na dvě oddělené kapitoly. V první se měřily trichromatické souřadnice pro samotný displej, ve druhé pro podsvícená ovládací tlačítka po jeho obvodu. V tabulce s výsledky chromatičnosti je vždy uvedena odchylka od středu kruhu s referenčními souřadnicemi u' a v' . Tato odchylka je ve své podstatě výsledkem měření, jelikož díky ní můžeme rozhodnout, zda předmět měření splňuje danou podmínku chromatičnosti, či nikoliv.

2.5.1 Chromatičnost MFD

Chromatičnost byla měřena pro všechny tři režimy zobrazení (DAY, NGT, NVIS) a zobrazení barev (bílá, červená, zelená modrá) přes celou úhlopříčku MFD.

Geometrie měření byla následující:

- Temná komora (zatemněná laboratoř).
- Vzdálenost měřicí hlavičky spektrometru od 40 palců (101,6cm)
- Apertura spektrometru 1°
- Vycentrování měřicího spotu na střed MFD současně s nastavením měřicí hlavičky spektrometru do normály k rovině MFD.

Naměřená chromatičnost MFD pro dané režimy zobrazení a barvy:

Chromatičnost MFD (CIE 1976 UCS)					
barva	naměřená souřadnice u'	naměřená souřadnice v'	referenční souřadnice u'	referenční souřadnice v'	odchylka od středu kruhu s referenčními souřadnicemi u' a v'
zobrazovací režim DAY při výchozím nastavení jasu					
bílá	0,2646	0,5122	0,19	0,49	0,07783
červená	0,3694	0,53	0,35	0,52	0,02183
zelená	0,1574	0,5652	0,15	0,55	0,01691
modrá	0,1341	0,3484	0,14	0,32	0,02901
zobrazovací režim NGT při výchozím nastavení jasu					
bílá	0,2042	0,5147	0,19	0,49	0,02849
červená	0,3696	0,5309	0,35	0,52	0,02243
zelená	0,1572	0,5656	0,15	0,55	0,01718
modrá	0,1319	0,3548	0,14	0,32	0,03573
zobrazovací režim NVIS při maximálním nastavení jasu					
bílá	0,1679	0,482	0,15	0,48	0,01801
červená	0,3039	0,5284	0,3	0,52	0,00926
zelená	0,147	0,553	0,13	0,54	0,02140
modrá	0,1277	0,3073	0,11	0,34	0,03718

Naměřené odchylky od daných referenčních barevných souřadnic byly v limitu výrobní dokumentace V-CIDS-159-0003E. Ta udává pro bílou, červenou a zelenou barvu maximální přípustnou odchylku od středu dané referenční barevné souřadnice 0,03 a pro modrou barvu 0,04.

2.5.2 Chromatičnost podsvícených tlačítek MFD

Jelikož podsvícení tlačítek je koncipováno pro noční lety s využitím ANVIS, tak byla měřena chromatičnost dle NVIS barev (konkrétně NVIS green B) z MIL-STD-3009.

Geometrie měření byla následující:

- Temná komora (zatemněná laboratoř).
- Vzdálenost měřicí hlavičky spektrometru od středu MFD 40 palců (101,6cm)
- Apertura spektrometru 0,1°
- Napájecí napětí LED podsvícení nastaveno na 5 V ± 0,05 V

Naměřená chromatičnost daných tlačítek:

Chromatičnost podsvícených tlačítek MFD (CIE 1976 UCS)					
pozice tlačítka na MFD	naměřená souřadnice u'	naměřená souřadnice v'	referenční souřadnice u'	referenční souřadnice v'	odchylka od středu kruhu s referenčními souřadnicemi u' a v'
levé prostřední	0,11880	0,57130	0,13100	0,62300	0,05312
pravé prostřední	0,11840	0,57190	0,13100	0,62300	0,05263

Maximální přípustná odchylka trichromatické souřadnice od středu kruhu NVIS green B barvy je 0,057 dle MIL-STD-3009. Obě tlačítka tuto toleranci splňují, jedná se tedy prokazatelně o podsvícení typu NVIS green B.

2.6 Ověřovací pozorování MFD pomocí ANVIS

Pro kontrolu byla kompatibilita MFD a jeho podsvícených tlačítek ověřována ještě přes ANVIS. U tohoto ověření bylo zjištěno, že jsou patrné malé rozdíly v jasů mezi některými podsvícenými tlačítky. Tuto jemnou nuanci mohla způsobit lehce odlišná spektrální charakteristika dané LED diody, která zajišťuje podsvícení tlačítka, nebo také mohlo jít o vyšší hodnotu jasů, která nebyla zřejmá při pohledu pouhým okem. V neposlední řadě mohla mít také vliv, odlišná propustnost materiálu daného tlačítka. Nejednalo se však o nijak rušivý jev, který by mohl zasahovat do komfortního pozorování MFD, či jeho ovládání přes právě ona podsvícená tlačítka.

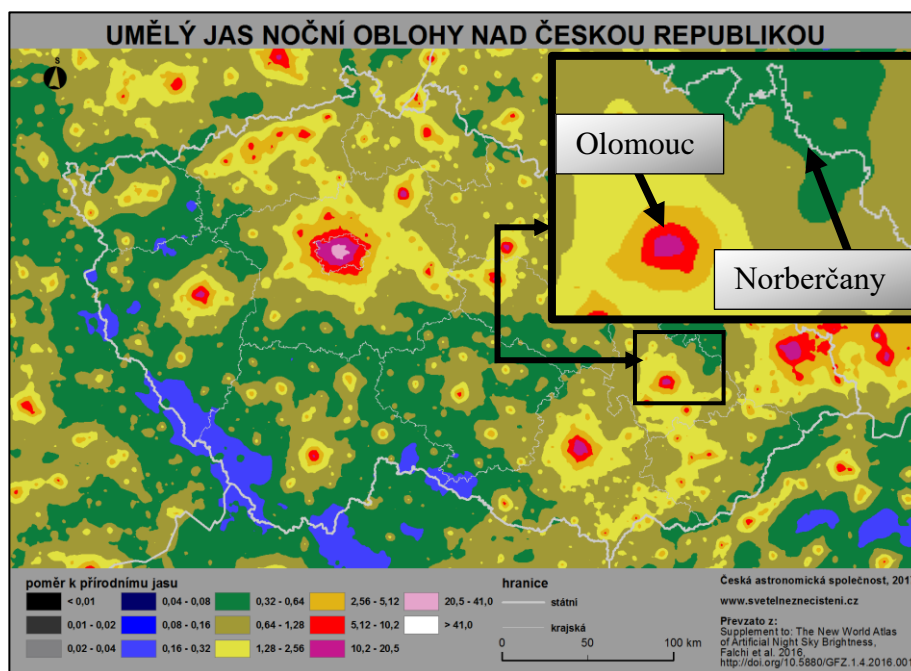
2.7 Měření vyzařování noční oblohy v terénu

V této kapitole budou uvedeny výsledky terénního měření spektrálních charakteristik měsíčního svitu, následně jeho odrazivosti od listoví a vzájemné porovnání.

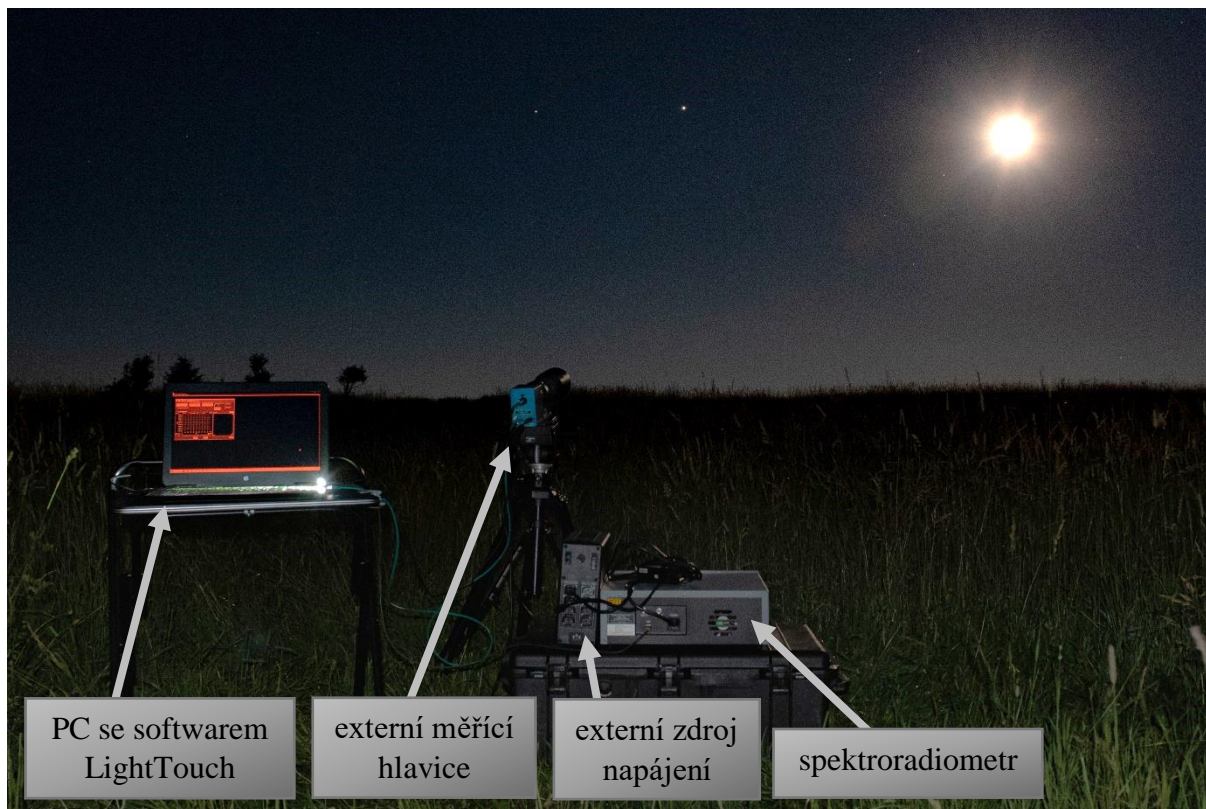
Měření noční oblohy bylo realizováno pro kvantifikaci skutečnosti, že jsou řádově srovnatelné hodnoty spektrální záře měsíce (odražené sluneční záře) ve viditelné a blízké infračervené oblasti. Toto je podstatný rozdíl oproti dennímu slunečnímu záření, jak bude následně rozvedeno. Tato skutečnost objasňuje důvody zvýšené relativní citlivosti ANVIS (či noktovizorů obecně) v blízkém infračerveném spektru.

Vyzařovací charakteristiku sluneční záře lze aproximovat pomocí Planckovy funkce pro teplotu černého tělesa 5800 K a případného doplnění absorpance zemské atmosféry. Tato funkce dosahuje maxima v oblasti 555 nm, na kterou se evolučně váže například maximální citlivost lidské sítnice (čípky typu M). Blízké infračervené záření je v denním slunečním svitu obsaženo minimálně v poměru s viditelným světlem (VIS). Proto proces fotosyntézy využívá absorpanci převážně této VIS části 400 – 700nm, což se potvrdilo v případě měření spektrální odrazivosti na listoví.

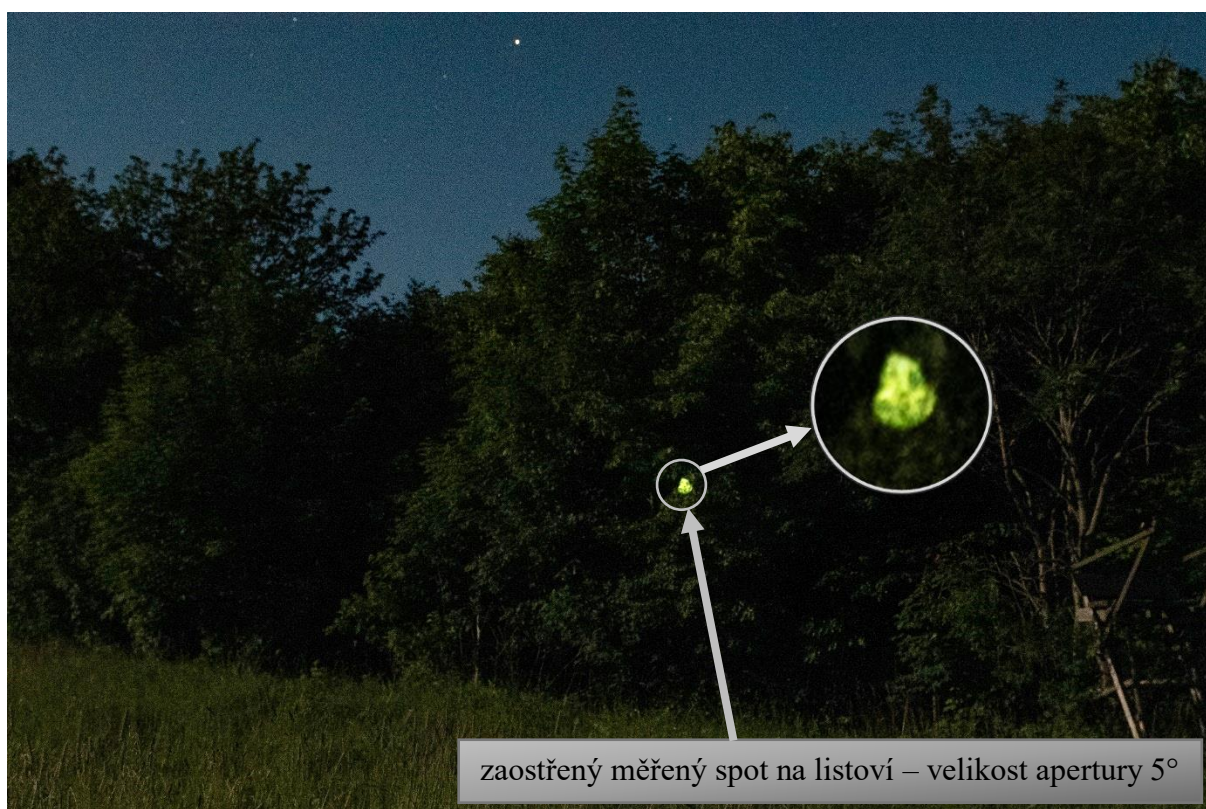
Terénní noční měření probíhalo ve fázi úplňku měsíce dne 5. 7. 2020 od 00:30 do 01:30 hodin. Po celou dobu měření byla jasná noční obloha. Místo terénního měření u obce Norberčany bylo zvoleno záměrně pro minimalizaci (v rámci možností) umělého jasu noční oblohy od osvětlení větších měst (viz obr. č. 45).



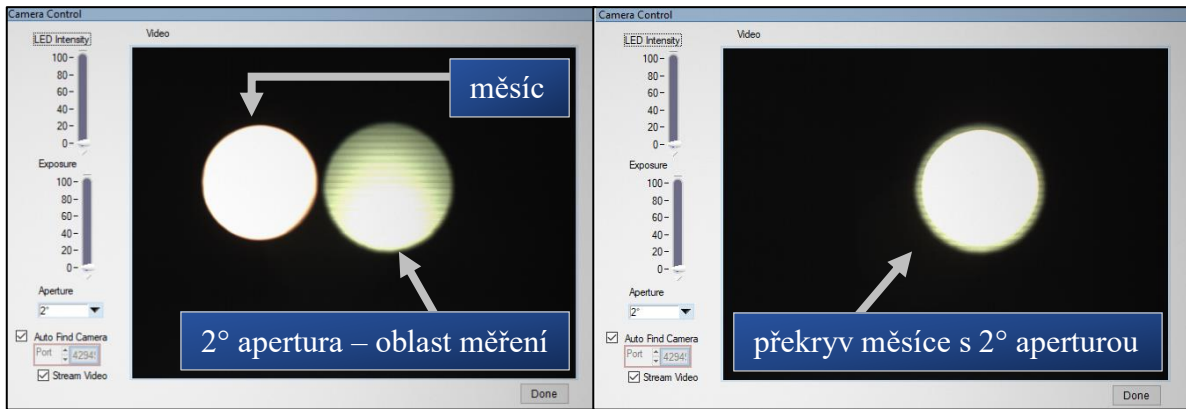
Obrázek 45: Vyobrazení místa terénního nočního měření na mapě světelného znečištění ČR. Převzato z [22].



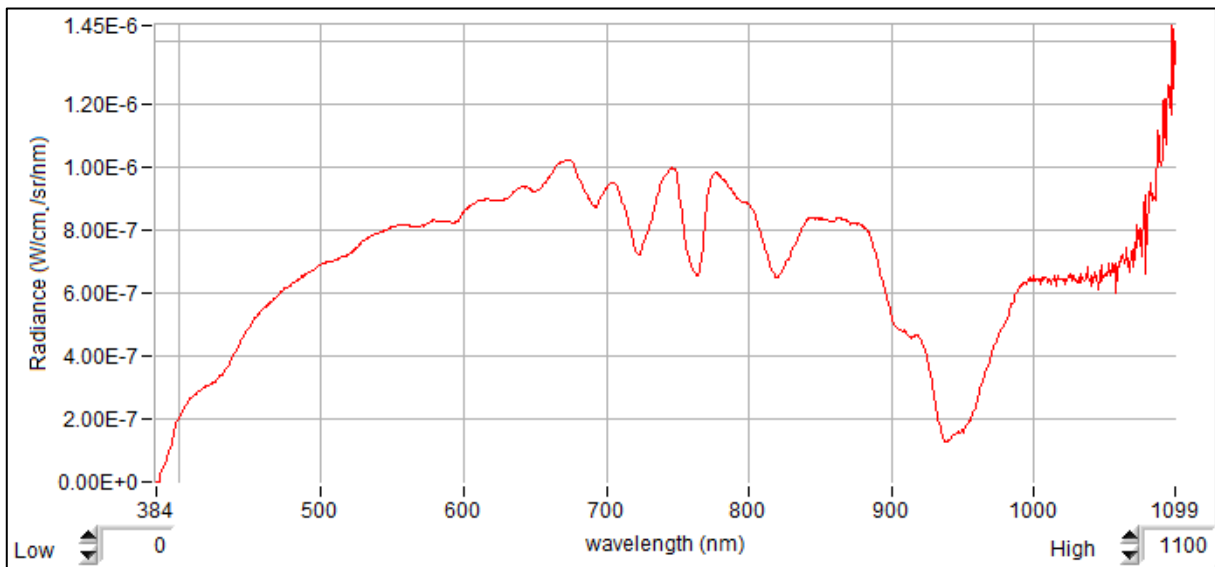
Obrázek 46: Noční měření v terénu – rozložení spektrometru.



Obrázek 47: Noční měření v terénu. Světlý bod, je promítnutý spot měřené oblasti na odrazivost měsíčního svitu na listoví.



Obrázek 48: Zobrazení poměrné velikosti apertury zorného pole s měsícem.



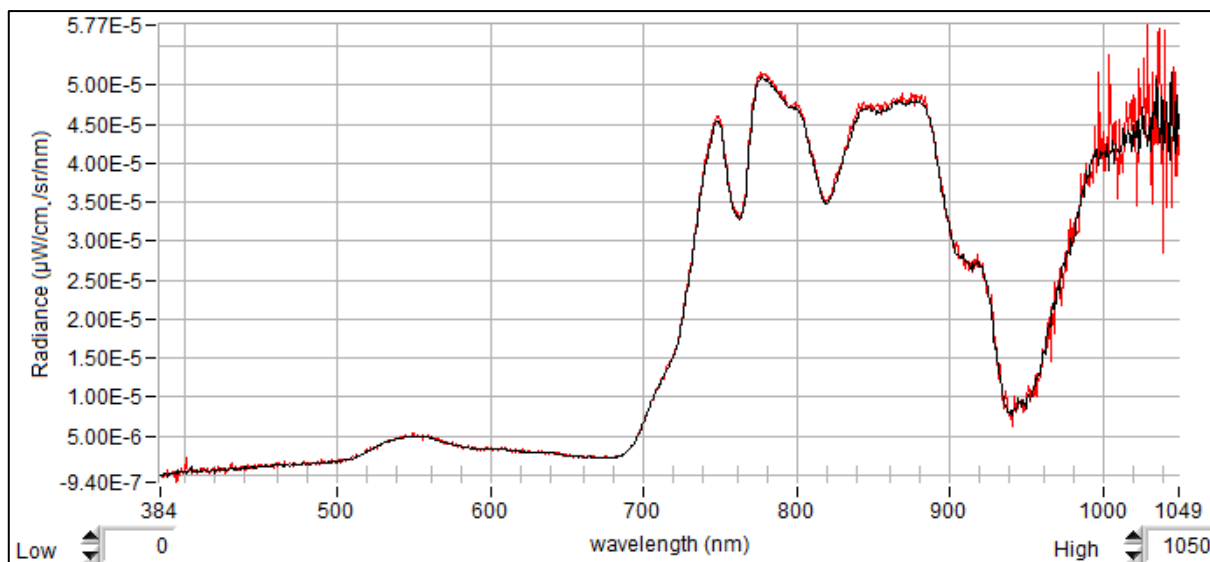
Graf 10: Naměřená spektrální zář měsíčního svitu při užití 2° apertury zorného pole.

Naměřené spektrum odražené sluneční záře od měsíce (viz graf č. 10) obsahuje podstatně menší hodnoty ve většinové oblasti viditelného světla, tedy vlnových délek 400 až 700 nm. Tato skutečnost vychází z rozptylu záření v zemské atmosféře.

Rayleighova teorie rozptylu uvádí, že intenzita rozptýleného záření roste s převrácenou hodnotou čtvrté mocniny vlnové délky. [3]

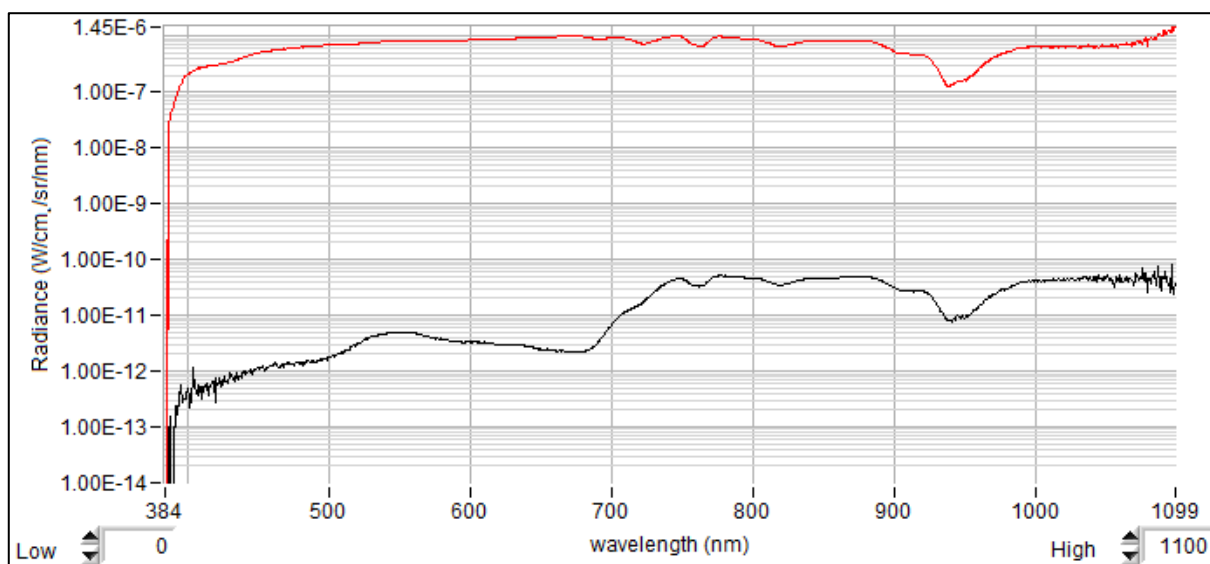
Tento fakt dále umocňuje, že v případě uvedeného měření byl měsíc zhruba 30° nad horizontem a jeho zář tak procházela poměrně dlouhou dráhu zemské atmosféry, podobně jako je tomu při západu či východu slunce.

Dále jsou v naměřeném spektru patrné oblasti zemské absorpce atmosféry, které jsou způsobeny interakcí záření s vodními parami a kyslíkem. V delších vlnových délkách IR záření je to pak oxid uhličitý, oxid dusný, methan atd.



Graf 11: Měření spektra odraženého svitu měsíce od zeleného listoví. Černá křivka odpovídá času expozice měření 60 sekund, červená křivka je pro třetinový čas 20 sekund, kde se projevil vyšší míra šumu.

Jak již bylo zmíněno, proces fotosyntézy způsobuje absorpci v oblasti VIS. Tato skutečnost se projevila na výsledné spektrální odrazivosti měsíčního svitu na listoví (viz graf č. 11). Kvantitativně se jedná o absorpci záření (v oblasti 400 až 700 nm) velikosti jednoho řádu, což lze vidět i na grafu níže.



Graf 12: Zobrazení spektrální záře přímého měsíčního svitu (červená křivka), ve srovnání s odraženým měsíčním svitem od zeleného listoví (černá křivka) při logaritmickém škálování.

Mezi hodnoty přímé měsíční záře a odražené měsíční záře od listoví (viz graf č. 12) je rozdíl třech řádů. Jak se ukázalo v měsíčním svitu, který tvoří majoritní složku osvětlení nočního terénu, je oblast blízkého infračerveného spektra zastoupena řádově stejnými hodnotami spektrální záře jako oblast VIS. Proto byl pro měření použit spektrometr se spektrální citlivostí v oblasti VIS až blízkého infračerveného záření.

3 Závěr

Byly navrženy postupy geometrie měření optických parametrů multifunkčního displeje (MFD), díky kterým bylo rozhodnuto o vhodné kompatibilitě MFD s noktovizorem (ANVIS) typu AVS-9 pro kokpit letounu L-159. Na MFD byly identifikovány při měření vady, které neměly dopad na konkrétní implementaci do letounu L-159. Jednalo se například o nedostatečný kontrast při vyšších pozorovacích úhlech, kterých však pilot není schopen dosáhnout v kokpitu letounu L-159.

V práci byly zahrnuty kapitoly pojednávající o principu a významu spektrální a amplitudové kalibrace užitého spektrometru. Současně v těchto kapitolách byla uvedena ověřovací měření správnosti těchto kalibrací spektrometru.

Dalším dílčím cílem této práce bylo terénní noční měření spektrální charakteristiky vyzařování noční oblohy v rozsahu od viditelného spektra až do blízké infračervené oblasti. Byla tak kvantifikována předpokládaná spektrální charakteristika vyzařování noční oblohy, konkrétně spektrální zář měsícem odraženého slunečního svitu. Toto měření odůvodnilo charakteristiku relativní spektrální citlivosti noktovizorů obecně i ANVIS.

Dne 24. 10. 2019 na společné konferenci pilotů stíhacího letectva a skupin leteckých návodčích bylo vyhodnoceno provedení úprav kokpitu pro kompatibilitu s přístroji nočního vidění letadel L-159 jako velmi zdařilé. Toto bylo i prakticky ověřeno při nočních kontrolních letech na území ČR a tím byl potvrzen výsledný statut kompatibility vyneseny na základě výše uvedených měřen

4 Zdroje

- [1] MIL-STD-3009, DEPARTMENT OF DEFENSE INTERFACE STANDARD: LIGHTING, AIRCRAFT, NIGHT VISION IMAGING SYSTEM (NVIS) COMPATIBLE. USA, 2 FEB 2001.
- [2] Walter Shawlee, The Dark and Mysterious World of Night Vision: Understanding ANVIS/NVIS/NVG Technology in the Cockpit. Avionics News, March 2008. Dostupné z: <http://aea.net/AvionicsNews/ANArchives/Mar08ANWorldOfNightVisionPart2.pdf>
- [3] Waynant, R. W., Ediger, M. N.: Electro-Optics Handbook (2nd Edition), McGraw-Hill, 2000.
- [4] Habel Jiří, Základy světelné techniky (5), Základy nauky o barvě. ČVUT v Praze, Elektrotechnická fakulta, červen 2009.
- [5] Coufalová Nikol, Parametry MKZJO a jejich vliv na detekční schopnost noktovizoru MUM 14. Univerzita Palackého v Olomouci. Diplomová práce, Olomouc 2017.
- [6] Gamma Scientific, Testing LCD Displays for NVIS Compatibility. Dostupné z: https://www.gamma-sci.com/sites/default/files/white-paper/testing_lcd_displays_for_nvis_compatibility.pdf
- [7] Gamma Scientific, Datasheet GS-1290. Dostupné z: https://www.gamma-sci.com/sites/default/files/data-sheet/gs-1290-nvis_rev_4.13.20.pdf
- [8] Optical Filters for Electronic Displays, Optolite™ EMIShield Micromesh. Dostupné z: <https://www.instrumentplastics.co.uk/products/optolite-emishield-micromesh>
- [9] THORLABS, Product Raw Data, OSL2 Light Source Emission Spectrum. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/images/TabImages/OSL2_Raw_Data2.xlsx
- [10] Obrázek 8: AVS-9. Převzato od výrobce Elbit Systems of America. Dostupné z: https://www.elbitsystems-us.com/hs-fs/hubfs/Website/Defense/Night%20Vision/Airborne/2019_AN_AVS_9.jpg?width=600&name=2019_AN_AVS_9.jpg
- [11] Ken Kaufmann, Photomultipliers: Low-Light, High-Speed Specialists, HAMAMATSU CORPORATION. Dostupné z: https://www.photonics.com/Articles/Photomultipliers_Low-Light_High-Speed/a25145
- [12] Suzanne Wiley, What are the Differences Between Night Vision, Digital, and Thermal? PULSAR, 2018. Dostupné z: <https://articles.pulsarnv.com/index.php/2018/01/09/what-are-the-differences-between-night-vision-digital-and-thermal/>
- [13] Michelson A., Studies in Optics. University of Chicago Press, 1927.
- [14] Obrázek 21: Rovinný diagram chromatičnosti CIE 1976 UCS s trichromatickými souřadnicemi u' a v' . Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/CIELUV#/media/File:CIE_1976_UCS.png

- [15] Obrázek 7: AVS-9 na přilbě HGU-55. Dostupné z: <https://www.flightgear.ch/ch-hgu-55-nvg?lightbox=dataItem-jex8tiwo>
- [16] Obrázek 9: Pilot při užití AVS-9 s externím bateriovým boxem. Dostupné z: <https://media.defense.gov/2018/Aug/07/2001951583/-1/-1/0/180802-F-ZF730-0229C.JPG>
- [17] Obrázek 11: Externí bateriový box na 4 ks AA baterií. Dostupné z: <https://themerenarycompany.com/products/anvis-4-cell-remote-battery-pack>
- [18] Obrázek 16: ANVIS typu II. Dostupné z: <http://onboard.thalesgroup.com/topowl-boosts-pilot-visibility-in-extreme-conditions/>
- [19] Obrázek 15: ANVIS typu I. Dostupné z: [https://www.armytimes.com/resizer/FVEbTrBvEz1-P67zy-vmh9gtEdU=/1200x0/filters:quality\(100\)/arc-anglerfish-arc2-prod-mco.s3.amazonaws.com/public/YX3I36AS4JAZBAJS6DIMLIK2KE.jpg](https://www.armytimes.com/resizer/FVEbTrBvEz1-P67zy-vmh9gtEdU=/1200x0/filters:quality(100)/arc-anglerfish-arc2-prod-mco.s3.amazonaws.com/public/YX3I36AS4JAZBAJS6DIMLIK2KE.jpg)
- [20] Obrázek 19: Zobrazení daných gamutů v diagramu chromatičnosti XYZ. Dostupné z: <https://photographylife.com/wp-content/uploads/2018/12/sRGB-vs-Adobe-RGB-vs-ProPhoto-RGB-573x650.png>
- [21] Obrázek 23: Spektrometr Perkin-Elmer Lambda 1050. Dostupné z: https://www.perkinelmer.com/labsolutions/resources/images_for_resize/700x700_Lambda_1.png
- [22] Obrázek 45: Vyobrazení místa terénního nočního měření na mapě světelného znečištění ČR. Dostupné z: http://svetelnezneisteneni.cz/wp-content/uploads/2017/05/Czech_republic_atlas_light_pollution_small.png