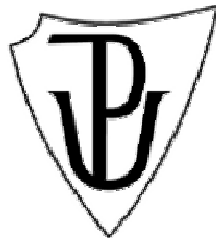


Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra optiky



Bakalářská práce

**Měření a hodnocení pozorovacích termovizních přístrojů
v mlze**

Vypracoval: Ondřej Kaprál

Vedoucí práce: RNDr. Vladimír Chlup

Studijní obor: Přístrojová optika

Olomouc 2011

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod odborným vedením RNDr. Vladimíra Chlupa, za použití pramenů uvedených v seznamu literatury.

V Olomouci dne

Podpis

Děkuji RNDr. Vladimíru Chlupovi za cenné rady, poskytování materiálových podkladů a čas strávený při praktických měřeních pro tuto bakalářskou práci.

Děkuji společnosti Pramacom–HT, spol. s.r.o., za to, že mi umožnila realizovat měření ve své laboratoři a také za zapůjčení měřících přístrojů.

Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora:	Ondřej Kaprál
Instituce:	Univerzita Palackého v Olomouci Přírodovědecká fakulta 17. listopadu 1192/12 771 46 Olomouc
Pracoviště:	Katedra optiky
Studijní obor:	Přístrojová optika
Název práce:	Měření a hodnocení pozorovacích termovizních systémů v mlze
Vedoucí práce:	RNDr. Vladimír Chlup
Počet stran:	69
Rok obhajoby:	2011
Klíčová slova:	Termovize, IR, LWIR, MWIR, dosah systému, voda

Tato práce si klade za cíl popsat principy funkce termovizních zobrazovacích systémů, pojednat o kvalitativních parametrech pozorovacích termovizních systémů a popsat vliv zemské atmosféry na kvalitu zobrazení termovizních přístrojů. V praktické části pak realizovat konstrukci měřicího zařízení pro měření dosahu termovizních přístrojů a prověřit jeho funkci při hodnocení dvou termovizních přístrojů v oblasti LWIR. Následně vyhodnotit zjištěné výsledky praktického měření.

Bibliographical identification

Autor's first name and surname: Ondřej Kaprál

School: University of Palacky in Olomouc
Faculty of Science
17. listopadu 1192/12
771 46 Olomouc

Department: Department of optics

Program: Instrumental optics

Title of thesis: Measurement and evaluation of thermovision observation devices in the fog

Thesis consultant: RNDr. Vladimír Chlup

Number of pages: 69

Thesis defended in: 2011

Keywords: Thermo-vision, IR, LWIR, MWIR, water

This thesis aims to describe the principles of thermo-vision imaging systems function, the issue of qualitative parameters of thermo-vision observation devices, and describe the influence of Earth's atmosphere, the image quality thermo-vision devices. In practice, to implement the construction of the measuring device for measuring the impact thermo-vision devices, and to examine its role in evaluation of the two thermo-vision devices in the LWIR. Then evaluate the results obtained practical measurements.

Obsah

1.	ÚVOD	9
2.	PRINCIP FUNKCE TERMOVIZNÍCH SYSTÉMŮ	10
2.1.	Termovizní systém.....	10
2.2.	Lidské oko.....	10
2.3.	Spektrum elektromagnetického záření.....	11
2.4.	Teplotní zákony	12
2.4.1.	Kirchhoffův zákon	12
2.4.2.	Planckův vyzařovací zákon	12
2.4.3.	Wienův posunovací zákon	14
2.4.4.	Stefan – Boltzmannův zákon	15
2.5.	Absolutně černé těleso	17
2.5.1.	Princip černého tělesa	17
2.5.2.	Emisivita	17
2.5.3.	Černé těleso HGH Systemes Infrarouges	19
2.5.4.	Johnsonův tepelný test typu člověk	20
3.	VLIV ZEMSKÉ ATMOSFÉRY NA KVALITU ZOBRAZENÍ	23
3.1.	Zemská atmosféra	23
3.2.	Spektrální propustnost atmosféry	24
3.3.	Vlhkost vzduchu	25
3.3.1.	Absolutní vlhkost.....	25
3.3.2.	Relativní vlhkost.....	26
3.4.	Srážková voda.....	26
3.5.	Výpočet srážkové vody.....	29
3.6.	Oblačnost a mlha	31
3.6.1.	Oblak.....	31
3.6.2.	Mlha	31
3.7.	Rozptyl záření	32
3.7.1.	Reyleighův rozptyl.....	32
3.7.2.	Mieho rozptyl.....	32
3.8.	Simulace průchodu záření atmosférou.....	33
3.8.1.	libRadtran verze 1.6.....	33
3.8.1.	Příklady simulace v programu libRadtran	33
4.	KVALITATIVNÍ PARAMETRY TERMOVIZNÍCH SYSTÉMŮ	40
4.1.	Parametry termovizních kamer Thermal Eye	40

4.2.	Parametry, které výrobce neuvádí	41
4.2.1.	Nyquistova frekvence	41
4.2.2.	Teoretický dosah termovizního systému	41
5.	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ	43
5.1.	Použité přístroje	43
5.1.1.	Laserový dálkoměr Disto D5	43
5.1.2.	Laserový dálkoměr TruPulse 200	43
5.1.3.	Bezkontaktní teploměr Fluke 574	44
5.1.4.	Kontaktní teploměr GMH 3750	44
5.1.5.	Kestrel 4500NV	45
5.2.	Měření MRTD na vzdálenost 1 m	45
5.2.1.	Definice MRTD	45
5.2.2.	Podmínky měření	46
5.2.3.	Postup měření	46
5.2.4.	Thermal Eye X-50	47
5.2.5.	Thermal Eye X-200	48
5.3.	Měření dosahu systému v laboratorních podmínkách	50
5.3.1.	Thermal Eye X-50 při vypnutém ohřevu topných desek	50
5.3.2.	Thermal Eye X-200 při vypnutém ohřevu topných desek	51
5.3.3.	Thermal Eye X-50 při zapnutém ohřevu topných desek	53
5.3.4.	Thermal Eye X-200 při zapnutém ohřevu topných desek	54
5.4.	Měření dosahu systému za příznivých atmosférických podmínek	55
5.4.1.	Thermal Eye X-50 při zapnutém ohřevu topných desek	55
5.4.2.	Thermal Eye X-200 při vypnutém ohřevu topných desek	56
5.4.3.	Thermal Eye X-200 při zapnutém ohřevu topných desek	57
5.4.4.	Souhrn výsledků měření MRTD a dosahu systému.....	58
5.5.	Měření vlivu H ₂ O v kapalném skupenství na kvalitu zobrazení	59
5.5.1.	Měření MRTD na vzdálenost 1,38 m	60
5.5.2.	Měření MRTD na vzdálenost 1,38 m přes Ge plandesku.....	61
5.5.3.	Vliv vody v kapalném stavu na kvalitu zobrazení.....	62
5.5.4.	Vliv velmi tenké vrstvy vody na kvalitu zobrazení	63
5.5.5.	Vliv tenké vrstvy vody stlačené mezi Ge a ZnS sklem	64
6.	ZÁVĚR	66
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	

1. Úvod

Tato práce byla vytvořena s cílem zasvětit čtenáře do problematiky termovizních systémů a práce s nimi. Dále také zjistit dosah dvou termovizních systémů, jež byly k dispozici. Práce je členěna do pěti kapitol.

V první kapitole je čtenář seznámen s principem funkce termovizních zobrazovacích systémů. Jsou vysvětleny základní teplotní zákony, týkající se funkce termovizních systémů. Dále je objasněn pojem absolutně černé těleso a parametry, které ho charakterizují. Následně se čtenář seznámí s Johnsonovým tepelným testem, jenž byl pro tuto práci vytvořen.

V druhé kapitole je popsána zemská atmosféra. Její složení a fyzikální rozdělení. Dále jsou objasněny pojmy související s vodou jak v kapalně, tak v plynné formě, které se v zemské atmosféře nacházejí. Čtenář je také velmi krátce seznámen s použitím simulačního programu libRadtran.

Ve třetí kapitole jsou popsány termovizní kamery, jež byly v průběhu práce používány. Objasněny jsou také některé pojmy týkající se dosahu termovizního systému.

Ve čtvrté kapitole je čtenář seznámen s přístroji použitými při praktickém měření. Následně je popsáno celé praktické měření, jak bylo postupováno a komplikace při měření. Závěrem jsou vyhodnoceny naměřené hodnoty.

V poslední, páté kapitole, jsou shrnuty zjištěné výsledky měření.

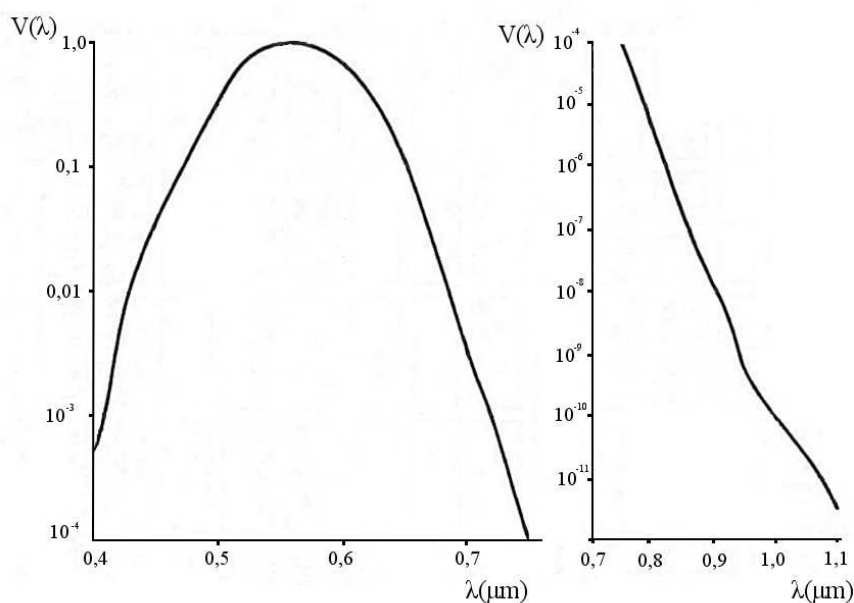
2. Princip funkce termovizních systémů

2.1. Termovizní systém

Termovizní kamery jsou pasivní zobrazovací systémy, které pro svůj provoz nepotřebují žádné externí osvětlení. Jsou založeny na schopnosti detekovat a následně zviditelnit infračervenou část elektromagnetického spektra, tedy vlnovou délku 750 nm – 1 mm, jež je pro náš přirozený detektor, lidské oko, běžně neviditelná. Termovizní kamery jsou využívány např. v energetice, stavebnictví, zdravotnictví nebo pro účely ozbrojených složek státu (policie, armáda).

2.2. Lidské oko

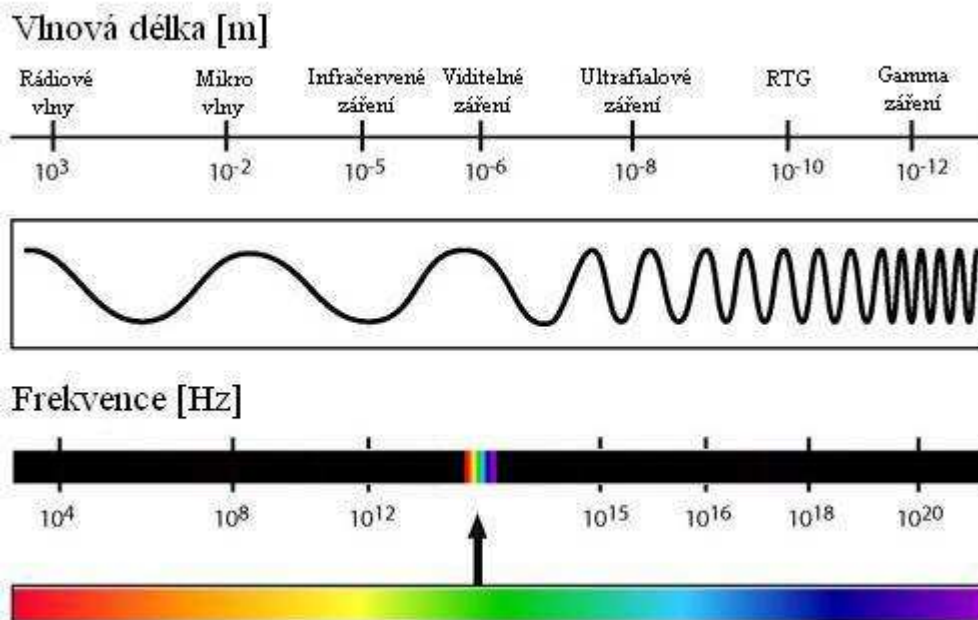
Člověk vnímá pouze velmi úzkou část elektromagnetického spektra. Avšak velký rozsah spektrální citlivosti lidského oka, jak je možné vidět v pravé části obr. 1, způsobuje, že oko je schopno reagovat i na záření o větší vlnové délce než 1 μm . Ovšem spektrální citlivost oka pro tuto vlnovou délku je oproti maximu své citlivosti, která se nachází okolo 550 nm, asi o 11 řádů nižší. Lze předpokládat, že pro vlnovou délku 1,15 μm bude již reakce oka minimální, tudíž záření této a delších vlnových délek bude vnímáno jako teplo na kůži. Navíc vzhledem k tomu, že energii prostřednictvím infračerveného záření vyzařují všechny objekty, bylo by i samotné oko oslněno vlastní emisí záření [4].



Obr. 1: Spektrální citlivost lidského oka [4]

2.3. Spektrum elektromagnetického záření

Světlo je elektromagnetické vlnění a je součástí širokého spektra záření, jež zemská atmosféra propouští. Na obr. 2 je elektromagnetické spektrum. Přechody mezi jednotlivými druhy záření jsou plynulé. Pro každou oblast spektra se používá jiná technologie zobrazení daného záření.



Obr. 2: Elektromagnetické spektrum

Důležitým parametrem elektromagnetického záření je vlnová délka

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.1)$$

kde je

c rychlost světla ($c = 299792458 \text{ [m}\cdot\text{s}^{-1}]$),

f frekvence [Hz]

a energie fotonu

$$E = h \cdot f, \quad (1.2)$$

kde je

h Planckova konstanta ($h = 6,6256 \pm 0,0005 \cdot 10^{-34} \text{ [J}\cdot\text{s}]$),

f frekvence [Hz].

2.4. Teplotní zákony

2.4.1. Kirchhoffův zákon^[8]

Tento zákon, který byl objeven Gustavem Robertem Kirchhoffem (1824 – 1887), říká, že emisivita a absorpce spolu úzce souvisí a oba tyto pojmy jsou funkcí teploty. Pojem emisivita bude v této práci ještě popsán. Tento zákon lze vyjádřit jako

$$\frac{W'}{\alpha} = f(T), \quad (1.3)$$

kde je

- W' intenzita vyzařování tělesa,
- α absorpce,
- $f(T)$ funkce proměnné T (teploty).

Kirchhoffův zákon tvrdí, že těleso pohlcuje nejvíce záření takových vlnových délek, které nejvíce vyzařuje.

2.4.2. Planckův vyzařovací zákon

Při svém pátrání pro nalezení vztahu mezi zářením, jež emituje černé těleso (viz. kapitola 2.5.) v závislosti na teplotě a vlnové délce, vyvinul Max Planck (1858 – 1947) slavný vztah, který byl následně po něm pojmenovaný. Jeho vědecké úsilí položilo základy kvantové teorie, za niž dostal v roce 1918 Nobelovu cenu [9].

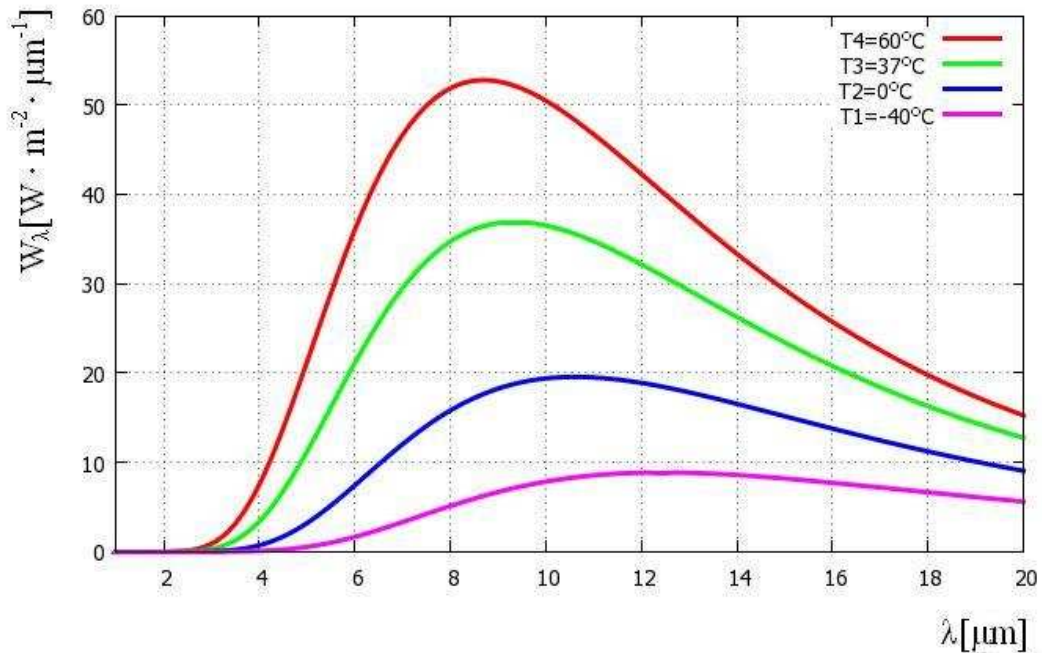
$$W_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{C_2/\lambda T} - 1]}, \quad (1.4)$$

kde je

- W_{λ} spektrální hustota vyzařování absolutně černého tělesa [Wm^{-3}],
- λ vlnová délka [μm],
- T teplota absolutně černého tělesa [K],
- C_1 první radiometrická konstanta ($C_1 = 2\pi hc^2$),
- C_2 druhá radiometrická konstanta ($C_2 = \frac{hc}{k}$),
- c rychlost světla ($c = 299792458 \text{ [ms}^{-1}\text{]}$),
- h Planckova konstanta ($h = 6,6256 \pm 0,0005 \cdot 10^{-34} \text{ [Js]}$),
- k Boltzmannova konstanta ($k = 1,38054 \pm 0,00018 \cdot 10^{-23} \text{ [JK}^{-1}\text{]}$).

Dále bude spektrální intenzita vyzařování W_λ uváděna v technicky výhodnějších jednotkách a to $[\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}]$.

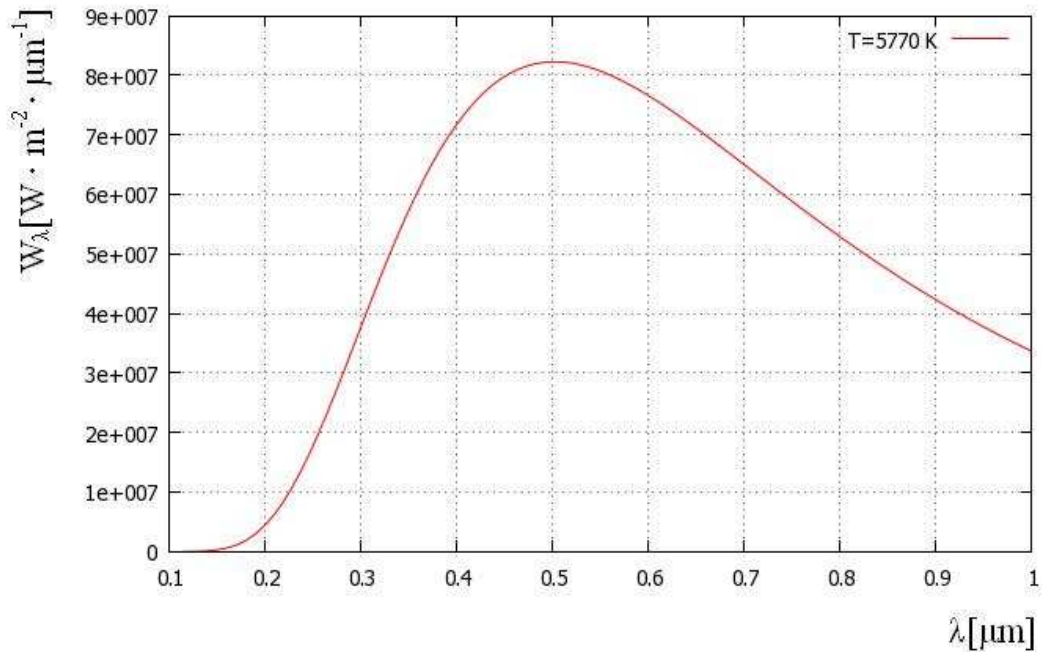
Vztah 1.4. je na obr. 3 znázorněn graficky pro rozsah teplot obvyklých na Zemi. První křivka růžové barvy, zobrazuje průběh spektrální intenzity vyzařování pro teplotu -40°C , křivka modré barvy pro teplotu 0°C , zelená pro $+37^\circ\text{C}$ a červená pro $+60^\circ\text{C}$.



Obr. 3: Spektrální hustota vyzařování pro teploty obvyklé na Zemi

Z grafu na obr. 3. je patrné, že maximální hodnoty intenzity vyzařování pro rozsah teplot -40°C až $+60^\circ\text{C}$ se pohybují v rozsahu $8 - 12 \mu\text{m}$ (LWIR). Konkrétně pro teplotu lidského těla je to okolo $10 \mu\text{m}$, což je oblast, o kterou se nejvíce zajímáme.

Na obr. 4. je vykreslen graf spektrální intenzity vyzařování pro teplotu povrchu slunce, což je 5770 K . Lze vidět, že maximum vyzařování slunce je okolo $0,5 \mu\text{m}$, tedy ve viditelné oblasti elektromagnetického spektra. Shodou okolností má na vlnovou délku okolo $0,550 \mu\text{m}$ lidské oko největší citlivost, jak je zřejmé z obr. 1. Zmíněná vlnová délka odpovídá zelené barvě.



Obr. 4: Planckův zákon pro teplotu slunce

2.4.3. Wienův posunovací zákon

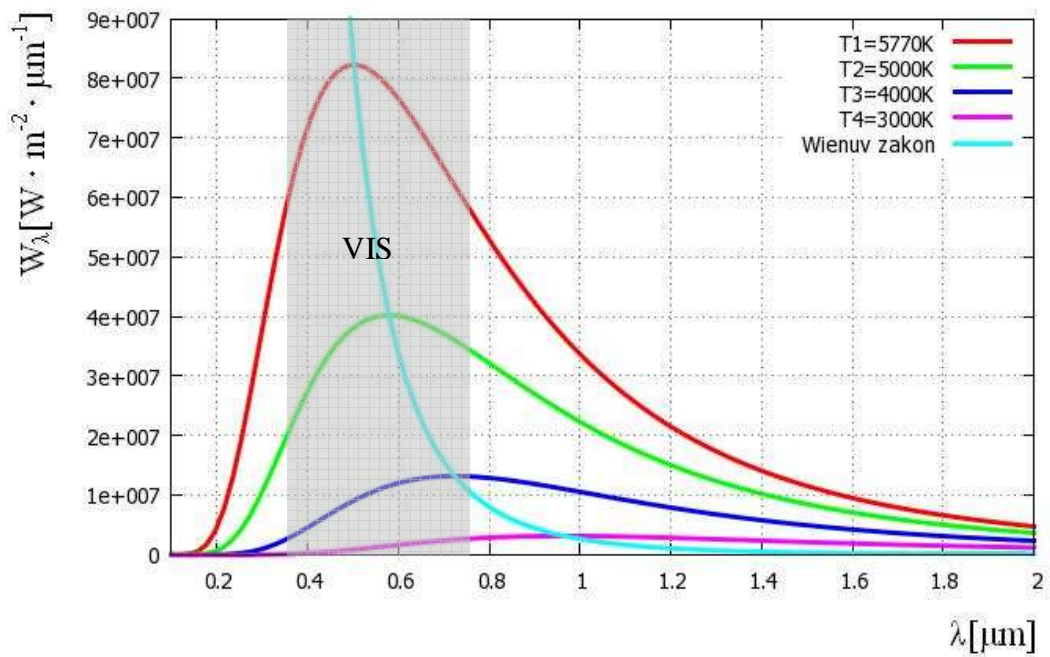
Na základě termodynamických úvah odvodil Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Wien (1864-1928) v roce 1896 zákon pro vlnovou délku λ_{\max} , na které je spektrální hustota intenzity vyzařování W_λ maximální. Za tento a další související objevy získal v roce 1911 Nobelovu cenu za fyziku [9].

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (1.7)$$

kde je

- λ_{\max} vlnová délka při maximální intenzitě vyzařování,
- b Wienova konstanta ($b = 2897,768 \text{ } [\mu\text{m} \cdot \text{K}]$),
- T termodynamická teplota [K].

Wienův zákon říká, že s rostoucí teplotou zářiče se maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování posouvá ke kratším vlnovým délkám. Tedy ve spektru záření je stále větší podíl vlnových délek z viditelné oblasti. Grafické vyjádření Wienova posunovacího zákona se zvýrazněnou viditelnou částí spektra je na obr. 5. Růžová křivka odpovídá teplotě 3000 K, modrá 4000 K, zelená 5000 K a červená teplotě slunce, tedy 5770 K.



Obr. 5: Wienův zákon se zvýrazněnou viditelnou částí spektra

2.4.4. Stefan – Boltzmannův zákon ^{[8],[9]}

Stefan – Boltzmannův zákon vychází ze zákona Planckova. Říká, že celková intenzita vyzařování černého tělesa je rovna integraci Planckova zákona v mezích od 0 do ∞

$$W_{\text{celkova}} = \int_0^{\infty} W_{\lambda} d(\lambda). \quad (1.8)$$

Josef Stefan (1835-1893) a jeho žák Ludwig Boltzmann (1844-1906) došli ke vztahu

$$W_{\text{celkova}} = \sigma T^4, \quad (1.9)$$

kde je

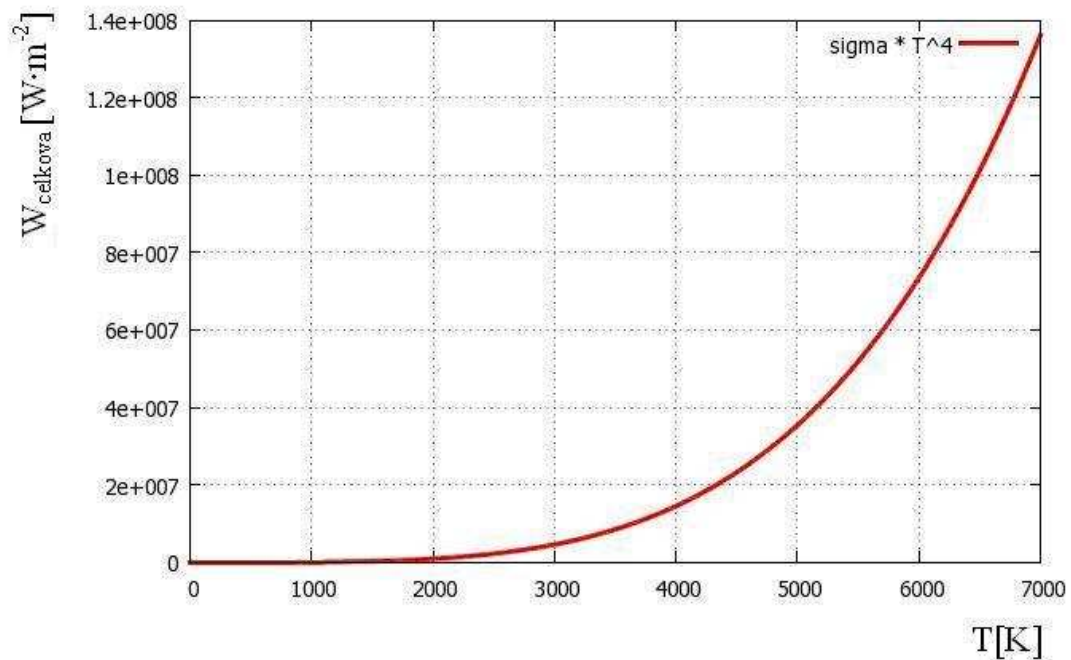
σ Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{]}$),

T teplota černého tělesa [K].

také obecně, v mezích od λ_1 do λ_2 , tedy

$$W_{\text{celkova}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda} d(\lambda). \quad (1.10)$$

Na obr. 6. je grafické vyjádření Stefan – Boltzmannova zákona pro teploty v rozsahu od 0 K do 7000 K.



Obr. 6: Grafické vyjádření Stefan-Boltzmannova zákona pro různé teploty

Ze zmíněného vzorce Stefan – Boltzmannova zákona (1.10), lze vypočítat celkovou intenzitu vyzařování pro teploty obvyklé na zemi, uvedené v grafu na obr. 3. Tedy pro teplotu +60 °C je

$$W_{\text{celkova}} = \sigma \cdot 333,15^4 = 0,069 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}. \quad (1.11)$$

Z integrace Planckova zákona, v mezích od $\lambda_1 = 7 \mu\text{m}$ do $\lambda_2 = 14 \mu\text{m}$, lze také vypočítat intenzitu vyzařování v pásmu LWIR pro dané teploty. Pro přehlednost a snadné srovnání jsou výsledky uvedeny v tab. 1.

t [°C]	T [K]	σT^4 [W · m ⁻²]	$\int_{7\mu\text{m}}^{14\mu\text{m}} W_\lambda d(\lambda)$ [W · m ⁻²]
60	333,15	698,51	322,83
37	310,15	524,68	232,94
0	273,15	315,65	124,45
-40	233,15	167,55	51,93

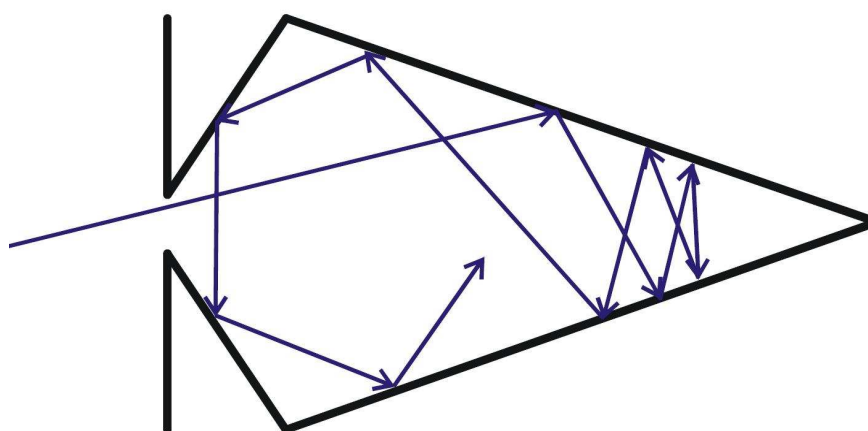
Tab. 1: Celková intenzita vyzařování při teplotách obvyklých na Zemi

2.5. Absolutně černé těleso

2.5.1. Princip černého tělesa

Černé těleso je definováno jako ideální zářič, který pohlcuje veškeré záření na něj dopadající, bez ohledu na vlnovou délku [9].

Lze si jej představit, jak uvádí obr. 7, jako malý otvor do dutiny se stěnami pokrytými látkou vykazující velkou pohltivost. Jakékoliv záření, které projde otvorem do této dutiny, je po několika odrazech kompletně pohlceno. Za těchto okolností se nám otvor bude jevit jako dokonalé absolutně černé těleso.



Obr. 7: Možná realizace absolutně černého tělesa [12]

2.5.2. Emisivita ^{[10], [11]}

Zatím bylo zmiňován pouze pojem absolutně černé těleso, které představuje idealizovaný objekt. Ve skutečnosti však existují vlastnosti, které odlišují reálné objekty od černého tělesa:

- spektrální pohltivost (absorptance) – veličina vyjadřující míru absorpce záření daným objektem

$$\alpha_{\lambda} = \frac{P_{\alpha\lambda}}{P_{0\lambda}}, \quad (1.12)$$

kde je

$P_{\alpha\lambda}$ výkon záření (zářivý tok) objektem absorbovaný,

$P_{0\lambda}$ výkon záření na objekt dopadající.

- spektrální odrazivost (reflektance) – veličina charakterizující schopnost objektu odrazet záření na něj dopadající

$$\rho_{\lambda} = \frac{P_{\rho\lambda}}{P_{0\lambda}}, \quad (1.13)$$

kde je

$P_{\rho\lambda}$ výkon záření (zářivý tok) od objektu odražený,

$P_{0\lambda}$ výkon záření na objekt dopadající.

- spektrální propustnost (transmitance) – veličina vyjadřující schopnost objektu propouštět záření

$$\tau_{\lambda} = \frac{P_{\tau\lambda}}{P_{0\lambda}}, \quad (1.14)$$

kde je

$P_{\tau\lambda}$ výkon záření (zářivý tok) z objektu vystupující,

$P_{0\lambda}$ výkon záření na objekt dopadající.

Celkový součet všech těchto faktorů, bez ohledu na vlnovou délku záření, je vždy

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1. \quad (1.15)$$

V případě absolutně černého tělesa se $\alpha_{\lambda} = 1$, $\rho_{\lambda} = 0$ a $\tau_{\lambda} = 0$, protože veškeré dopadající záření je v tomto případě absorbováno.

Nyní se dostáváme k již zmíněnému pojmu emisivita ε , který lze vyjádřit jako poměr intenzity vyzařování skutečného objektu, neboli selektivního zářiče, ku intenzitě vyzařování černého tělesa, při stejné vlnové délce a teplotě:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{W'(\lambda, T)}{W(\lambda, T)}, \quad (1.16)$$

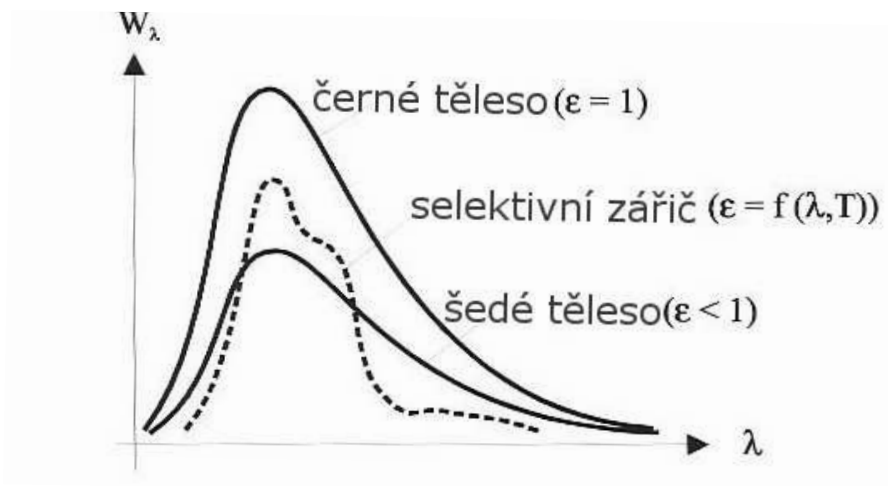
kde je

$W'(\lambda, T)$ intenzita vyzařování selektivního zářiče,

$W(\lambda, T)$ intenzita vyzařování absolutně černého tělesa.

Rozlišujeme tedy tři typy zářičů, jak uvádí obr. 8:

- absolutně černé těleso $\varepsilon = 1$,
- selektivní zářič, jehož ε závisí na teplotě a vlnové délce,
- šedé těleso $\varepsilon < 1$ (jeho emisivita je menší než 1, avšak není závislá na λ).



Obr. 8: Spektrální emisivita tří typů zářičů [9]

V tab. 2 je uvedena emisivita některých běžných materiálů.

Materiál	Emisivita	Materiál	Emisivita
Voda	0,98	Bílý papír	0,9
Led	0,97	Cihla	0,85
Pryž	0,93	Sníh	0,8
Zmrzlá zemina	0,93	Beton	0,54
Sklo	0,92	Rtuť	0,1

Tab. 2: Emisivita některých běžných materiálů [14]

Více informací o problematice absolutně černého tělesa lze nalézt např. v [5].

2.5.3. Černé těleso HGH Systemes Infrarouges

Pro měření jsem dostal k dispozici černé těleso od firmy HGH Systemes Infrarouges, uvedené na obr. 9, jež je vyrobené z vhodného materiálu o vysoké emisivitě $\epsilon = 0,97 \pm 0,02$. Jeho rozměry jsou 100 x 100 mm.

Před toto černé těleso lze připevnit několik druhů testových obrazců, z nichž pro účely tohoto měření, byl nejvhodnější čárový test složený ze čtyř dvojitých čar (obr. 10). Šířka jedné čáry (dvojčáry) je 20 mm.



Obr. 9: Absolutně černé těleso



Obr. 10: Přípevněný čárový test

Černé těleso je ovládáno řídicí jednotkou (obr. 11), která umožňuje, mimo jiné, nastavit teplotní diferenci mezi černým tělesem a použitým testovým obrazcem.



Obr. 11: Řídicí jednotka černého tělesa

2.5.4. Johnsonův tepelný test typu člověk

V laboratorních podmínkách umožňuje černé těleso HGH měřit řadu parametrů termovizních systémů, jako minimální rozlišitelnou teplotní diferenci, funkci přenosu kontrastu a další. Pro účely měření vlivu atmosféry, mlhy, smogu apod., je však využití tohoto přístroje těžko realizovatelné. Proto bylo mým cílem sestavit testovací zařízení, které by umožňovalo měření v exteriéru za různých atmosférických podmínek.

Princip konstrukce černého tělesa společnosti HGH Systemes Infrarouges se stal inspirací pro sestavení Johnsonova tepelného testu typu člověk. Z předchozího roku byla k dispozici železná konstrukce opatřená čtyřmi vyhřívanými deskami. Použití

tohoto testového obrazce bylo takové, že dvěma deskám se nastavila teplota t_1 a druhým dvěma teplota t_2 . Vznikl tedy test typu odhalení. Mým úkolem bylo do konstrukce další čtyři desky přidat. Následně vytvořit čárový test, který měl být předsazený před vyhřívané desky, aby bylo možné nastavovat teplotní diferencii. Výsledkem tedy byl Johnsonův test typu člověk, složený z osmi vyhřívaných hliníkových desek VD-2n o rozměrech 400 x 300 x 50 mm s regulací teploty v rozsahu až do +70 °C od teploty okolí. Teplota desek je měřena vestavěným digitálním teploměrem. Přesnost regulace teploty je $\pm 0,2$ °C. Nastavení teploty pro všechny topné desky na stejnou hodnotu vyžaduje od obsluhy jistou dávku trpělivosti z důvodu poněkud horší přístupnosti regulátoru.



Obr. 12: Vyhřívaná deska VD-2n [19]

Rozměry Johnsonova testu jsou 1700 x 600 mm. Před vyhřívané desky je 50 mm předsazený čárový test typu identifikace, sestavený z 50 mm širokých pruhů hliníkové pásky. Ta byla použita s úmyslem kvalitnějšího oddělení čárového testu od topných desek. Z vnější strany jsou pruhy pokryty ještě černou kobercovou páskou. V případě potřeby konstrukce umožňuje výměnu čárového testu jiných frekvencí.

Uvedený pojem identifikace je použit ve smyslu vojenské terminologie, která rozlišuje tři stupně množství informací získaných o objektu [4]:

- 1) Odhalení - zjištění, že se někde v prostoru nachází určitý objekt (1č/test).
- 2) Rozpoznání - přiřazení detekovaného objektu k určité třídě (3č/test).
- 3) Identifikace - přiřazení sledovaného objektu k druhu své třídy (6č/test).

Průběh konstrukce Johnsonova testu je uveden na obr. 13, 14 a 15. Konkrétní měření, s tímto zařízením prováděná, jsou uvedeny v kapitole 5.3.



Obr. 13: Konstrukce Johnsonova testu



Obr. 14: Konstrukce Johnsonova testu



Obr. 15: Sestrojený Johnsonův test typu člověk

3. Vliv zemské atmosféry na kvalitu zobrazení

3.1. Zemská atmosféra

Atmosféra je plynný obal Země. V převážné míře rotuje společně se Zemí. Také ji chrání před kosmickým zářením. Složení atmosféry, bez vodních par, uvádí tab. 3.

Složka	Chemická značka	Procento objemu	Absorpce 2 – 15 μ m
Dusík	N ₂	78,084	Ne
Kyslík	O ₂	20,946	Ne
Argon	A	0,934	Ne
Kysličník uhličitý	CO ₂	0,032	Ano
Neon	Ne	1,818 · 10 ⁻³	Ne
Helium	He	5,24 · 10 ⁻⁴	Ne
Metan	CH ₄	2,0 · 10 ⁻⁴	Ano
Krypton	Kr	1,14 · 10 ⁻⁴	Ne
Oxid dusný	N ₂ O	5 · 10 ⁻⁵	Ano
Vodík	H ₂	5 · 10 ⁻⁵	Ne
Xenon	Xe	9,0 · 10 ⁻⁶	Ne
Oxid uhelnatý	CO	7,5 · 10 ⁻⁶	Ano

Tab. 3: Složení zemské atmosféry [3]

Podle fyzikálních vlastností lze rozdělit atmosféru na [6],[7]

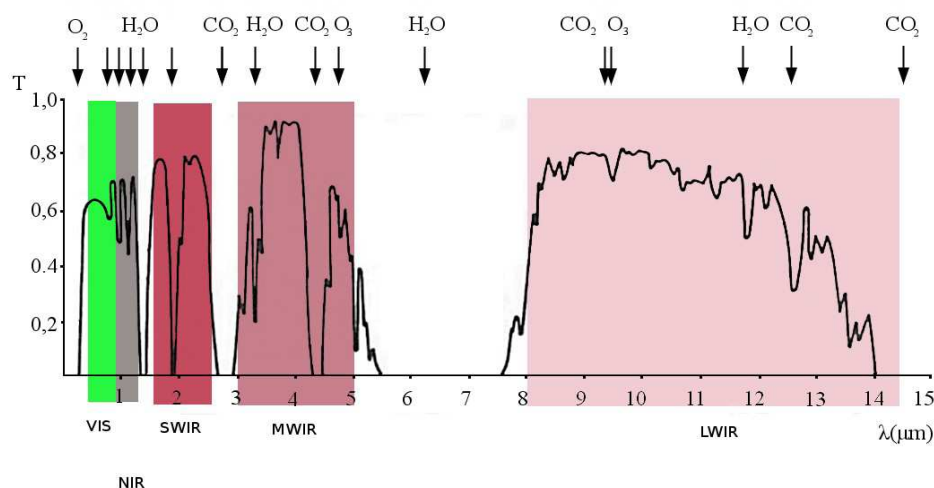
- troposféru – je nejnižše položená a také nejhustší vrstva atmosféry. Téměř všechna voda nacházející se celkově v atmosféře, je obsažena právě v této vrstvě. V našich zeměpisných šířkách sahá do výšky 10 – 12 km. Maximální výšky dosahuje okolo rovníku, a to 16 – 18 km. Většina meteorologických jevů se odehrává právě zde. Pro tuto vrstvu atmosféry je typické snižování teploty o 0,65 °C na každých 100 m výšky. Troposféra představuje okolo ¾ celkové hmotnosti atmosféry.
- stratosféru – navazuje na troposféru a průměrně dosahuje do výšky 50 km. Zajímavá je především průběhem teplot. Do 20 – 25 km jsou teploty záporné.

Mezi 25 – 50 km dochází k inverzi teplot vlivem absorpce ultrafialového záření v důsledku velkého množství ozónu. Nad touto vrstvou teplota opět klesá.

- mezoféra – tato vrstva se nachází ve výšce 50 – 80 km nad zemí. V letním období je teplota v této vrstvě od -80 °C do -90 °C.
- termosféra – je vrstva ve výškách nad 80 km. Dosahuje do značných výšek 600 – 1200 km nad zemský povrch. Pro tuto sféru je typický silný nárůst teplot se vzrůstající výškou, dosahující hodnot až nad 1000 °C. Vyznačuje se také obsahem vysokého množství iontů, tedy velkou elektrickou vodivostí.
- exosféru – tvoří přechod mezi atmosférou a volným vesmírným prostorem. Hustota vzduchu je zde téměř nezměřitelná. Dosahuje do výšky 20 000 – 70 000 km.

3.2. Spektrální propustnost atmosféry ^[4]

Při pozorování na větší vzdálenosti je důležité brát v úvahu spektrální propustnost atmosféry a také přítomnost fotonů, které jsou zprostředkovateli obrazu. Propustnost zemské atmosféry se mění a závisí na jejím složení a také směru šíření záření.



Obr. 16: Propustnost atmosféry podle Hudsona a Gebbieho [3]

Výše uvedený graf na obr. 16 ukazuje spektrální propustnost atmosféry v rozmezí do 15 μm, která byla změřena na vzdálenost 1828 m v horizontálním směru nad mořskou hladinou. Složky, jež jsou odpovědné za pásy absorpce jsou uvedeny v horní

části grafu. Pro pozorovací a měřicí účely na delší vzdálenosti, je několik oblastí v podstatě nepoužitelných:

- okolo 1,35 μm ,
- okolo 1,8 μm ,
- pásmo 2,5 μm až 3 μm ,
- pásmo 5 μm až 8 μm .

Propustnost atmosféry podstatně závisí na stavu ovzduší a zásadním způsobem ovlivňuje možnosti pro odhalení, rozpoznání a identifikaci pozorovaných objektů. I přes tuto proměnnost rozeznáváme čtyři základní oblasti propustnosti atmosféry pro oblast infračerveného spektra, jež jsou využitelné pro pozorování:

- 0,22 μm – 1,2 μm (UV, VIS a část SWIR),
- 1,4 μm – 2,4 μm , vyjma 1,8 μm , (SWIR short wave infrared – krátkovlnné infračervené pásmo),
- 3 μm – 5 μm (MWIR medium wave infrared – středněvlnné infračervené pásmo),
- 8 μm – 15 μm (LWIR long wave infrared – dlouhovlnné infračervené pásmo).

V blízkosti mořské hladiny lze přibližně vyjádřit propustnost zemské atmosféry τ_{atmos} , jen s uvažováním vlivu absorpce oxidu uhličitého a vodní páry, jejíž obsah v atmosféře se mění s teplotou a vlhkostí [9]

$$\tau_{\text{atmos}} = \tau_{\text{CO}_2} \cdot \tau_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (2.1)$$

kde

τ_{atmos} propustnost atmosféry,

τ_{CO_2} propustnost CO_2 ,

$\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ propustnost H_2O .

3.3. Vlhkost vzduchu

3.3.1. Absolutní vlhkost ^[9]

Absolutní vlhkost $H_A(t)$ je množství vodní páry obsažené v jednotce objemu atmosféry při určité teplotě t . Obvykle ji vyjadřujeme v $[\text{gm}^{-3}]$. Maximální možné

množství vodní páry v atmosféře označujeme $H_{Asat}(t)$, při teplotě t a mluvíme o stavu saturace (nasyčení).

Níže uvedená tab. 5 obsahuje hodnoty množství vodní páry, v saturovaném vzduchu, pro rozsah teplot -25 °C až $+35\text{ °C}$.

Teplota [°C]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-20	0,89	0,81	0,74	0,67	0,61	0,56				
-10	2,15	1,98	1,81	1,66	1,52	1,40	1,28	1,18	1,08	0,98
-0	4,84	4,47	4,13	3,81	3,52	3,24	2,99	2,75	2,54	2,34
0	4,84	5,18	5,54	5,92	6,33	6,76	7,22	7,70	8,22	8,76
10	9,33	9,94	10,57	11,25	11,96	12,71	13,50	14,34	15,22	16,14
20	17,22	18,14	19,22	20,36	21,5	22,80	24,11	25,49	27,00	28,45
30	30,04	31,70	33,45	35,28	37,19	39,19				

Tab. 5: Množství vodní páry v nasyceném vzduchu [gm^{-3}] [4]

3.3.2. Relativní vlhkost ^[9]

Relativní vlhkost je poměr mezi množstvím vodní páry na jednotku objemu ve vzduchu při určité teplotě a množstvím vodní páry v nasyceném vzduchu při totožné teplotě

$$H_R = \frac{H_A(t)}{H_{Asat}(t)}, \quad (2.2)$$

kde

$H_A(t)$ množství vodní páry ve vzduchu obsažené při teplotě t ,

$H_{Asat}(t)$ maximální množství vodní páry ve vzduchu při teplotě t .

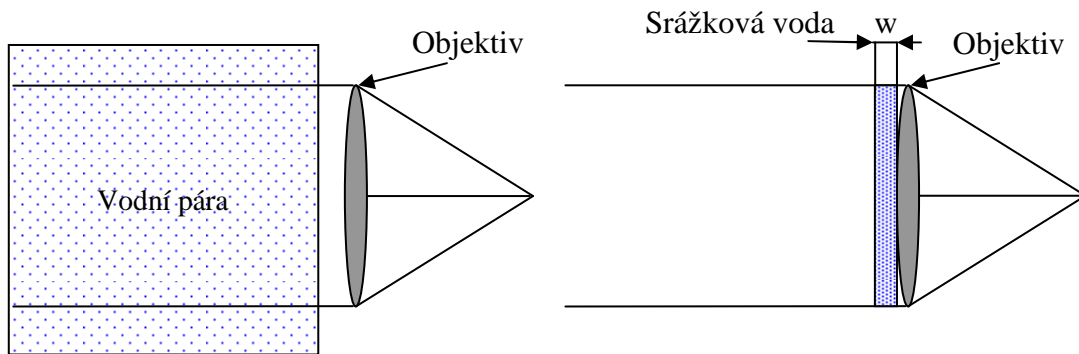
3.4. Srážková voda

Množství vodní páry v atmosféře obsažené napříč dráhou mezi pozorovaným objektem a objektivem pozorovacího přístroje se nazývá srážková voda. Vodní párou je myšlena voda v plynném skupenství. Srážková voda je tedy definována jako tloušťka vrstvy vody, jež by vznikla, kdyby všechna vodní pára mezi cílem a objektivem v atmosféře obsažená byla zhuštěna do tvaru válce, který by měl totožný průměr jako

objektiv. Vodní pára je důležitá zejména z hlediska rozptylu záření na kapkách, ke kterému dochází [9].

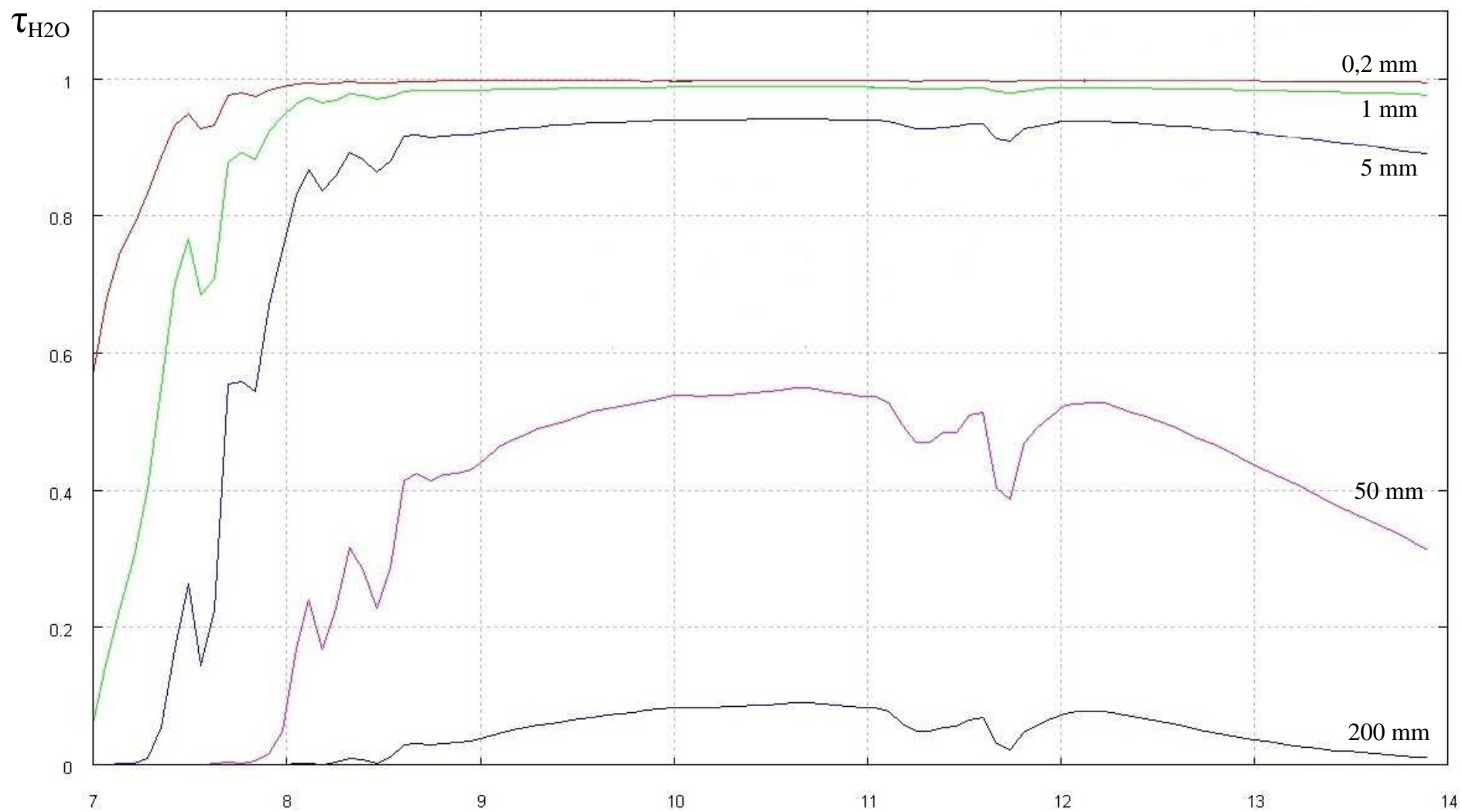
Jinak řečeno, zkapalníme-li všechny vodní páry, které leží mezi pozorovaným objektem a objektivem termovizní kamery, pak množství vysrážené vody vytvoří kapalinu o určité výšce w . Tuto výšku w označujeme jako srážkovou vodu. Její velikost závisí na vzdálenosti od objektivu a absolutní vlhkosti vzduchu. Stav vlhkosti vzduchu můžeme tak vyjádřit velikostí srážkové vody na jednotku délky. Přibližně platí, že absolutní vlhkost v gm^{-3} je rovna srážkové vodě v mm/km .

Pro lepší představu je koncept srážkové vody zobrazen na obr. 17.



Obr. 17: Koncept srážkové vody

Na níže uvedeném grafu (obr. 18) je spektrální propustnost vodní páry v pásmu LWIR, pro různé množství srážkové vody v mm/km . Hodnoty propustnosti vodní páry při různém množství srážkové vody byly převzaty z tabulek uvedených v [3] na straně 150 – 154.



Obr. 18: Spektrální propustnost vodní páry pro různé množství srážkové vody v pásmu LWIR [3]

λ [μm]

3.5. Výpočet srážkové vody ^[9]

Množství srážkové vody w_p je vyjádřeno v milimetrech na metr dráhy a lze vypočítat jako

$$w_p = 10^{-3} H_A(t) = 10^{-3} H_{Asat}(t) \cdot H_R \quad [\text{mm/m}]. \quad (2.3)$$

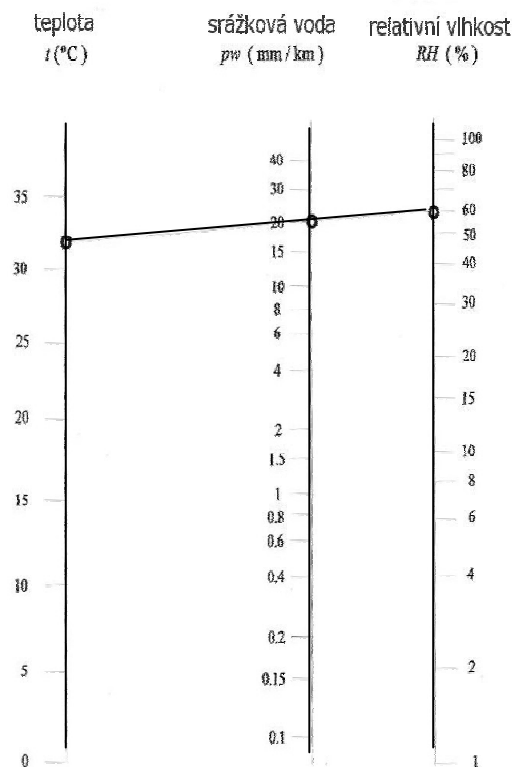
Pro rozsah teplot od 0 °C do 35 °C lze vyjádřit absolutní vlhkost v nasyceném stavu jako

$$H_{Asat} \cong 5,071962 \cdot e^{0,059688t}, \quad (2.4)$$

s maximální odchylkou 5% v celém rozsahu uvedených teplot. Pro dráhu o délce 1 km může být rovnice 2.3 upravena do tvaru

$$w_p = 5,072 \cdot e^{0,0597t} \cdot H_R \quad [\text{mm/km}]. \quad (2.5)$$

Na této rovnici je založen nomogram na obr. 19.



Obr. 19: Nomogram pro určení množství srážkové vody z teploty vzduchu a relativní vlhkosti [9]

Na příkladu zobrazeném na obr. 19 je vidět, že při relativní vlhkosti atmosféry 60% a teplotě 32°C je množství srážkové vody 20mm/km.

Chceme-li zjistit celkovou propustnost v pásmu LWIR pro příklad uvedený na obr. 19, musíme zjistit průměrné propustnosti pro 20mm srážkové vody. Z rozsáhlých tabulek uvedených např. v [3] dostaneme

$$\tau_{\text{H}_2\text{O}} = 0,591.$$

Obdobně z tabulek pro oxid uhličitý dostaneme

$$\tau_{\text{CO}_2} = 0,848.$$

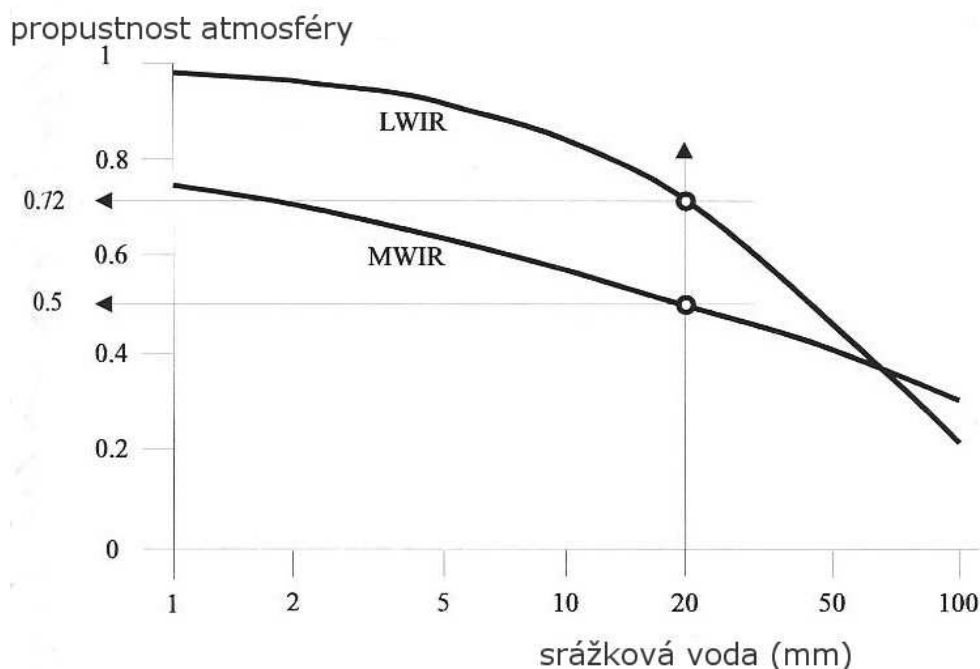
Výsledná propustnost atmosféry, na vzdálenost 1 km blízko hladiny moře, při teplotě 32°C a relativní vlhkosti 60%, pak je přibližně

$$\tau_{\text{atmos}} = 0,848 \times 0,591 \cong 0,50. \quad (2.6)$$

Stejným postupem pro stejnou teplotu i vlhkost vzduchu získáme propustnost na vzdálenost 1 km v pásmu LWIR podstatně lepší

$$\tau_{\text{atmos}} = 0,995 \times 0,723 \cong 0,72. \quad (2.7)$$

Jestliže uvedený postup budeme opakovat pro více hodnot srážkové vody, lze sestavit graf propustnosti atmosféry. Příklad takové závislosti je uveden na obr. 20, který přebírám z [9].



Obr. 20: Propustnost na vzdálenost větší jako 1km pro MWIR a LWIR pásma [9]

3.6. Oblačnost a mlha

3.6.1. Oblak ^[7]

Oblaka, lidově řečeno mraky, jsou v podstatě malé viditelné částice vody, popřípadě ledové krystalky seskupené v atmosféře. Oblak může také obsahovat také částice prachu, případně různých průmyslových zplodin. Oblaky vznikají v důsledku kondenzace nebo sublimace vodní páry v atmosféře. Dotýká-li se oblak povrchu země, pak ho nazýváme mlhou.

3.6.2. Mlha ^[7]

Mlha je definována jako stav v nejnižší vrstvě atmosféry, která je v kontaktu se zemským povrchem, kdy koncentrace vodních kapek, krystalků ledu nebo směsi obojího, je tak velká, že se dohlednost sníží pod 1000 m. Vertikální tloušťka mlhy může být od několika málo metrů až do výšky v řádech stovek metrů. Tvorba mlhy začíná v situaci, kdy v přízemní vrstvě vzduchu dojde ke stavu saturace vodními parami. Tím jsou vytvořeny podmínky pro kondenzaci vodní páry. Rozeznáváme několik druhů mlh:

- radiační – tento druh mlh se tvoří obzvláště v bezoblačném počasí a při velmi slabém větru. Povrch země se v průběhu noci ochlazuje. Od tohoto povrchu se poté ochlazují i přilehlé vrstvy vzduchu. V případě dostatečné vlhkosti vzduchu dojde k vytvoření radiační mlhy. Tyto mlhy se nejčastěji tvoří v nížinách a údolích. Obecně jsou v místech, kam stéká ochlazený vzduch a je značná vlhkost zemského povrchu (lesy, vodní plochy). Tyto mlhy bývají hlavně lokálního charakteru. V důsledku působení větru se však mohou přesouvat na značné vzdálenosti.
- advekační – tyto mlhy vznikají v okamžiku, kdy se vlhký a teplý vzduch proudící od oceánu dostane nad ochlazený zemský povrch. Tento druh mlh bývá velmi plošně rozsáhlý, většinou mívá dlouhého trvání a dosahuje do značných výšek (několik stovek metrů). Často jsou tyto mlhy doprovázeny mrholením.
- frontální – tyto mlhy vznikají v důsledku zvýšení vlhkosti vzduchu v oblasti frontálních srážek, nebo poklesem oblačnosti až na povrch zemský.
- orografické – příčinou vzniku toho druhu mlh je stoupání vzduchu na návětrné straně např. horské překážky. Při tomto jevu dochází ke kondenzaci vodní páry. Tyto mlhy mohou na návětrné straně setrvávat i několik dní.

- mlhy v důsledku vypařování – tento druh mlh vzniká nad velkými vodními plochami, v důsledku vypařování teplejší vody z povrchu do chladného vzduchu.

3.7. Rozptyl záření

V případě, že bychom atmosféru považovali za ideální, neobsahovala by žádné částice a byla by dokonale čistá. Nedochovalo by k rozptýlení procházejícího záření. Ovšem v praxi se s touto situací nesetkáme. Proto musíme uvažovat s vlivem prachu a vody na průchod záření atmosférou. Právě díky těmto vlivům lze spatřit a vysvětlit pozoruhodné atmosférické jevy, jako modrou barvu oblohy, červenou barvu při západu slunce a také bílou barvu mraků.

3.7.1. Reyleighův rozptyl ^[23]

K tomuto rozptylu, který popsal v roce 1899 anglický fyzik J.W.Rayleigh, dochází na molekulách plynu, resp. vzduchu o velikosti menší než je vlnová délka záření. Někdy je tento druh rozptylu záření také nazýván jako molekulární. Rayleigh zjistil, že poměr intenzity rozptýleného světla ku intenzitě dopadajícího světla je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky, tedy

$$\frac{I_s}{I_0} = \frac{\text{konst.}}{\lambda^4}, \quad (2.8)$$

kde je

I_s	Intenzita rozptýleného světla,
I_0	Intenzita dopadajícího světla,
λ	Vlnová délka záření.

Z tohoto důvodu je v atmosféře nejvíce rozptylováno záření krátkých vlnových délek. Tento druh rozptylu je zodpovědný za modrou barvu oblohy.

3.7.2. Mieho rozptyl ^[24]

Tento druh rozptylu objevil německý fyzik Gustav Mie. Někdy je také nazýván jako Mieho teorie nebo Lorenz-Mieho teorie. Ludvig Lorenz byl dánský fyzik, který se zabýval průchodem záření atmosférou. K tomuto druhu rozptylu záření dochází na částicích o velikosti větší, než je vlnová délka záření (např. prachové částice, kapičky vody). U tohoto rozptylu jsou všechny vlnové délky rozptylovány stejnou měrou. Z toho důvodu jsou oblaka, což jsou v podstatě shluky kapiček vody, bílá.

3.8. Simulace průchodu záření atmosférou

3.8.1. libRadtran verze 1.6

Program libRadtran je program určený k simulaci průchodu záření zemskou atmosférou. Je to v podstatě balík menších programů, spojený s rozsáhlými knihovnami dat. Centrální je tzv. uvspec, jenž slouží k simulaci přenosu záření. Tento účel usnadňují tzv. knihovny obsahující informace o jednotlivých prvcích, ovlivňujících záření při průchodu atmosférou. Program samozřejmě umožňuje uživateli vytvořit si vlastní prvky a definovat jejich vlastnosti. Například: vytvořit si vlastní oblak, určit výšku v jaké se nachází, jeho tloušťku, množství vody v něm obsažené, velikost vodních kapek apod. Tento program je výhodné používat v kombinaci s editorem grafů pro usnadnění práce. V tomto případě jsem zvolil program gnuplot s textovým editorem, např. gvim, jenž je součástí operačního systému Linux. Detailní popis k tomuto programu je uveden v [22].

Program libRadtran vyžaduje vytvoření zdrojového souboru, kde si uživatel definuje vlastnosti atmosféry. Bližší popis těchto úkonů je tak obsáhlý, že již přesahuje rámec této bakalářské práce. Funkce tohoto programu mohou být využity některým z budoucích řešitelů problematiky přenosu záření atmosférou.

3.8.1. Příklady simulace v programu libRadtran

Z důvodů absence mlh byl použit program libRadtran ke zjištění, jak se chová záření při průchodu zemskou atmosférou za různých podmínek.

Pro všechny následně uvedené grafy simulací platí:

- červená křivka – sluneční radiace před vstupem do atmosféry.
- zelená křivka – sluneční radiace přímo dopadající na povrch země po vlivu nastavených parametrů (rozptyl, absorpce, atd.).
- modrá křivka – sluneční radiace dopadající na povrch země nepřímo (rozptýlená).

Simulace č.1:

Při této simulaci byl aktivní vliv absorpce, rozptylu, Reyleighova rozptylu v atmosféře a viditelnost byla nastavena na 20 km. Na obr. 21 je sluneční radiace před a po průchodu zemskou atmosférou. Pro představu čtenáře uvádím příklad naprogramované simulace se stručným popisem:

```

atmosphere_file ../data/atmmod/afglus.dat      # Soubor s definicí atmosféry
solar_file ../data/solar_flux/NewGuey2003.dat  # Soubor s definicí záření

albedo 0.2                                     # Míra odrazivosti zemského povrchu
sza 30.0                                       # Zenitový úhel slunce
rte_solver twostr                              # Rovnice přenosu záření
wavelength 250.0 15000.0 # Rozsah vlnových délek záření v nm
correlated_k LOWTRAN # Druh výpočtu LOWTRAN
#no_scattering                                # Aktivní vliv rozptylu záření
#no_rayleigh                                  # Aktivní Reyleighův rozptyl záření
aerosol_default                                # Druh aerosolu
aerosol_visibility 20                          # Viditelnost km
quiet                                          # Konec programu

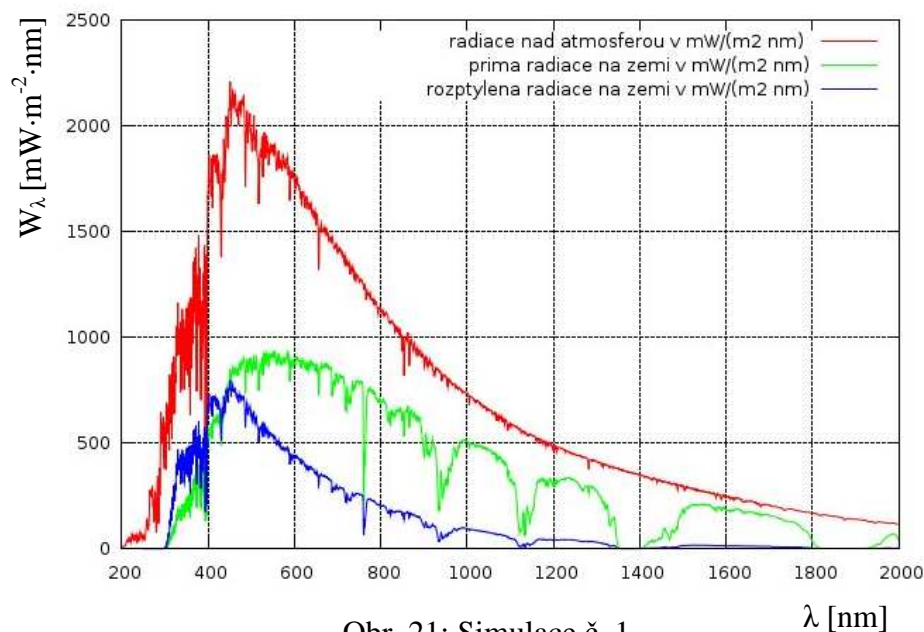
```

Následně, po tom co program libRadtran provede výpočtové operace, lze např. pomocí programu Gnuplot sestavit graf. Pro představu uvádím příkaz pro vykreslení následujícího grafu:

```

plot [200:2000] "NewGuey2003.dat" using 1:2 with line title "radiace nad
atmosferou v mW/(m2 nm) ", \ "pr1.out" using 1:2 with line title "prima radiace na zemi
v mW/(m2 nm)", \ "pr1.out" using 1:3 with line title "rozptylena radiace na zemi v
mW/(m2 nm)".

```

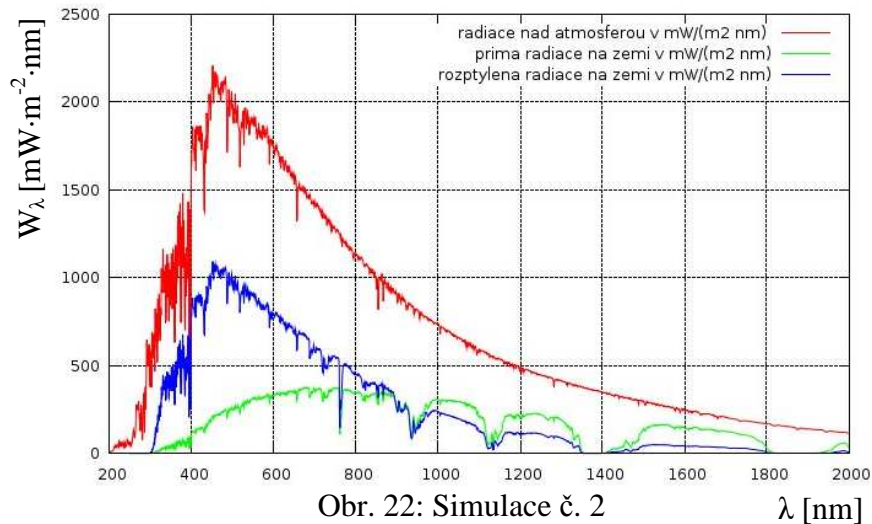


Obr. 21: Simulace č. 1

Na zelené křivce grafu lze pozorovat místa, kde částice vody obsažené v atmosféře výrazně snižují propustnost slunečního záření. Z grafu jako celku je také patrné, že atmosféra je nejvíce propustná pro viditelné spektrum vlnových délek.

Simulace č.2:

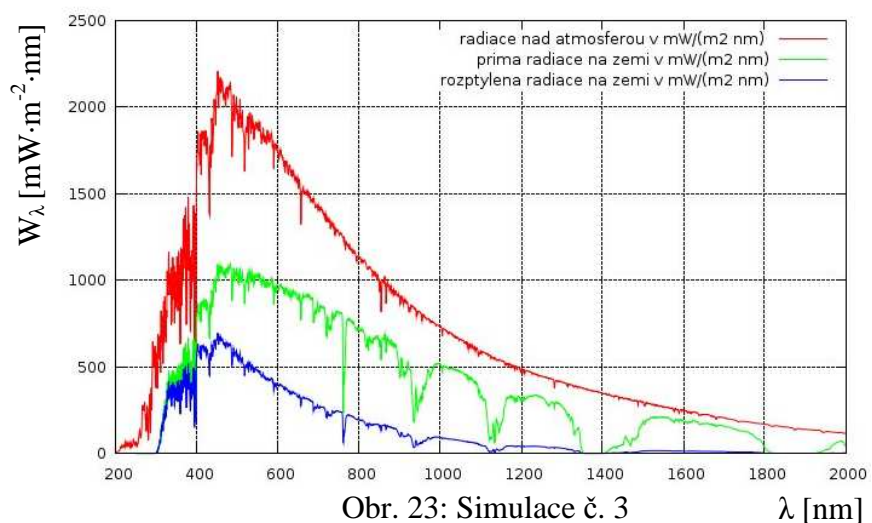
Při této simulaci byl aktivní vliv absorpce, rozptylu, Reyleighova rozptylu v atmosféře a viditelnost byla nastavena na 5 km. Na obr. 22 je sluneční radiace před a po průchodu zemskou atmosférou.



V grafu lze pozorovat výrazný pokles záření přímo dopadajícího na povrch vlivem aerosolů a naopak nárůst rozptýleného záření.

Simulace č.3:

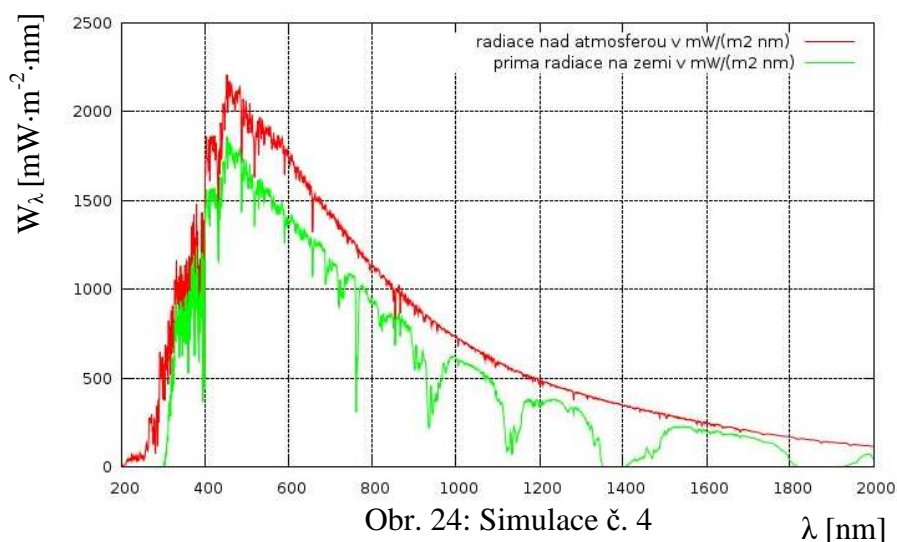
Při této simulaci byl aktivní vliv absorpce a rozptylu. Reyleighův rozptyl v atmosféře nebyl uvažován a viditelnost byla nastavena na 20 km. Na obr. 23 je sluneční radiace před a po průchodu zemskou atmosférou.



V grafu lze pozorovat pokles rozptýleného záření a nárůst záření přímo dopadajícího na povrch.

Simulace č.4:

Při této simulaci byl aktivní pouze vliv absorpce. Rozptyl v atmosféře nebyl uvažován a viditelnost byla nastavena na 20 km. Na obr. 24 je sluneční radiace před a po průchodu zemskou atmosférou. Rozdíl mezi červenou a zelenou křivkou způsobila absorpce v atmosféře.

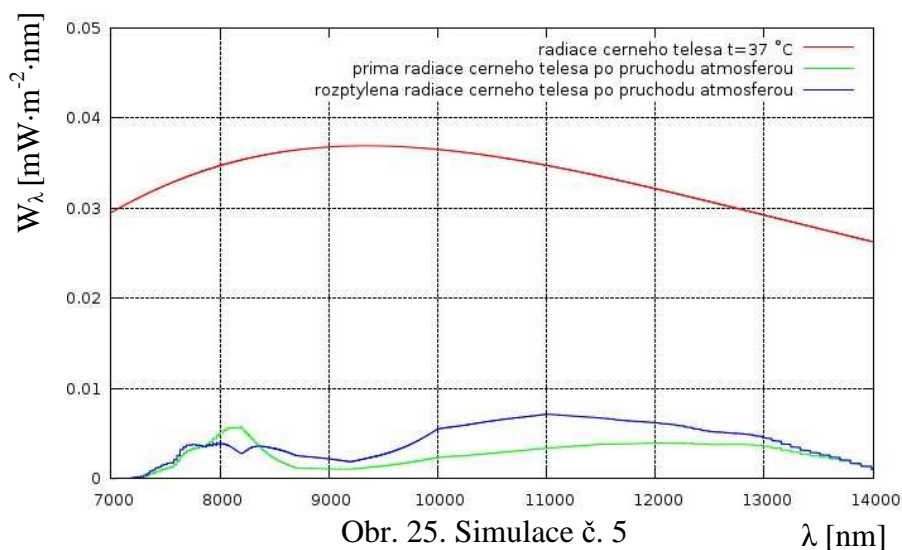


Obr. 24: Simulace č. 4

λ [nm]

Simulace č.5:

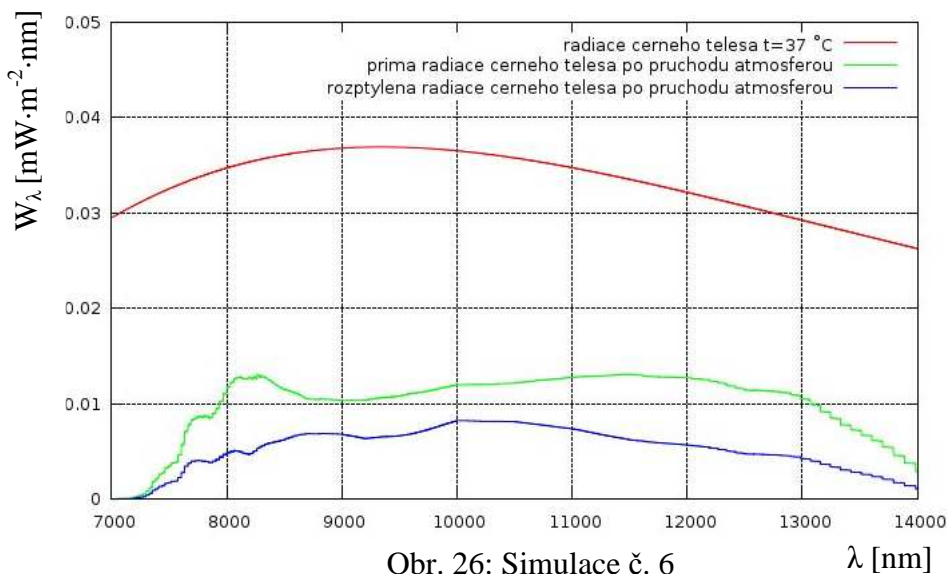
Při této sérii simulací byl aktivní vliv absorpce, rozptylu, Reyleighova rozptylu v atmosféře a viditelnost byla měněna v rozsahu od 0,1 km do 1 km. Grafy jsou vykresleny pro pásmo LWIR. Na obr. 25 je radiace černého tělesa o teplotě 37 °C před a po průchodu zemskou atmosférou, při viditelnosti 0,1 km.



Obr. 25. Simulace č. 5

λ [nm]

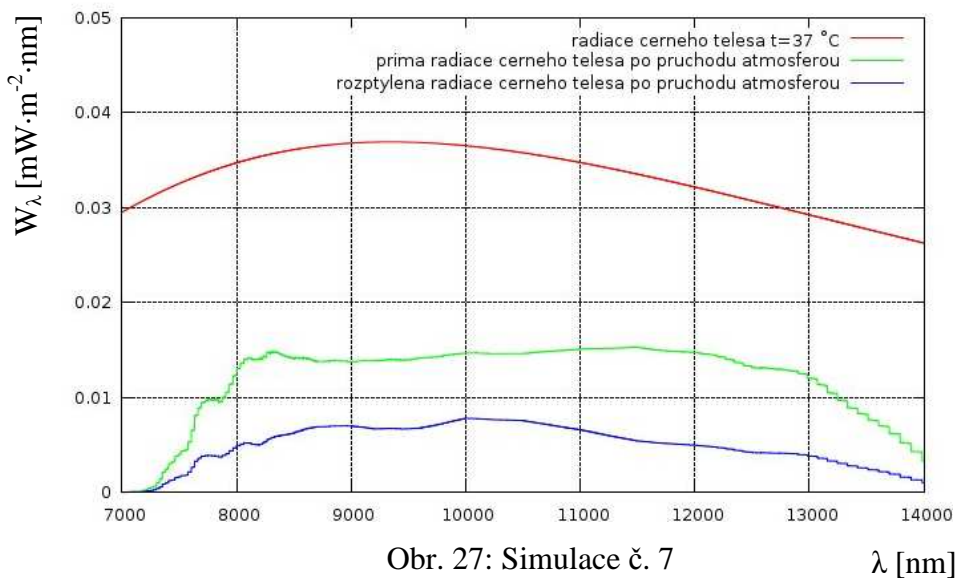
Na obr. 26 je radiace černého tělesa o teplotě 37 °C před a po průchodu zemskou atmosférou, při viditelnosti 0,5 km.



Obr. 26: Simulace č. 6

λ [nm]

Na obr. 27 je radiace černého tělesa o teplotě 37 °C před a po průchodu zemskou atmosférou, při viditelnosti 1 km.



Obr. 27: Simulace č. 7

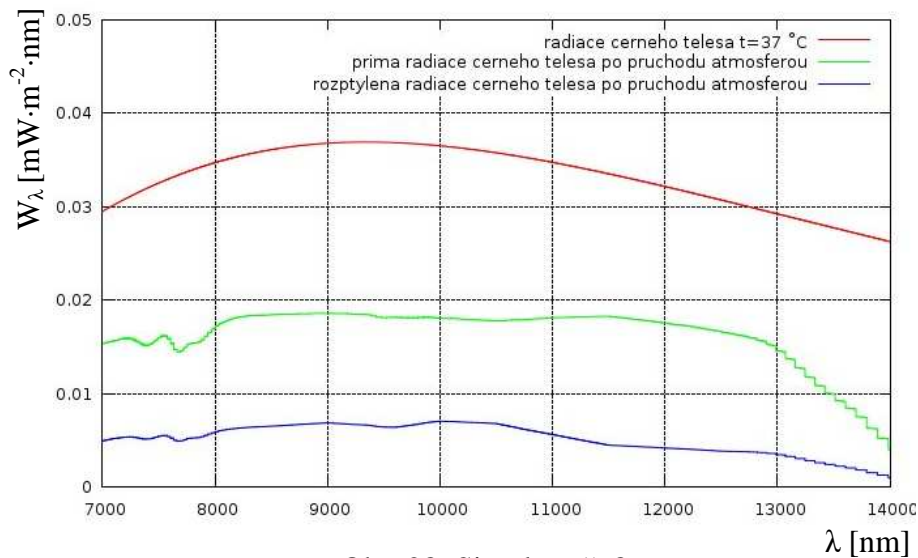
λ [nm]

Na předchozích třech grafech (obr 25, 26 a 27) je patrný vzestup spektrální intenzity záření, které prošlo atmosférou se vzrůstající viditelností. Při této simulaci byl použit naprogramovaný vodní mrak o tloušťce 50 m, ve výšce 450 m. Voda v něm obsažená byla nastavena na 1 gm^{-3} a velikost vodních kapek na $20 \mu\text{m}$.

Simulace č.6:

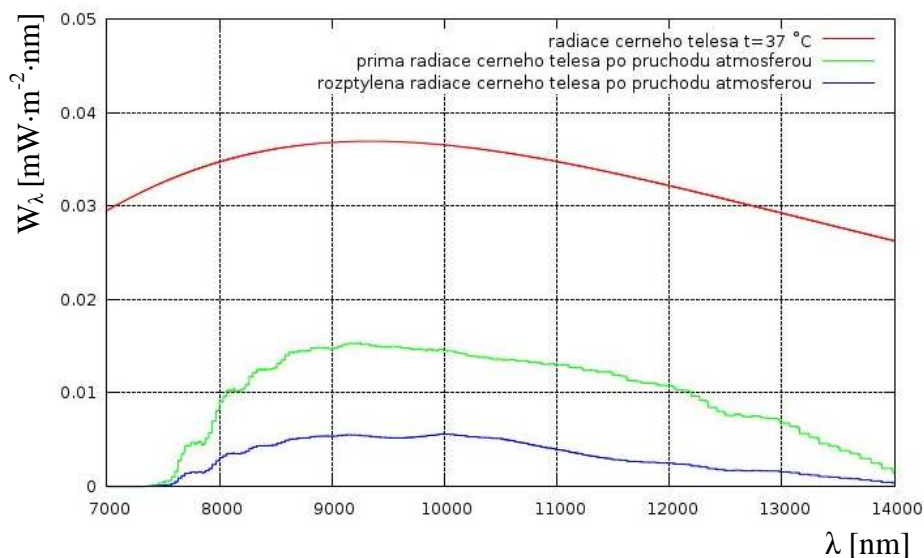
Při této sérii simulací byl aktivní vliv absorpce, rozptylu, Reyleighova rozptylu v atmosféře a viditelnost byla nastavena na 20 km. Novým parametrem se stalo množství srážkové vody v mm/km. Při této sérii simulací byl naprogramovaný vodní mrak, kterému byla zadána výška 450 m, v níž se nachází, a tloušťka 50 m. Voda v něm obsažená byla nastavena na $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ a velikost vodních kapek na $20 \text{ }\mu\text{m}$. Grafy jsou vykresleny pro pásmo LWIR.

Na obr. 28 je radiace černého tělesa o teplotě $37 \text{ }^\circ\text{C}$ před a po průchodu zemskou atmosférou při množství srážkové vody 0 mm/km .



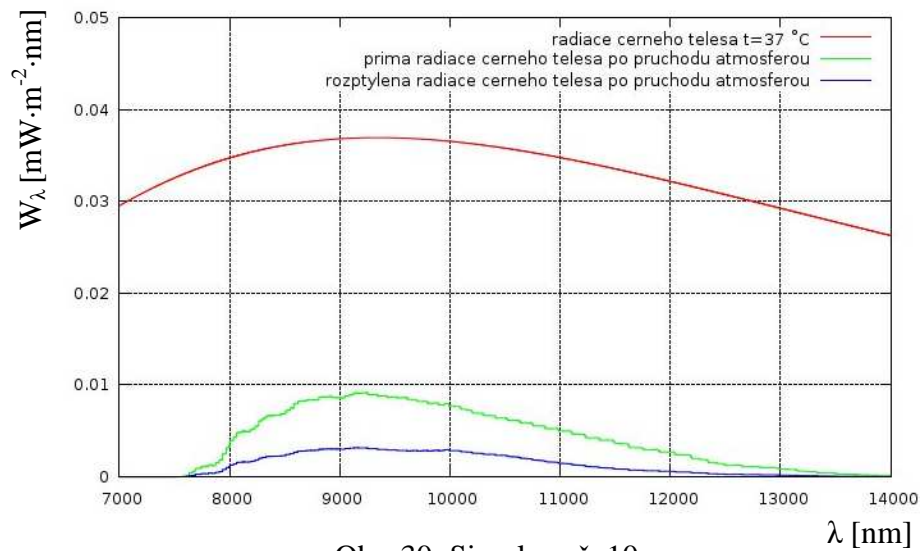
Obr. 28: Simulace č. 8

Na obr. 29 je radiace černého tělesa o teplotě $37 \text{ }^\circ\text{C}$ před a po průchodu zemskou atmosférou při množství srážkové vody 10 mm/km .



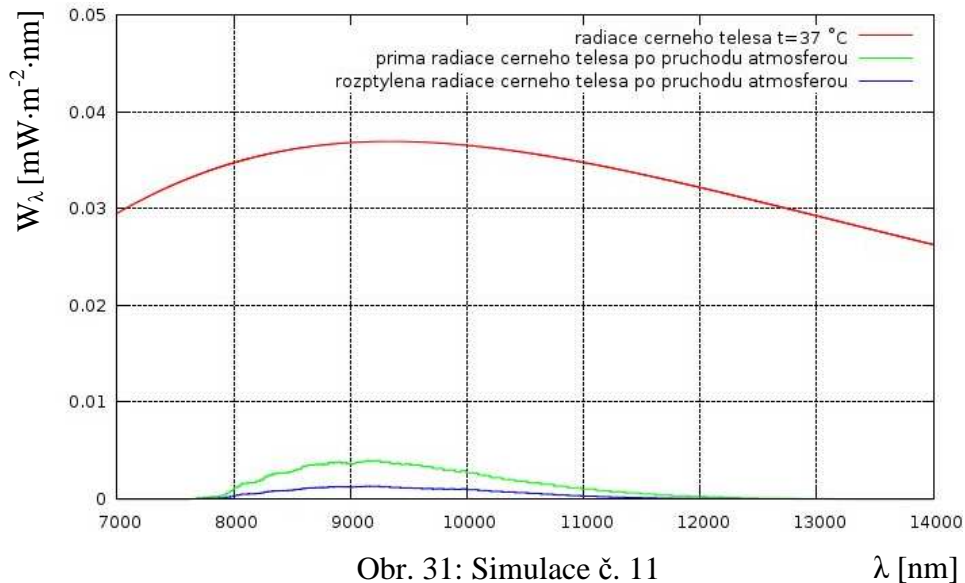
Obr. 29: Simulace č. 9

Na obr. 30 je radiace černého tělesa o teplotě 37 °C před a po průchodu zemskou atmosférou při množství srážkové vody 20 mm/km.



Obr. 30: Simulace č. 10

Na obr. 31 je radiace černého tělesa o teplotě 37 °C před a po průchodu zemskou atmosférou při množství srážkové vody 30 mm/km.



Obr. 31: Simulace č. 11

Z výše uvedených grafů (obr.28, 29, 30 a 31) je patrný výrazný pokles spektrální intenzity záření, které prošlo atmosférou, se vzrůstajícím množstvím srážkové vody. Projevuje se silná absorpce vody pro vlnové délky pásma LWIR.

4. Kvalitativní parametry termovizních systémů

4.1. Parametry termovizních kamer Thermal Eye

Pro svá měření jsem měl k dispozici dvě termovizní kamery, a to Thermal Eye X-50, jež patří Univerzitě Palackého v Olomouci a Thermal Eye X-200, jejímž vlastníkem je firma Pramacom, spol. s.r.o. Parametry těchto kamer jsou uvedeny v tabulce 6.



Obr.32: Thermal Eye X-50 [20]



Obr. 33: Thermal Eye X-200 [21]

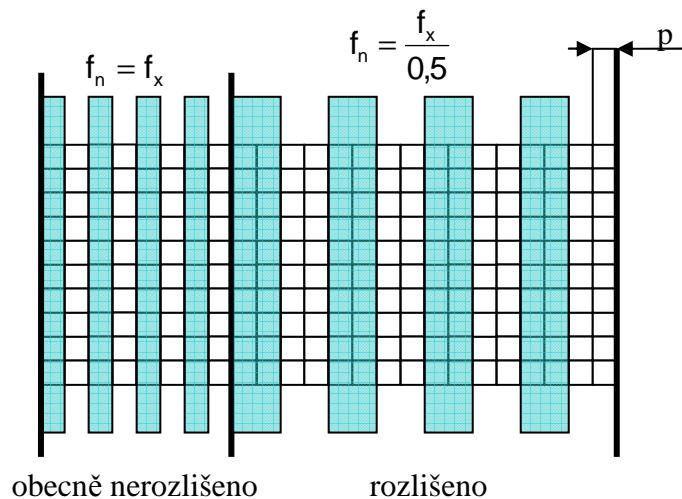
		X-50	X-200
Infračervený detektor	Detektor	Amorfní křemík	Amorfní křemík
	Počet pixelů	100 x 80	160 x 120
	Spektrální pásmo	7 – 14 μm	7 – 14 μm
	Teplotní citlivost	$\leq 150 \text{ mK}$	$\leq 50 \text{ mK}$
Zobrazení	Startovací čas	5 s	4 s
	Odhalení lidské aktivity	305 m	450m
	Kontrast / Jas	Automaticky	Automaticky
	Polarita	Bílá = teplá	Bílá = teplá
Optika	Ohnisková vzdálenost	16mm	25mm
	Zorné pole	11° x 8°	11° x 8°
	Min. zaostřitelná vzdálenost	1m	1m
Video	Video výstup	NTSC	PAL
	Displej	Monochromatický LCD 320 x 240	Monochromatický LCD 320 x 240
Napájení	Baterie	2 x AA	2 x AA
	Výdrž	2 hod. alkalické baterie 5 hod. lithiové baterie	2,5 hod. alkalické baterie 6 hod. lithiové baterie
Parametry prostředí	Operační teplota	- 10°C až + 50°C	- 20°C až + 60°C
	Vodotěsnost	3m (plave na vodě)	3m (plave na vodě)
Fyzické parametry	Rozměry	13,4 x 11,4 x 5,1 cm	13,4 x 11,4 x 5,1 cm
	Váha	381 g včetně baterií	381 g včetně baterií

Tab. 6: Parametry termovizních kamer Thermal Eye [19], [20]

4.2. Parametry, které výrobce neuvádí

4.2.1. Nyquistova frekvence

Aby bylo možné správně rozlišit čárovou strukturu, je nutné, aby každá jedna čára (dvojčára) testového obrazce připadala na min. dva pixely snímacího čipu. Názorné vysvětlení poskytuje obr. 34.



Obr. 34: Podmínky rozlišení čárového testu

Nyquistova frekvence je definována jako nejvyšší možná frekvence, již je systém schopen zobrazit. Její velikost je poloviční oproti vzorkovací frekvenci. Je dána velikostí pixelu snímacího čipu. Vztah pro výpočet je

$$f_n = \frac{1}{2p}, \quad (3.1)$$

kde

p – velikost pixelu.

4.2.2. Teoretický dosah termovizního systému

Následující příklad výpočtu dosahu systému je uveden pro termovizní kameru Thermal Eye X – 50. Mezery mezi jednotlivými pixely zanedbáváme.

Dosah vidění lze zjistit i teoretickým výpočtem. Stěžejní parametry pro jeho zjištění jsou počet pixelů snímacího čipu - 100 x 80, velikost zorného pole - 11° x 8° a ohnisková vzdálenost - 16mm, jak uvádí tab. 6. Nejprve musíme zjistit, jaký úhel α_{pix} zorného pole připadá na jeden pixel

$$\alpha_{\text{pix}} = \frac{11^\circ}{100} = 6,6' . \quad (3.2)$$

Následně můžeme dosadit do vzorce pro výpočet Nyquistovy frekvence

$$f_n = \frac{1}{2p} = \frac{1}{2 \cdot 6,6'} = 0,075 \frac{\text{č}}{[']}. \quad (3.3)$$

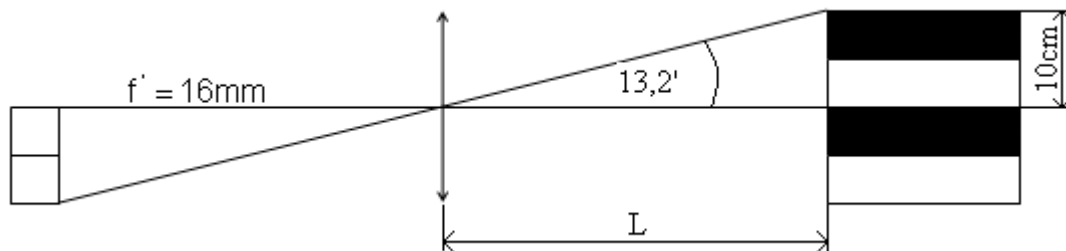
Je-li velikost jedné čáry (dvojčáry) sestrojeného Jonhnsonova testu 10 cm, můžeme dosadit do vzorce pro výpočet mezní vzdálenosti

$$L_M = \frac{0,1}{2 \cdot 6,6' \cdot 2,909 \cdot 10^{-4}} = 26,04 \text{ m} . \quad (3.4)$$

Parametry použité při výpočtu a hodnoty pro obě použité termovizní kamery jsou uvedeny v následující tabulce

	X-50	X-200
Počet pixelů sním. čipu	100x80	160x120
Zorné pole	11°x8°	11°x8°
Úhel pro 1 pixel	6,6'	4,1'
F_N	0,075 $\frac{\text{č}}{[']}$	0,122 $\frac{\text{č}}{[']}$
L_M	26,04 m	41,92 m

Tab. 7: Vypočítané hodnoty teoretického dosahu systému



Obr. 35: Nákras výpočtu velikosti pixelu

Vypočítané hodnoty mezní vzdálenosti jsou však v praxi nedosažitelné. Uváděný výpočet nezahrnuje vliv optických aberací, vliv vody obsažené v atmosféře a tedy rozptyl, k němuž dochází. Praktické měření v neposlední řadě také ovlivňuje samotný pozorovatel.

5. Praktické měření

5.1. Použité přístroje

V průběhu celého praktického měření jsem kromě dvou termovizních kamer Thermal Eye používal ještě řadu pomocných přístrojů pro měření vzdálenosti, teploty nebo parametrů vzduchu.

5.1.1. Laserový dálkoměr Disto D5

Tento laserový dálkoměr americké společnosti Leica Geosystems jsem používal pro určení vzdálenosti mezi termovizní kamerou a cílovým testovým obrazcem. Jeho použití však bylo možné pouze v laboratoři z důvodu, že stopa laserového svazku nebyla v terénu, na vzdálenost větší jak 10m, vidět.



Obr. 36: Disto D5 [17]

5.1.2. Laserový dálkoměr TruPulse 200

Tento laserový dálkoměr americké společnosti Laser Technology jsem používal k určení vzdálenosti mezi termovizní kamerou a pozorovaným testovým obrazcem pouze mimo laboratoř. Lze s ním snadno měřit i na vzdálenost 70 m za libovolných podmínek.



Obr. 37: TruPulse 200 [16]

5.1.3. Bezkontaktní teploměr Fluke 574

Tento bezkontaktní teploměr od americké společnosti Fluke jsem používal zejména pro pohodlné měření teploty topných desek Johnsonova testu a také teploty čárového testu. Tyto hodnoty jsem potřeboval pro určení teplotní difference. Při práci s jmenovaným přístrojem jsem se setkal s problémem, kdy při opakovaných měřeních téhož objektu bezprostředně za sebou naměřil přístroj několik hodnot s odchylkou i 1 - 2°C. Pro objektivní určení teploty jsem tedy vždy provedl alespoň 5 – 10 měření a poté jsem dále pracoval s jejich průměrnou hodnotou.



Obr. 38: Fluke 574 [13]

5.1.4. Kontaktní teploměr GMH 3750

Tento kontaktní teploměr od německé společnosti Greisinger electronic GmbH jsem používal pro občasné kontrolní měření topných desek a čárového testu. Naměřená hodnota sloužila zejména ke srovnání s teplotou naměřenou bezkontaktní teploměrem Fluke 574.



Obr. 39: GMH 3750 [15]

5.1.5. Kestrel 4500NV

Tento přístroj americké společnosti Nielsen Kellerman jsem používal k určení teploty a relativní vlhkosti vzduchu.

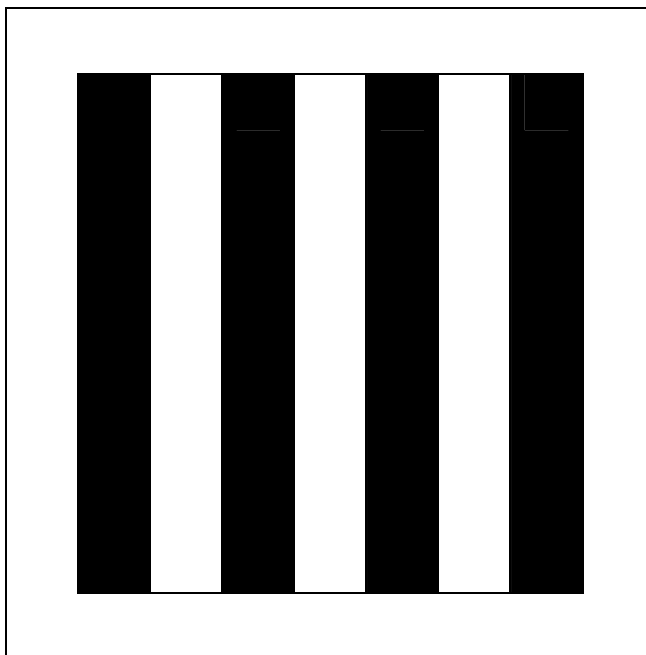


Obr. 40: Kestrel 4500NV [18]

5.2. Měření MRTD na vzdálenost 1 m

5.2.1. Definice MRTD

MRTD (minimum resolvable temperature difference) je minimální rozlišitelný teplotní rozdíl, který umožňuje pozorovateli rozeznat detaily na infračerveném obraze objektu. Je vždy vztažen k určité prostorové frekvenci. K jeho stanovení se využívá zkušební obrazec podle daného kritéria. MRTD je funkcí prostorové frekvence zkušebního obrazce, resp. vzdálenosti, ze které je obrazec o konstantní frekvenci pozorován. Závisí na teplotě zkušebního obrazce a může záviset také na orientaci zkušebního obrazce [1].



Obr. 41: Použitý testový obrazec

5.2.2. Podmínky měření

Český obranný standard [1] definuje pro měření minimálního rozlišitelného teplotního rozdílu několik následujících podmínek:

- pozorovatel musí mít výborný zrak (používá-li brýle, musí být přesnost korekce zraku lepší než $\pm 0,25$ dioptrie) a musí být s tímto způsobem měření již seznámen.
- prostorová frekvence měřícího obrazce musí být v rozsahu $\pm 5\%$ jmenovité hodnoty.
- černé těleso a zkušební obrazec musí mít emisivitu minimálně 0,95.
- černé těleso musí umožnit nastavení teplotní difference ± 10 °C.
- nerovnoměrnosti rozložení teploty v pozorované oblasti testového obrazce musí být nedetekovatelné.
- při měření může pozorovatel manipulovat se změnou úrovně osvětlení v místnosti, nebo pohybovat termovizní kamerou za účelem kvalitnějšího sledování obrazu na displeji.

5.2.3. Postup měření

- 1) Teplotní difference mezi černým tělesem a čárovým testem je nastavena tak, aby čárový test nebylo možné rozeznat.
- 2) Zvyšuje se teplotní difference a to po krocích velikosti 0,01 °C.
- 3) V okamžiku, kdy je pozorovatel schopen rozeznat čárovou strukturu testového obrazce, je zaznamenána hodnota ΔT_+ .
- 4) Sníží se teplotní difference zpět na hodnotu, kdy čárový test nelze rozeznat.
- 5) Snižuje se teplotní difference a to po krocích velikosti 0,01 °C.
- 6) V okamžiku, kdy je pozorovatel schopen rozeznat čárovou strukturu testového obrazce, je zaznamenána hodnota ΔT_- .
- 7) Z naměřených hodnot je dopočítána výsledná MRTD.

Při tomto měření byla termovizní kamera umístěna na statickém stojanu ve vzdálenosti 1 m od černého tělesa a připojena k přenosnému počítači, jenž umožňoval záznam snímků důležitých krajních hodnot.

5.2.4. Thermal Eye X-50

Cílem tohoto, v pořadí prvního měření, bylo zjistit MRTD termovizní kamery Thermal Eye X - 50 na vzdálenost 1 m. Při tomto měření jsem se seznamoval s obsluhou řídicí jednotky černého tělesa a také samotné termovizní kamery. Teplota okolního prostředí byla měřena přímo řídicí jednotkou černého tělesa. Nejprve jsem nastavil teplotní diferenci na hodnotu, kdy nebylo možné rozeznat strukturu čárového testu. V tomto případě to byla přímo hodnota 0 °C, jak lze pozorovat na obr. 42. Následně jsem zvyšoval teplotu černého tělesa oproti čárovému testu. Hledal jsem hodnotu, kdy budu schopen rozlišit testový obrazec. Po záznamu snímku při této krajní hodnotě +0,25 °C, jež je na obr. 44 a zapsání zjištěné teplotní difference, jsem postup opakoval při snižování teplotní difference do záporných hodnot. Načež jsem pořídil snímek uvedený na obr. 43 s krajní hodnotou záporné teplotní difference -0,31 °C. Pro přehlednost jsou výsledky měření zobrazeny v tab. 8. Pro srovnání uvádím ještě obr. 45 a obr. 46, kde je teplotní difference nastavena tak, že čárová struktura testu je jasně patrná - a to na -0,4 °C a +0,4 °C.

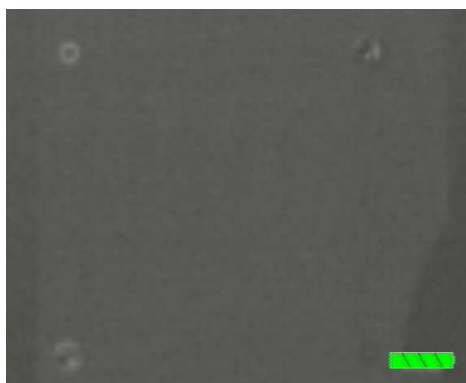
Při tomto měření byla teplota okolí $t = 25,18 \text{ °C}$

Vzdálenost	ΔT_+	ΔT_-	MRTD
1m	0,2 °C	-0,31 °C	0,25 °C

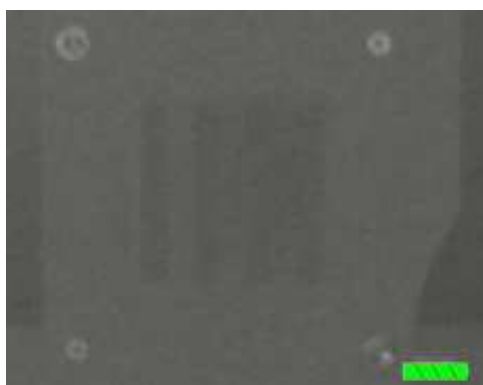
Tab. 8: Naměřené hodnoty

Výpočet :

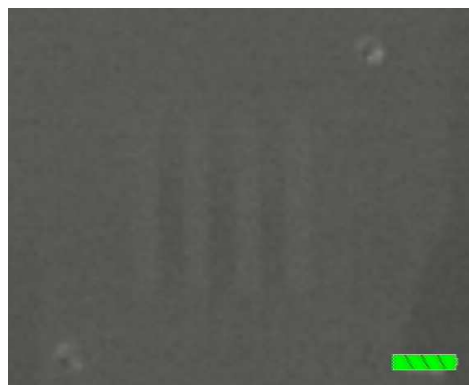
$$\text{MRTD} = \left| \frac{\Delta T_+ - \Delta T_-}{2} \right| = \left| \frac{0,2 - (-0,31)}{2} \right| = 0,25 \text{ °C}$$



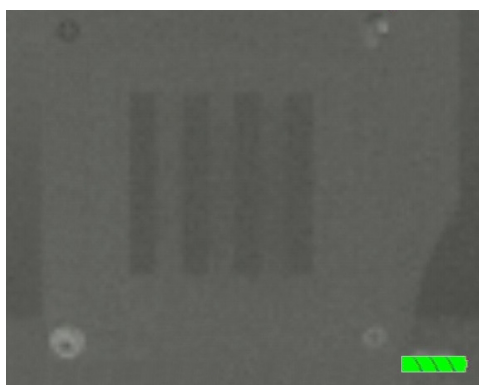
Obr. 42: Teplotní difference 0 °C



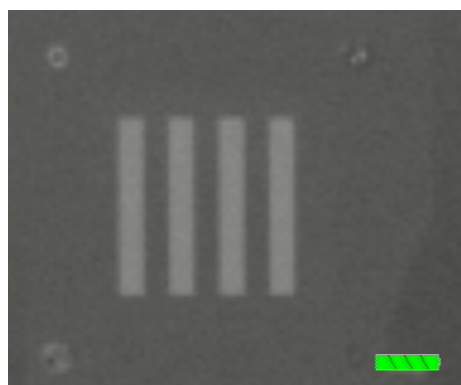
Obr.43: Teplotní diference $-0,31\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr. 44: Teplotní diference $+0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr.45: Teplotní diference $-0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$



Obr.46: Teplotní diference $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.2.5. Thermal Eye X-200

Při tomto měření jsem zjišťoval MRTD termovizní kamery Thermal Eye X - 200 na vzdálenost 1 m. Teplota okolního prostředí byla měřena přímo řídicí jednotkou. Nejprve jsem nastavil teplotní diferenci na hodnotu, kdy nebylo možné rozeznat strukturu čárového testu. V tomto případě to byla teplota $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, jak lze pozorovat na obr. 47. Je patrné, že teplota, při níž nelze testový obrazec rozeznat, se mění s teplotou okolního prostředí. Další postup byl stejný jako při předchozím měření. Začal jsem zvyšovat teplotu černého tělesa oproti čárovému testu. Hledal jsem hodnotu, kdy budu schopen rozlišit testový obrazec. Po záznamu snímku při této krajní hodnotě $+0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, jenž je na obr. 49, a zapsání zjištěné teplotní diference jsem postup opakoval při snižování teplotní diference do záporných hodnot. Následně jsem pořídil snímek, uvedený na obr. 48, s krajní hodnotou záporné teplotní diference $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pro přehlednost jsou výsledky měření zobrazeny v tab. 9. Pro srovnání uvádím ještě obr. 51 a obr. 50, kde je teplotní diference nastavena tak, že čárová struktura je jasně patrná a to na $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

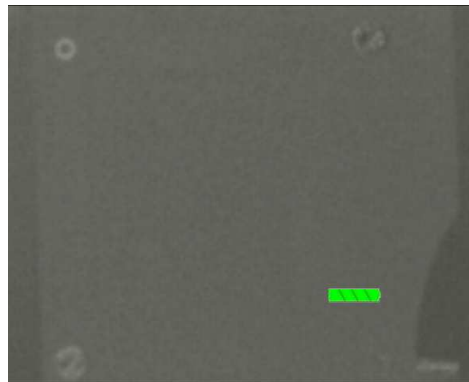
Při tomto měření byla teplota okolí $t = 22,83 \text{ }^\circ\text{C}$

Vzdálenost	ΔT_+	ΔT_-	MRTD
1m	0,2 $^\circ\text{C}$	0,02 $^\circ\text{C}$	0,09 $^\circ\text{C}$

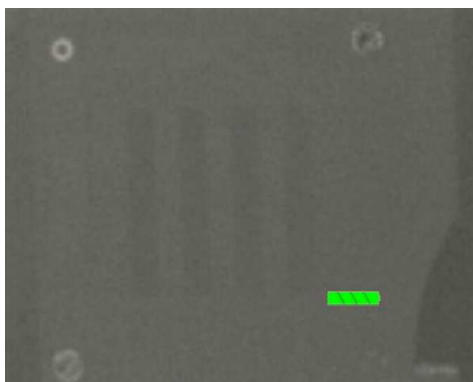
Tab. 9: Naměřené hodnoty

Výpočet :

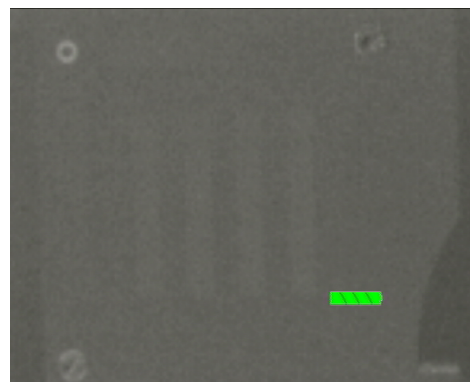
$$\text{MRTD} = \left| \frac{\Delta T_+ - \Delta T_-}{2} \right| = \left| \frac{0,2 - (0,02)}{2} \right| = 0,09 \text{ }^\circ\text{C}$$



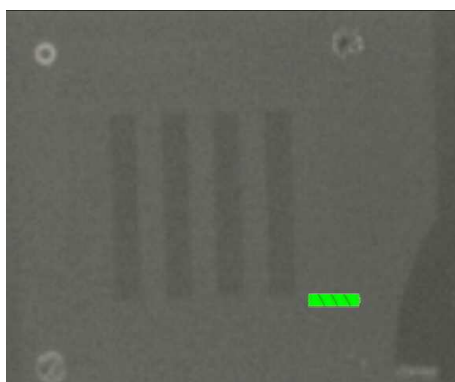
Obr. 47: Teplotní difference 0,1 $^\circ\text{C}$



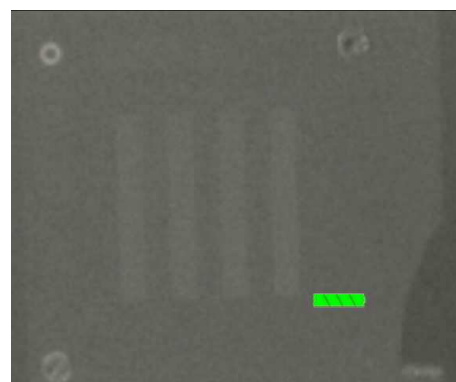
Obr. 48: Teplotní difference 0,02 $^\circ\text{C}$



Obr. 49: Teplotní difference 0,2 $^\circ\text{C}$



Obr. 50: Teplotní difference -0,1 $^\circ\text{C}$



Obr. 51: Teplotní difference 0,3 $^\circ\text{C}$

5.3. Měření dosahu systému v laboratorních podmínkách

Cílem tohoto měření bylo zjistit dosah typu identifikace termovizních kamer Thermal Eye X-50 a X-200 pro teplený test typu člověk. Dosahem se rozumí maximální vzdálenost, na kterou ještě lze rozpoznat čárovou strukturu testového obrazce. Celé měření probíhalo v laboratoři firmy Pramacom. V průběhu měření byla kamera umístěna na statickém stojanu, z důvodů eliminace třesu lidské ruky, a připojena k přenosnému počítači, jenž umožňoval záznam snímků. Teplota okolí a relativní vlhkost vzduchu byla měřena přístrojem Kestrel 4500NV, teplota čárového testu bezkontaktním teploměrem Fluke 574. Tímto přístrojem byla měřena i teplota topných desek.

5.3.1. Thermal Eye X-50 při vypnutém ohřevu topných desek

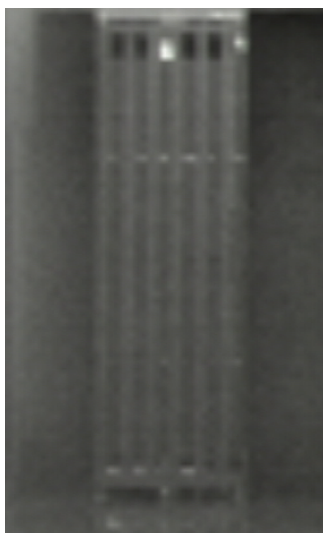
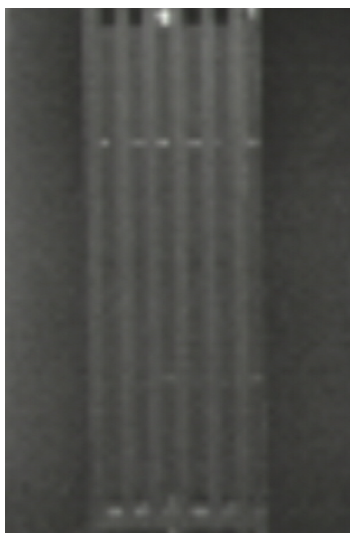
Jako první proběhlo měření při vypnutém ohřevu topných desek. To z důvodu následného srovnání, jak se liší dosah termovizní kamery při různých hodnotách teplotní difference. Z důvodů nedokonalosti prostor, kde měření probíhalo, bylo možné pozorovat rozdílné teploty v dolní a horní části testového obrazce.

Při tomto měření mělo prostředí – teplotu $t = 19,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$

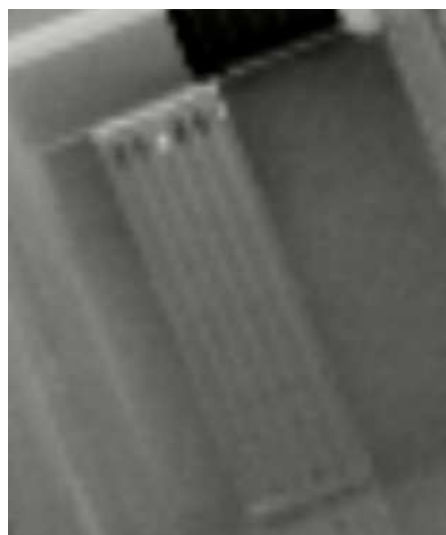
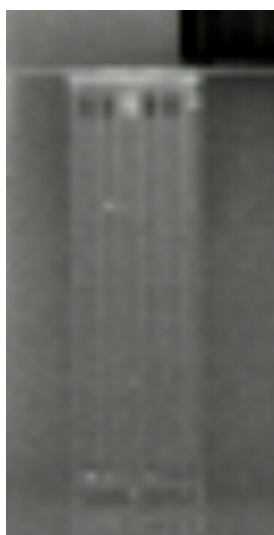
– relativní vlhkost $H_R = 14\%$

– teplotní difference $\Delta T = 0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Při tomto měření jsem došel k závěru, že termovizní kamera Thermal Eye X – 50 je schopna rozlišit čárovou strukturu testového obrazce maximálně na vzdálenost 18 m. Snímek z této vzdálenosti je na obr. 54. Pro srovnání uvádím na obr. 52 snímek ze vzdálenosti 12,5 m a na obr. 53 snímek ze vzdálenosti 15 m kratší vzdálenosti, kde lze čárovou strukturu bezpečně rozeznat a také obr. 55, 56 a 57 ze vzdáleností 19,5 m a 21 m, kde naopak struktura testu je již nerozlišitelná. Na obr. 57, kde je termovizní kamera vůči testovému obrazci nakloněna, je patrné, že čárová struktura se stala rozlišitelnou. Tuto zajímavou situaci lze vysvětlit snadno. Díky náklonu došlo ke změně velikosti pixelu. Uvažujeme-li pixel jako čtverec, pak počítáme s velikostí strany p . Při náklonu o 45° musíme počítat velikost strany jako úhlopříčku ve čtverci, tedy p^2 .



Obr. 52: Vzdálenost 12,5 m Obr. 53: Vzdálenost 15 m Obr. 54: Vzdálenost 18 m



Obr. 55: Vzdálenost 19,5 m

Obr. 56 a 57: Vzdálenost 21 m

5.3.2. Thermal Eye X-200 při vypnutém ohřevu topných desek

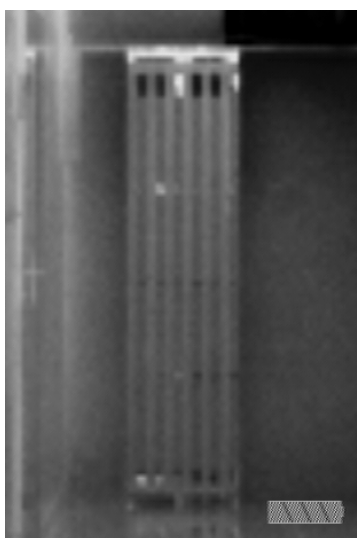
Jako následující v pořadí proběhlo opět měření při vypnutém ohřevu topných desek. To z důvodu následného srovnání, jak se liší dosah termovizní kamery při různých hodnotách teplotní difference. Z důvodů nedokonalosti prostor, kde měření probíhalo, bylo možné pozorovat rozdílné teploty v dolní a horní části testového obrazce.

Při tomto měření mělo prostředí – teplotu $t = 19,9 \text{ }^\circ\text{C}$

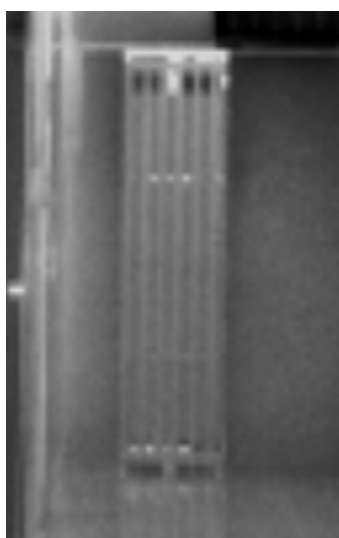
– relativní vlhkost $H_R = 14\%$

– teplotní difference $\Delta T = 0,9 \text{ }^\circ\text{C}$

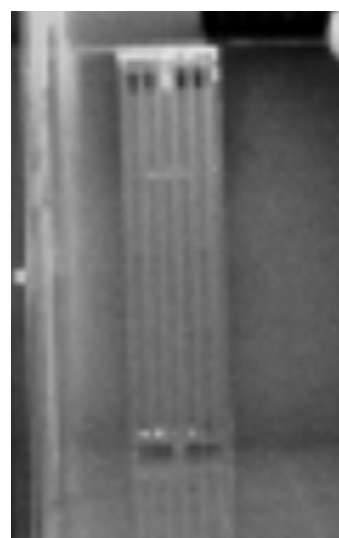
Při tomto měření jsem došel k závěru, že termovizní kamera Thermal Eye X – 200 je schopna rozlišit čárovou strukturu testového obrazce maximálně na vzdálenost 29 m. Snímek z této vzdálenosti je na obr. 60. Pro srovnání uvádím na obr. 58 a 59 snímky z kratší vzdálenosti 24 m a 26m, kde lze čárovou strukturu bezpečně rozeznat a také obr. 61, 62 a 63 ze vzdálenosti 32,5 m a 37m, kde naopak struktura testu je již nerozlišitelná. Na obr. 63, kde je termovizní kamera vůči testovému obrazci nakloněna, je patrné, že čárová struktura se stala rozlišitelnou. Vysvětlení této situace je v kapitole 5.3.1.



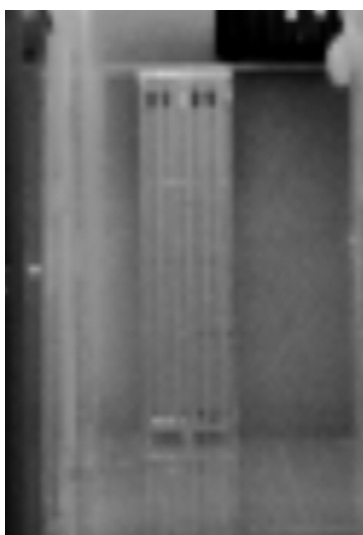
Obr. 58: Vzdálenost 24 m



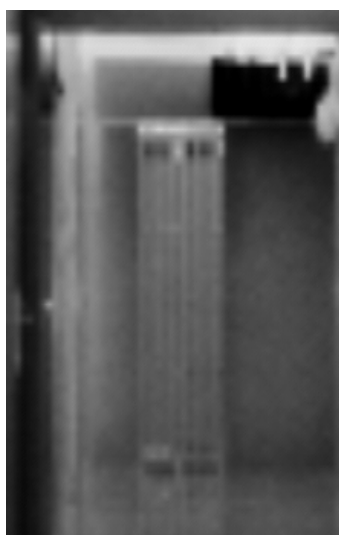
Obr. 59: Vzdálenost 26 m



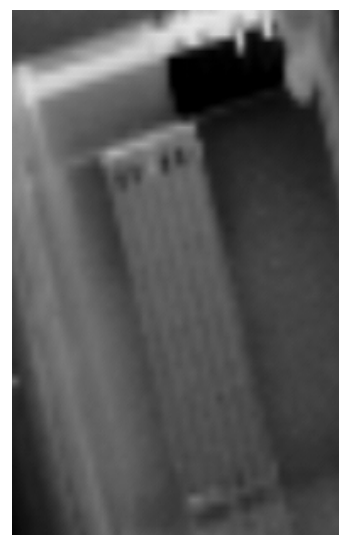
Obr. 60: Vzdálenost 29 m



Obr. 61: Vzdálenost 32,5 m



Obr. 62 a 63: Vzdálenost 37 m



5.3.3. Thermal Eye X-50 při zapnutém ohřevu topných desek

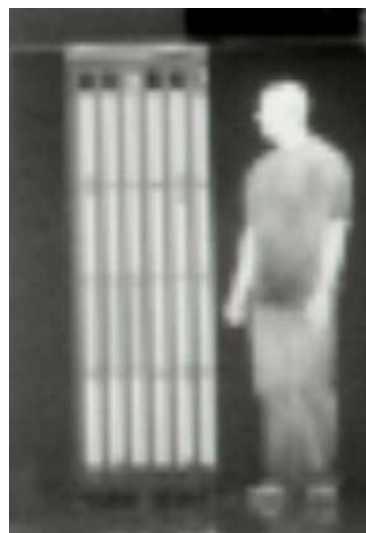
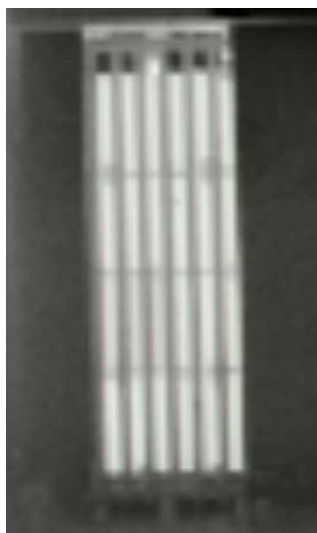
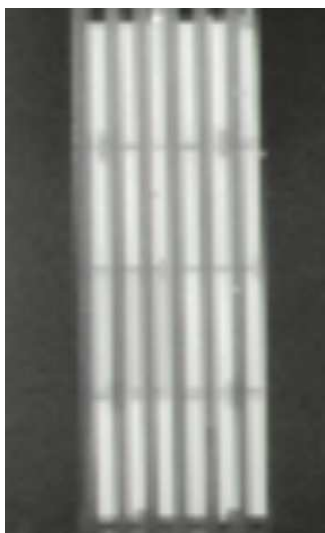
Další v pořadí proběhlo měření, při němž byl ohřev topných desek zapnut. Teplotní diference vzrostla na 4,5 °C.

Při tomto měření mělo prostředí – teplotu $t = 21\text{ °C}$

– relativní vlhkost $H_R = 17\%$

– teplotní diference $\Delta T = 4,5\text{ °C}$

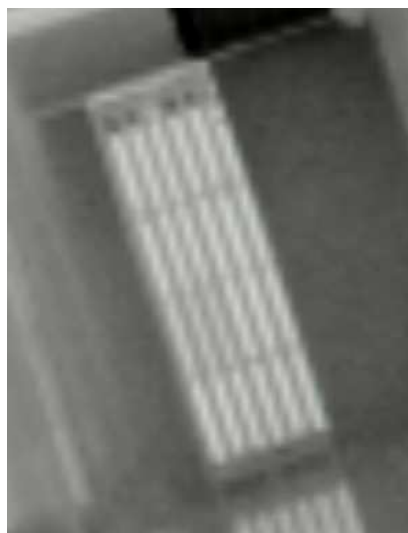
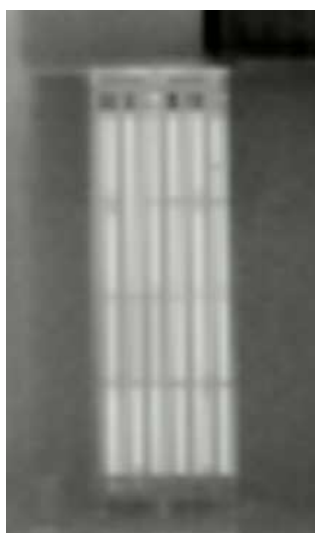
Níže uvedené obrázky 64, 65 a 66 jsou pořízeny ve vzdálenostech 12 m, 15 m, 18 m, což je pod hranicí dosahu měřené termovizní kamery a v těchto vzdálenostech lze čárovou strukturu rozlišit. Obrázky 67 a 68 byly zaznamenány na hranici dosahu a to 21 m. Z měření vyplývá, že při nárůstu teplotní diference na 4,5 °C vzrostl dosah termovizní kamery o 3 m.



Obr. 64: Vzdálenost 12 m

Obr. 65: Vzdálenost 15 m

Obr. 66: Vzdálenost 18 m



Obr. 67 a 68: Vzdálenost 21 m

5.3.4. Thermal Eye X-200 při zapnutém ohřevu topných desek

Při tomto měření mělo prostředí – teplotu $t = 21\text{ °C}$

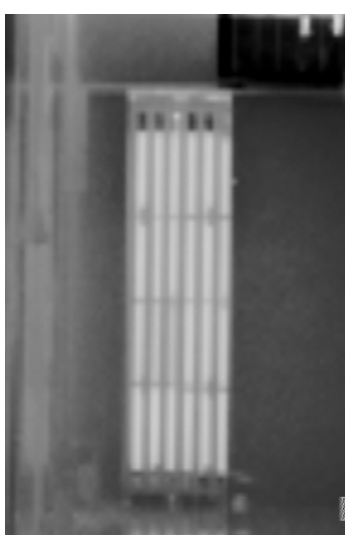
– relativní vlhkost $H_R = 17\%$

– teplotní diference $\Delta T = 4,5\text{ °C}$

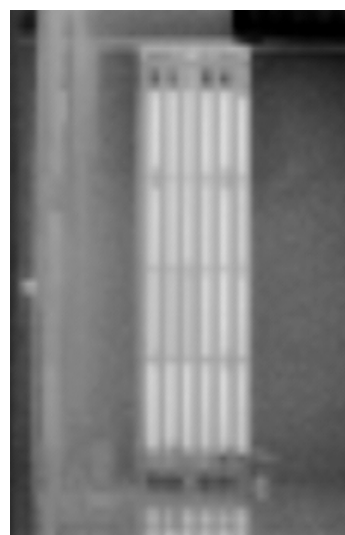
Níže uvedené obrázky 69, 70 a 71 jsou pořízeny ve vzdálenostech 24 m, 26 m, 29 m, což je pod hranicí dosahu měřené termovizní kamery, a v těchto vzdálenostech lze čárovou strukturu rozlišit. Obrázek 72 byl zaznamenán ve vzdálenost 32 m, což je na hranici dosahu. Obrázky 73 a 74 byly zaznamenány na hranici dosahu a to 21m. Na obr. 74, kde je termovizní kamera vůči testovému obrazci nakloněna, je patrné, že čárová struktura se stala rozlišitelnou. Tato zajímavá situace je vysvětlena v kapitole 5.3.1.



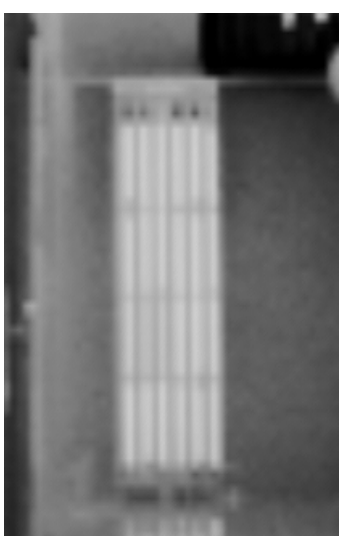
Obr. 69: Vzdálenost 24 m



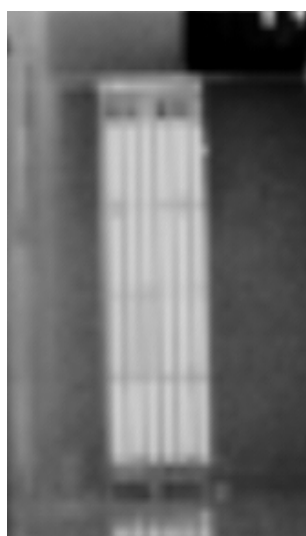
Obr. 70: Vzdálenost 26 m



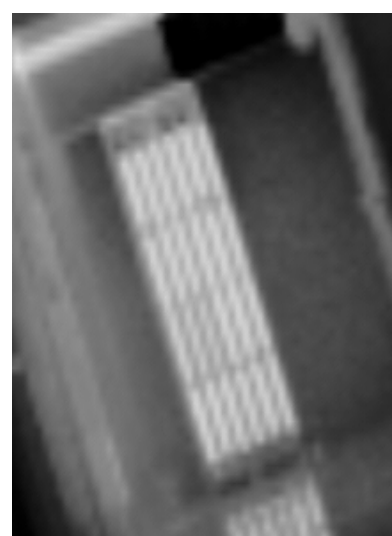
Obr. 71: Vzdálenost 29 m



Obr. 72: Vzdálenost 32 m



Obr. 73 a 74: Vzdálenost 37 m



Obr. 73 a 74: Vzdálenost 37 m

5.4. Měření dosahu systému za příznivých atmosférických podmínek

Toto měření bylo prováděno za slunečného, jasného počasí. Tepelný test byl umístěn tak, aby se nedostal do kontaktu s přímým slunečním světlem, tedy aby nedošlo ke zkreslení měřených hodnot. Po celou dobu měření byla termovizní kamera umístěna na statickém stojanu a připojena k přenosnému počítači. Ten umožňoval záznam snímků v průběhu celého měření.

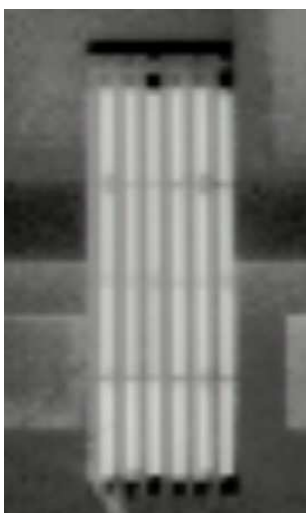
5.4.1. Thermal Eye X-50 při zapnutém ohřevu topných desek

Při tomto měření mělo prostředí – teplotu $t = 11\text{ °C}$

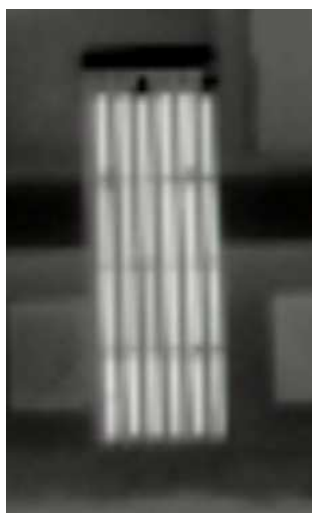
– relativní vlhkost $H_R = 40,3\%$

– teplotní diference $\Delta T = 15\text{ °C}$

Při tomto měření jsem došel k závěru, že termovizní kamera Thermal Eye X – 50 je schopna bezpečně rozlišit čárovou strukturu testového obrazce maximálně na vzdálenost 15 m. Snímek z této vzdálenosti je na obr. 75. Pro srovnání uvádím na obr. 76, 77, 78 a 79 snímky z delší vzdálenosti, kde již nelze čárovou strukturu bezpečně rozeznat. Na obr. 78 lze pozorovat, že na vzdálenost 40 m již vidíme pouze jednu čáru (dvojčáru). Při tomto měření jsem se setkal s problémem obtížného zaostření kamery na větší vzdálenosti než 30 m. Odlesky slunce na monitoru počítače znemožňovaly kvalitní pozorování.



Obr. 75: Vzdálenost 15 m



Obr. 76: Vzdálenost 20 m



Obr. 77: Vzdálenost 30 m



Obr. 78: Vzdálenost 40 m



Obr. 79: Vzdálenost 50 m

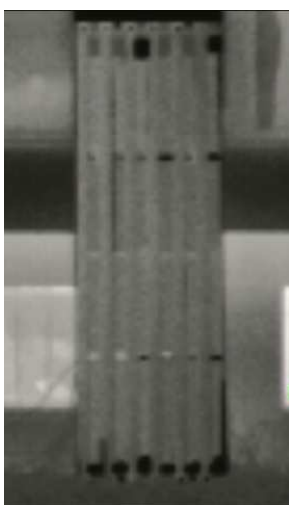
5.4.2. Thermal Eye X-200 při vypnutém ohřevu topných desek

Při tomto měření mělo prostředí – teplotu $t = 7,3\text{ °C}$

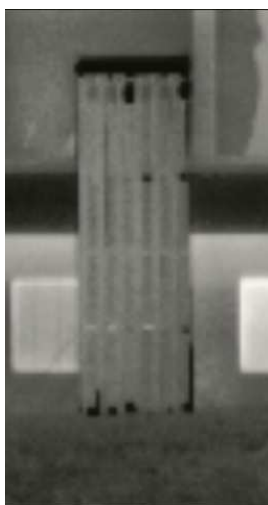
– relativní vlhkost $H_R = 44\%$

– teplotní diference $\Delta T = 0,3\text{ °C}$

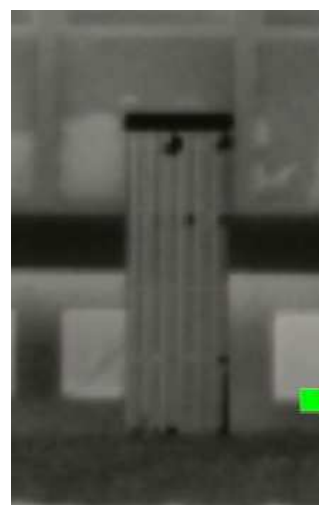
Při tomto měření jsem došel k závěru, že termovizní kamera Thermal Eye X – 200 je schopna bezpečně rozlišit čárovou strukturu testového obrazce maximálně na vzdálenost 30 m. Snímek z této vzdálenosti je na obr. 82. Pro srovnání uvádím na obr. 80 a 81 snímky z kratší vzdálenosti 15 a 20 m, kde je možné testový obrazec rozeznat a obr. 83, 84 a 85 ze vzdálenosti 40 m, 50 m a 60 m, kde již nelze čárovou strukturu bezpečně rozpoznat.



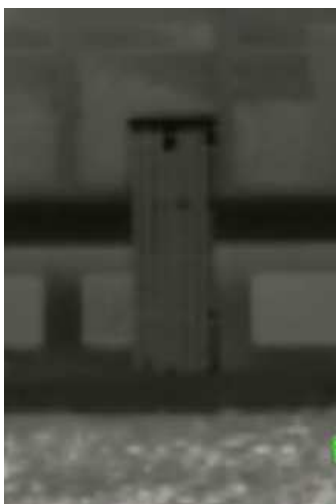
Obr. 80: Vzdálenost 15 m



Obr. 81: Vzdálenost 20 m



Obr. 82: Vzdálenost 30 m



Obr. 83: Vzdálenost 40 m



Obr. 84: Vzdálenost 50 m



Obr. 85: Vzdálenost 60 m

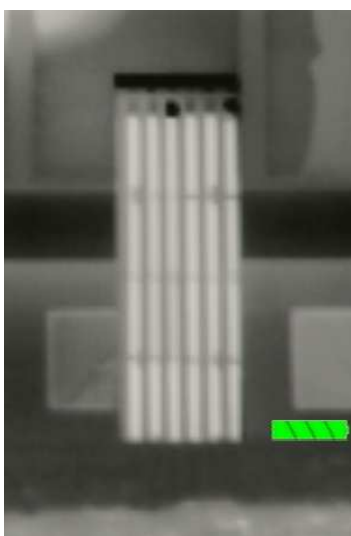
5.4.3. Thermal Eye X-200 při zapnutém ohřevu topných desek

Při tomto měření mělo prostředí – teplotu $t = 11\text{ °C}$

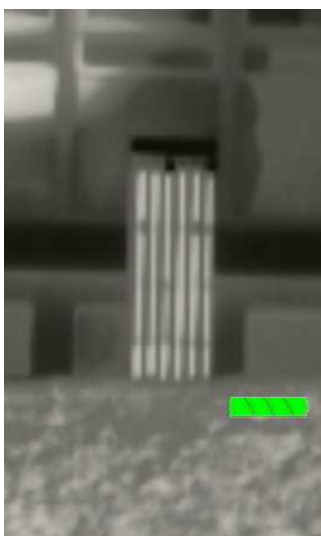
– relativní vlhkost $H_R = 40,3\%$

– teplotní diference $\Delta T = 15\text{ °C}$

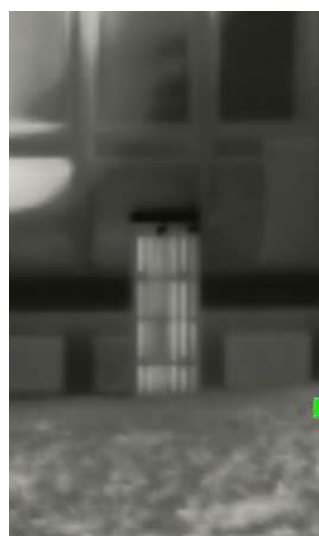
Při tomto měření jsem došel k závěru, že termovizní kamera Thermal Eye X – 200 je schopna rozlišit čárovou strukturu testového obrazce maximálně na vzdálenost 30 m. Snímek z této vzdálenosti je na obr. 87. Pro srovnání uvádím na obr. 86 snímek z kratší vzdálenosti 20 m, kde je možné testový obrazec rozeznat a obr. 88, 89, 90 a 91 ze vzdálenosti 40 m, 50 m a 60 m, kde již nelze čárovou strukturu bezpečně rozpoznat. Na obr. 88, 89, 90 a 91 je patrná porucha jedné z ohřevných desek. Její pravá polovina zvyšovala svoji teplotu velmi pomalu oproti ostatním deskám.



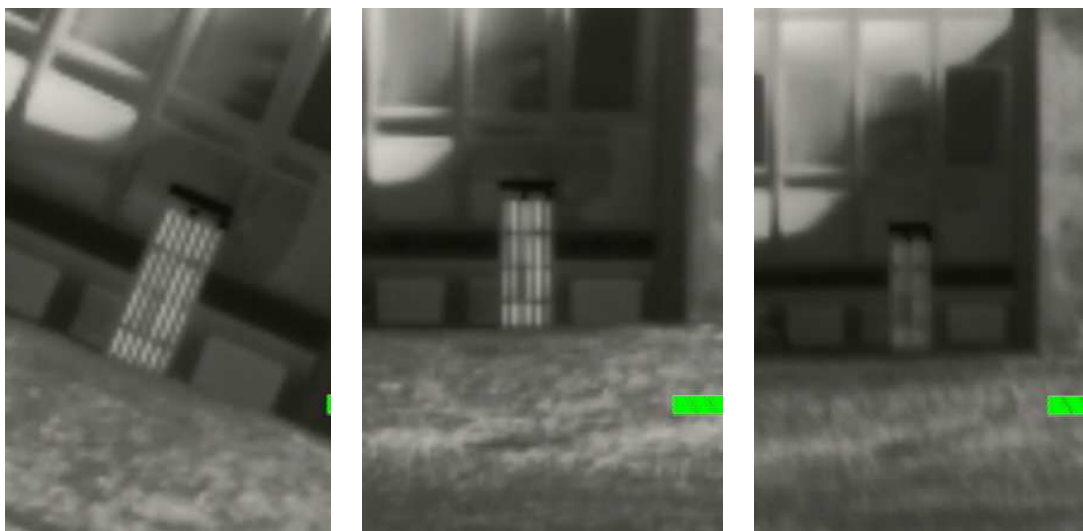
Obr. 86: Vzdálenost 20 m



Obr. 87: Vzdálenost 30 m



Obr. 88: Vzdálenost 40 m



Obr. 89: Vzdálenost 40 m Obr. 90: Vzdálenost 50 m Obr. 91: Vzdálenost 60 m

5.4.4. Souhrn výsledků měření MRTD a dosahu systému

Typ měření	Thermal Eye X-50	Thermal Eye X-200
MRTD na vzdálenost 1 m	0,25 °C	0,09 °C
Dosah v laboratorních podmínkách $\Delta T = 0,9 \text{ °C}$	18 m	29 m
Dosah v laboratorních podmínkách $\Delta T = 4,5 \text{ °C}$	21 m	32 m
Dosah v externích podmínkách $\Delta T = 15 \text{ °C}$	15-18 m	30 m
Teoretický dosah dle tab. 7	26 m	42 m

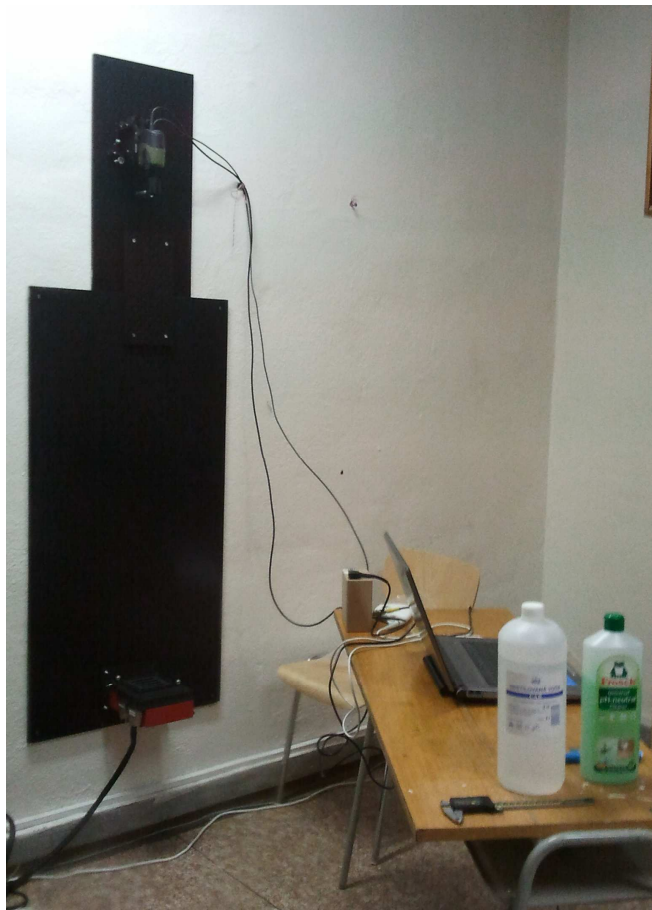
Tab. 10: Souhrn výsledků

Ve všech případech měření byl registrován dosah pro rozlišení šesti čárového Johnsonova testu přibližně o 25-30 % nižší, než plyne z teoretické předpovědi dle tab. 7.

Zvyšování ΔT se neprojevalo významnějším zvýšením dosahu. Limitujícím faktorem pro dosah termovizního přístroje se pro aplikované podmínky vždy zdá vzorkovací frekvence receptoru. Z tohoto hlediska je zkonstruovaný měřicí systém vhodný i pro hodnocení dosahu rozlišení přístrojů v mlze. Bohužel vzhledem k trvale příznivému počasí posledních měsíců se nepodařilo realizovat žádné měření za mlhy.

5.5. Měření vlivu H₂O v kapalném skupenství na kvalitu zobrazení

Tato měření byla provedena s cílem zjistit, jak výrazně ovlivňuje voda v kapalném skupenství kvalitu zobrazení. Pro účel těchto měření byla sestrojeno měřicí zařízení*, umožňující připevnění termovizní kamery Thermal Eye X-200, s níž bylo prováděno celé měření, na stěnu laboratoře, a to ve vzdálenosti 1,38 m od černého tělesa. Snímek zařízení je na obr. 92. Před objektivem termovizní kamery byla 20 mm předsazena plandeska z germánia od švédské společnosti Thor Labs. Horizontální poloha germániové plandesky byla volena proto, aby se na ní mohla vytvořit malá vrstva vody, přes kterou by byl pozorován testový obrazec. V průběhu měření byla kamera připojena k přenosnému počítači. Ten umožňoval záznam snímků.



Obr. 92: Konstrukce pro měření

* Děkuji Mgr. Radku Čelechovskému, PhD. za pomoc při sestavení měřicího zařízení

5.5.1. Měření MRTD na vzdálenost 1,38 m

V první části měření, byla změřena minimální rozlišitelná teplotní diference na vzdálenost 1,38 m bez germaniové plandesky. To celé za účelem zjištění, jak ovlivňuje germaniová plandeska kvalitu zobrazení. S touto plandeskou bylo následně dále pracováno, proto bylo nutné ji blíže prozkoumat.

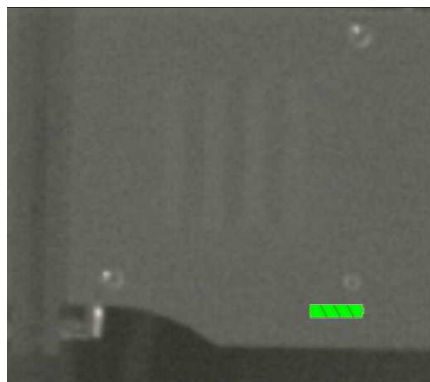
Při tomto měření byla teplota okolí $t = 23,20 \text{ }^\circ\text{C}$

Vzdálenost	ΔT_+	ΔT_-	MRTD
1,38 m	0,23 $^\circ\text{C}$	0 $^\circ\text{C}$	0,115 $^\circ\text{C}$

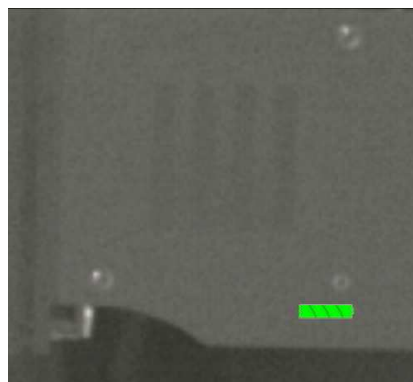
Tab. 11: Naměřené hodnoty

Výpočet :

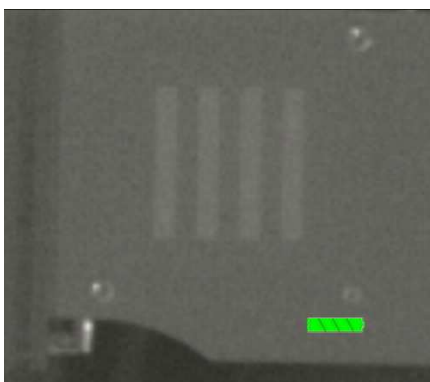
$$\text{MRTD} = \left| \frac{\Delta T_+ - \Delta T_-}{2} \right| = \left| \frac{0,23 - 0}{2} \right| = 0,115 \text{ }^\circ\text{C}$$



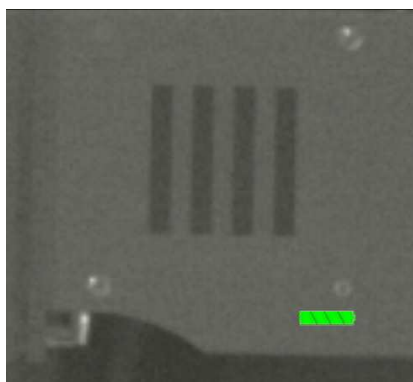
Obr. 93: Teplotní diference 0,23 $^\circ\text{C}$



Obr. 94: Teplotní diference 0 $^\circ\text{C}$



Obr. 95: Teplotní diference +0,5 $^\circ\text{C}$



Obr. 96: Teplotní diference -0,5 $^\circ\text{C}$

Na obr. 93 je čárový test na hranici rozlišitelnosti při teplotní diferencii +0,23 °C, na obr. 94 při teplotní diferencii 0 °C. Obr. 95 a 96 jsou uvedeny pro srovnání. Teplotní diference je +0,5 °C a -0,5 °C.

5.5.2. Měření MRTD na vzdálenost 1,38m přes Ge plandesku

Nyní bylo 20 mm před objektiv termovizní kamery Thermal Eye X-200 předsazena germániová plandeska.

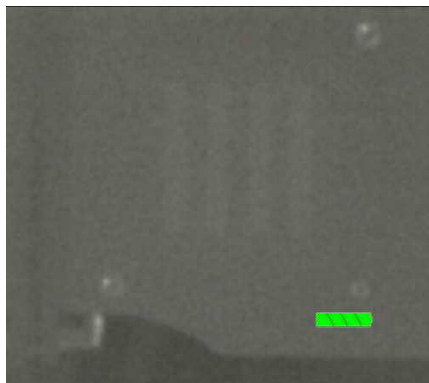
Při tomto měření byla teplota okolí $t = 23,04 \text{ °C}$

Vzdálenost	ΔT_+	ΔT_-	MRTD
1,38 m	0,38 °C	0,01 °C	0,195 °C

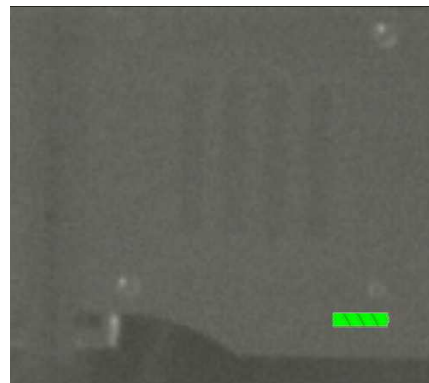
Tab. 12: Naměřené hodnoty

Výpočet :

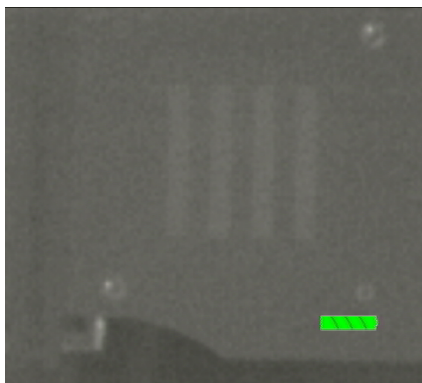
$$\text{MRTD} = \left| \frac{\Delta T_+ - \Delta T_-}{2} \right| = \left| \frac{0,38 - (-0,01)}{2} \right| = 0,195 \text{ °C}$$



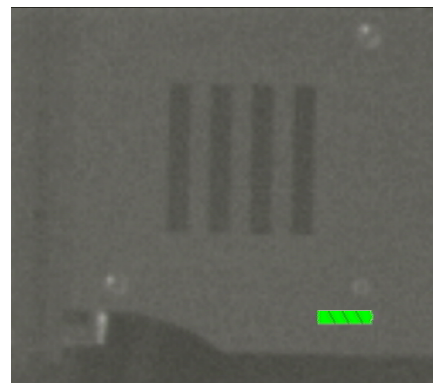
Obr. 97: Teplotní diference +0,38 °C



Obr. 98: Teplotní diference -0,01 °C



Obr. 99: Teplotní diference +0,5 °C

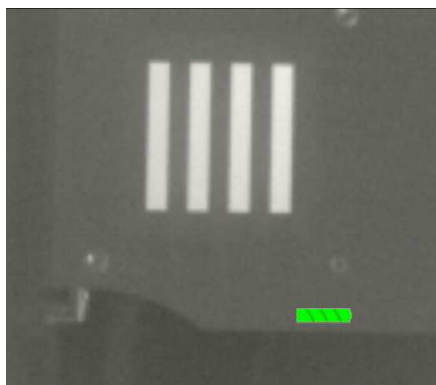


Obr. 100: Teplotní diference -0,5 °C

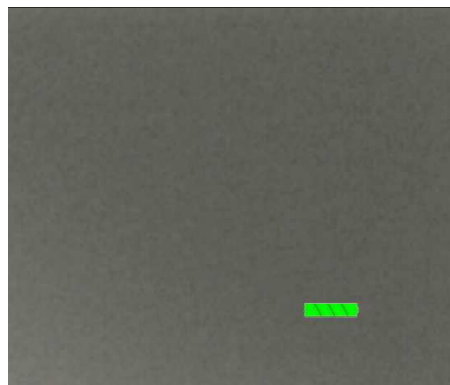
Na obr. 97 je teplotní diference na hranici rozlišitelnosti, při teplotní diferenci +0,38 °C, na obr. 98 při teplotní diferenci -0,01 °C. Obr. 99 a 100 jsou uvedeny pro srovnání. Teplotní diference je +0,5 °C a -0,5 °C. Minimální rozlišitelná teplotní diference je tedy přes germaniovou plandesku o 42% horší než bez ní.

5.5.3. Vliv vody v kapalném stavu na kvalitu zobrazení

V tomto měření byl na germaniovou plandesku nakapána destilovaná voda, která vytvořila vrstvu o tloušťce asi 1,5 mm. Toto množství vody bylo minimální možné. A to z důvodu, že menší množství vody by nepokrylo celou plochu plandesky. Teplota při tomto měření byla $t = 23,04$ °C. Teplotní diference byla nastavena na 5 °C. Z uvedených snímků je patrné, jak velký vliv má i tak malé množství vody.

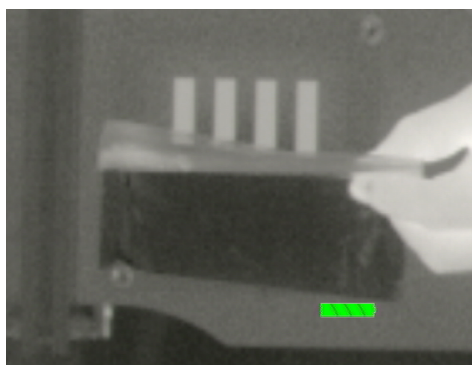


Obr. 101: Ge plandeska bez vody



Obr. 102: Ge plandeska s vrstvou vody

Na obr. 101 je germaniová plandeska bez vody. Na obr. 102 byl na plandesku nanesen asi 1,5 mm destilované vody, která způsobila silnou absorpci záření a čárový test nebylo možné pozorovat. Pro názornou ukázkou a čtenářovu lepší představu o vlivu vody na infračervené záření přikládám snímek (obr. 103), na kterém byl na polovinu plochy čárového testu položen polymerový sáček s vodou. Tloušťka vodní vrstvy mezi stěnami sáčku byla asi 2 mm. Teplotní diference je 2 °C.

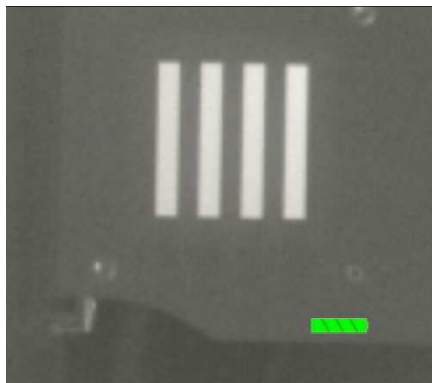


Obr. 103: Polymerový sáček s vodou

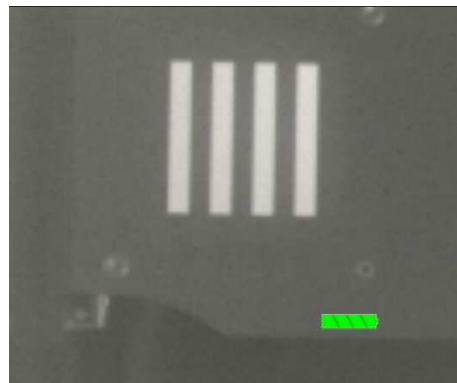
5.5.4. Vliv velmi tenké vrstvy vody na kvalitu zobrazení

Předchozí pokusy jasně demonstrovaly, že i slabá vrstva vody v kapalném skupenství o tloušťce okolo 1,5 mm znemožňuje jakékoli pozorování. Z tohoto důvodu byla při pokusu použita vrstva vody o tloušťce v řádech μm . Tu tvořila blána vytvořená ze směsi vody a glycerolu. Následně i více blán najednou.

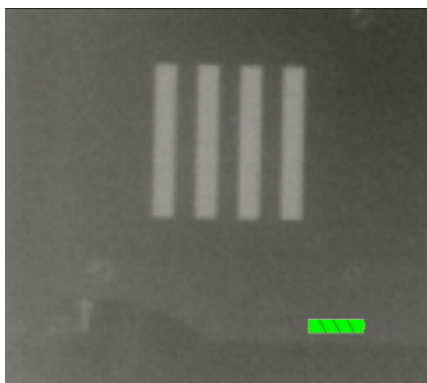
Teplota při tomto měření byla $t = 22,95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní difference byla nastavena na $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.



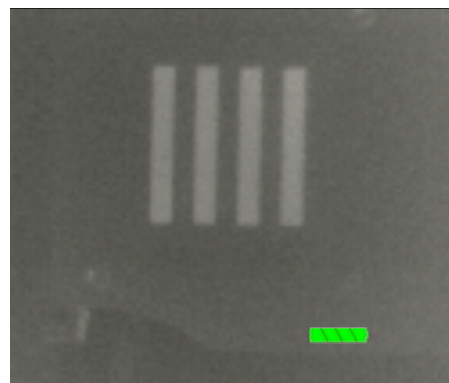
Obr. 104: Bez vlivu vodní blány



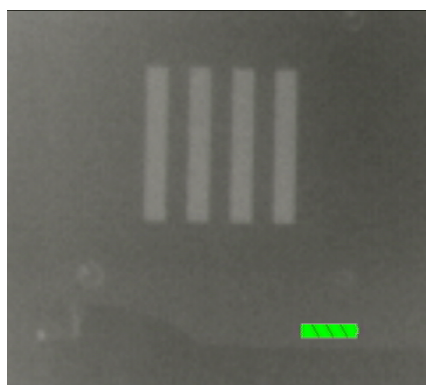
Obr. 105: 1 blána před objektivem



Obr. 106: 2 blány před objektivem



Obr. 107: 3 blány před objektivem

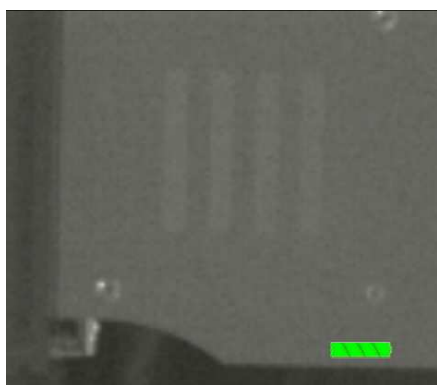


Obr. 108: 5 blan před objektivem

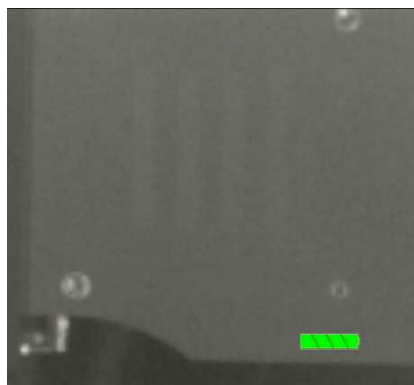
Na obr. 104 je čárový test pozorovaný přes germaniovou plandесku. Následně byla mezi termovizní kameru a testový obrazec vkládána jedna vodní blána (obr. 105), dvě blány (obr. 106), tři blány (obr. 107) a pět blan (obr. 108). Ze snímků je patrné, že vrstva vody o tloušťce v řádech μm ovlivňuje kvalitu zobrazení, ale ne takovou mírou, aby byla schopná absorbovat takovou měrou záření jako při předchozím měření (kapitola 5.5.3.).

5.5.5. Vliv tenké vrstvy vody stlačené mezi Ge a ZnS sklem

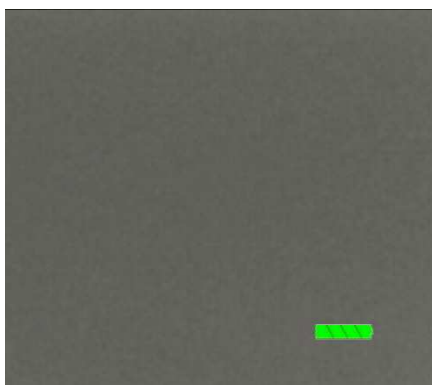
Cílem tohoto pokusu bylo otestovat opět vliv vody v kapalném stavu. Tentokrát však stlačené mezi dvě plandесky z různých materiálů. To celé z důvodu vytvoření tenčí vrstvy vody než v předchozím případě. Při tomto pokusu byly použity plandесky z germania a sirníku zinečnatého. Tloušťka vrstvy vody změřená tloušťkoměrem byla $20\ \mu\text{m}$.



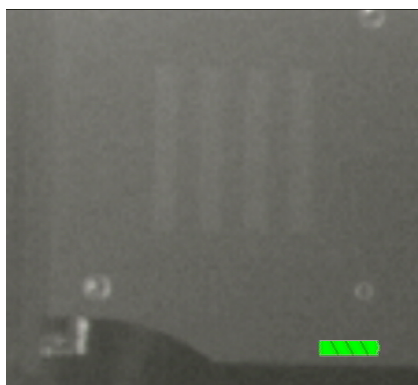
Obr. 109: Bez vlivu, $\Delta T=0,3\ \text{°C}$



Obr. 110: Ge+ZnS, $\Delta T=0,3\ \text{°C}$



Obr. 111: Ge+ZnS, nestlačené, $\Delta T=0,5\ \text{°C}$



Obr. 112: Ge+ZnS, stlačené, $\Delta T=0,5\ \text{°C}$

Na obr. 109 je snímek čárového testu, při teplotní diferenci $\Delta T=0,3\ \text{°C}$. Na obr. 110 je kombinace germaniové plandесky a plandесky ze sirníku zinečnatého, jež jsou

v optickém kontaktu při teplotní diferenci $\Delta T=0,3$ °C. Jak je patrné, došlo ke zhoršení kvality zobrazení při vložení kombinace skel před objektiv termovizní kamery. Snímky, uvedené na obr. 111 a 112, ukazují vliv vody v kapalném stavu při různých tloušťkách. Na obr. 111 je vrstva vody mezi kombinací skel nestlačená a výsledná viditelnost je nulová. Naopak obr. 112 ukazuje vytlačenou vrstvu vody, čímž její tloušťka výrazně klesla a čárový test se stal viditelným.

6. Závěr

V této bakalářské práci jsem se v první kapitole zaměřil na objasnění pojmu termovizní systém a principy jeho funkce. Objasnil jsem teplotní zákony, které jsou základem teorie termovizních systémů.

V druhé kapitole jsem popsal problematiku průchodu infračerveného záření zemskou atmosférou. Simulace průchodu záření atmosférou byly prováděny v programu libRadtran. Z grafů, které tvoří výstup z tohoto programu, vyplývá, že voda obsažená v atmosféře v kapalně podobě, je hlavním prvkem ovlivňujícím záření v oblasti LWIR. Má velký koeficient absorpce a již 20 mm/km způsobuje pokles spektrální intenzity vyzařování pod $0,01 \text{ [mW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}]$ pro teplotu černého tělesa $t=37 \text{ }^\circ\text{C}$. Práci s programem libRadtran hodnotím jako velmi dobrou. Obsluhu programu se lze, při troše snahy, velmi rychle naučit. Tento program bych doporučil budoucím řešitelům problematiky průchodu záření atmosférou. K práci přiložené CD obsahuje datové soubory, ve kterých je podrobně definované záření a atmosféra, s nimiž bylo při simulacích v programu libRadtran pracováno.

Ve třetí kapitole jsem popsal použité měřicí a měřené přístroje.

Pro praktickou část této práce, popsanou ve čtvrté kapitole, jsem nejprve realizoval měřicí zařízení, které bylo následně využito k měření dosahu systému, v laboratorních podmínkách a v exteriéru za příznivých atmosférických podmínek.

V laboratorních podmínkách jsem pracoval s černým tělesem od společnosti HGH Systemes Infrarouges. Pomocí něj jsem měřil minimální rozlišitelnou teplotní diferenci termovizních kamer Thermal Eye X-50 a Thermal Eye X-200. Černé těleso jsem využil také ke zkoumání vlivu vody v kapalném stavu na infračervené záření.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Český obranný standard 585502, Měření minimálního rozlišitelného teplotního rozdílu (MRTD) u infračervených kamer (1. vydání), Praha, Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2006
- [2] Dereniak, E.L., Boreman, G.D.: Infrared Detectors and Systems. New Jersey, John Wiley & Sons, 1996, ISBN 0-471-12209-2
- [3] Hudson, Richard D. jr.: Infrared System Engineering. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006, ISBN 0-470-09935-6
- [4] Chlup, V.: Odhalení, rozpoznání, identifikace. JMO 4/2007, ročník 52, 2007
- [5] Jacobs, Pieter A.: Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds (2nd edition). Washington, SPIE, 2006, ISBN 0-8194-6082-6
- [6] Kostka, O. a kol.: Meteorologie pro sportovní letce. Edice Svazarmu – svazek 5, Praha, Naše vojsko, 1960
- [7] Krska, K. a kol.: Meteorologie. Brno, Akademické nakladatelství CERM, 2006, ISBN 80-7204-447-8
- [8] Langer, V.: Energetika optických soustav. Olomouc, rektorát UPOL, 1987
- [9] Reidl, Max J.: Optical Design Fundamentals for Infrared Systems (2nd edition). Washington, SPIE, 2001, ISBN 0-8194-4051-5
- [10] Vrbová, M. a kol.: Lasery a moderní optika. Praha, Prométheus, 1994, ISBN 80-85849-56-9
- [11] Brynda, P.: Úvod do teorie termovizního měření. České vysoké učení technické, Fakulta dopravní. 20.4. 2011
http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda.pdf

- [12] Internetové stránky Gymnázia Sušice, 20.4.2011
http://fyzika.gymsusice.cz/web/data/texty/Zareni_cerneho_telesa.pdf
- [13] Internetové stránky společnosti Fluke, 23.4.2011
http://www.myflukestore.com/p2637/fluke_574.php
- [14] Internetové stránky společnosti Fluke, 23.4.2011
http://www.fluke.eu/comx/show_product.aspx?locale=czcs&pid=37822
- [15] Internetové stránky společnosti Greisinger, 23.4.2011
<http://www.greisinger.de/files/upload/en/produkte/kat/5.pdf>
- [16] Internetové stránky společnosti Laser Technology, 23.4.2011
<http://www.lasertech.com/TruPulse-200-Rangefinder.aspx>
- [17] Internetové stránky společnosti Leica Geosystems, 23.4.2011
http://www.leica-geosystems.us/en/Leica-DISTO-D5_74709.htm
- [18] Internetové stránky společnosti Nielsen Kellerman, 23.4.2011
<http://www.nkhome.com/store/product.php?productid=16361>
- [19] Internetové stránky společnosti Veza, 23.4.2011
<http://www.vezas.cz/laborat/ohrev.jpg>
- [20] Prospekt Thermal Eye X-50 společnosti Morovision Night Vision, 29.3.2011
<http://www.morovision.com/pdf/Thermal/X-50.pdf>
- [21] Prospekt Thermal Eye X-200 společnosti Morovision Night Vision, 29.3.2011
<http://www.morovision.com/pdf/Thermal/X200xp.pdf>
- [22] Uživatelská příručka programu libRadtran verze 1.6-beta, 3.5.2011
<http://www.libradtran.org/doc/libRadtran.pdf>

[23] Wikipedia – otevřená encyklopedie: Reileighův rozptyl, 30.4.2011
http://cs.wikipedia.org/wiki/Rayleigh%C5%AFv_rozptyl

[24] Wikipedia – otevřená encyklopedie: Mie theory, 30.4.2011
http://en.wikipedia.org/wiki/Mie_theory