

MASARYKOVA UNIVERZITA

Přírodovědecká fakulta



Kalibrace termovizního systému (kamery) Fluke Ti30

Bakalářská práce

Jiří Nováček

Vedoucí bakalářské práce: MUDr. Věra Maryšková

Brno, 2007

ANOTACE

Práce se zabývá kalibrací dvou termovizních systémů (Fluke Ti30). Tyto kamery jsou vybaveny mikrobolometrickými detektory umístěnými v ohniskové rovině optické systému přístroje. Matice detektorů se skládají ze 120 x 160 senzorů, které mají maximální citlivost na infračervené záření v oblasti 7–14 μm . Kalibrace byla provedena porovnáváním teplot zobrazovaných termovizními kamerami vůči teplotě simulátoru černého tělesa FLIR SYSTEM BB 150-P. Byla získána data v rozmezí teplot 26–80 $^{\circ}\text{C}$. Z nich byla určeny výsledky, které udávají přesnost měření kamer a hladinu šumu.

ANNOTATION

The thesis deals with the calibration of two thermography systems (Fluke Ti30). These cameras are equipped with microbolometric focal plane array detectors. The matrices of the detectors consist of 120 x 160 IR sensors with maximum sensitivity in the range 7–14 μm . The calibration was carried out by comparing temperatures as measured by the thermography systems to the temperatures of the black body FLIR SYSTEM BB 150-P. Data was collected in the range 26–80 $^{\circ}\text{C}$. The accuracy and noise level in by these systems was determined.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval paní MUDr. Věře Maryškové, vedoucí mé bakalářské práce, za čas, který věnovala konzultacím, odborné vedení a poskytování cenných rad, které posloužili k řešení dané problematiky.

Dále bych rád poděkoval panu pplk. doc. Ing. Teodoru Balážovi, CSc. za umožnění přístupu do laboratoře s modelem černého tělesa, věnovaný čas a množství užitečných připomínek k řešené problematice.

Rovněž bych chtěl poděkovat panu prof. RNDr. Vojtěchu Mornsteinovi, CSc. za konzultace a hodnotné rady.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a podle pokynů konzultanta a vedoucího bakalářské práce.

V Brně

.....

Jiří Nováček

Obsah

| | |
|--|--------|
| <u>Úvod</u> | - 5 - |
| <u>1. Infračervené záření</u> | - 6 - |
| 1.1 <u>Objev a historie infračerveného záření</u> | - 6 - |
| 1.2 <u>Charakteristika infračerveného záření</u> | - 6 - |
| 1.3 <u>Prostup infračerveného záření atmosférou</u> | - 7 - |
| <u>2. Záření absolutně černého tělesa</u> | - 8 - |
| 2.1 <u>Model absolutně černého tělesa a emisivita</u> | - 8 - |
| 2.2 <u>Planckův zákon</u> | - 10 - |
| 2.3 <u>Wienův zákon posuvu</u> | - 11 - |
| 2.4 <u>Stefan-Boltzmannův zákon</u> | - 11 - |
| 2.5 <u>Kirchhoffův zákon</u> | - 11 - |
| <u>3. Detektory infračerveného záření</u> | - 12 - |
| 3.1 <u>Rozdělení senzorů infračerveného záření</u> | - 13 - |
| 3.2 <u>Intristické detektory</u> | - 14 - |
| 3.3 <u>Extrinsické detektory</u> | - 14 - |
| 3.4 <u>QWIP</u> | - 15 - |
| 3.5 <u>Thermopile detektory</u> | - 15 - |
| 3.6 <u>Pyroelektrické detektory</u> | - 15 - |
| 3.7 <u>Bolometrické detektory</u> | - 16 - |
| 3.8 <u>Mikrobolometrické detektory</u> | - 17 - |
| <u>4. Optické systémy infračervených teploměrů</u> | - 18 - |
| <u>5. Elektronika infračervených teploměrů</u> | - 20 - |
| <u>6. Termografie</u> | - 21 - |
| 6.1 <u>Termovize</u> | - 22 - |
| <u>7. Problémy při bezdotykovém měření teploty</u> | - 24 - |
| <u>8. Kalibrace termovizního systému Fluke Ti30</u> | - 25 - |
| 8.1 <u>Model černého tělesa</u> | - 26 - |
| 8.2 <u>Termovizní kamera</u> | - 27 - |
| 8.3 <u>Metodika experimentu</u> | - 28 - |
| 8.4 <u>Výsledky</u> | - 29 - |
| <u>9. Diskuse</u> | - 34 - |
| <u>10. Závěr</u> | - 38 - |
| <u>Literatura</u> | - 39 - |

Úvod

Mezi moderní metody měření povrchové teploty těles patří bezdotykové měření teploty (infračervená pyrometrie). V poslední době dochází k velkému rozšíření a pokroku v bezdotykovém měření teploty a to hlavně díky rozvoji v optice a elektronice. Přístroje, které slouží k bezdotykovému měření teploty, se nazývají pyrometry nebo infračervené teploměry (IČ-teploměry). Teplota tělesa je určována na základě detekce tepelného elektromagnetického záření vysílaného tělesem a přijímaného IČ-teploměrem. Velkou výhodou těchto přístrojů je možnost měření záření, a tím i určení teploty, na určitou vzdálenost. Na rozdíl od termočlánků tedy odpadá nutnost kontaktu mezi měřeným objektem a měřicím zařízením. To poskytuje řadu výhod při aplikacích. IČ-teploměry jsou vhodné zvláště pro měření pohybujících se nebo na dotek citlivých objektů, objektů ve vakuu nebo tlakových nádobách a dále například v radioaktivním prostředí. Nejprve nacházely detektory infračerveného záření uplatnění hlavně ve vojenském průmyslu. Později se jejich využití rozšířilo do oblastí letecké bezpečnosti, lékařské diagnostiky, výrobní kvality a kontroly. Výhod IČ-pyrometrie využívá hlavně silikátový, metalurgický a chemický průmysl. V poslední době se rozvíjí použití radiačních pyrometrů i při nižších teplotách, včetně teplot nižších než 0°C, a tak nacházejí uplatnění v potravinářství, elektronice, v papírenském, farmaceutickém, textilním, gumárenském průmyslu, při zpracování plastických hmot atd.

Bezdotykové teploměry musí být individuálně kalibrovány a pro udržení přesnosti měření pravidelně rekalibrovány. Pravidelná kalibrace ujistí, že IČ-teploměr pracuje v optimální oblasti a poskytuje tak přesné a spolehlivé výsledky měření. Existuje řada způsobů provedení kalibrace bezdotykového teploměru. Jedním z nejčastějších je kalibrace za použití simulátoru absolutně černého tělesa. Zajištění absolutní přesnosti měření je u IČ-teploměrů složitější než u kontaktních teploměrů. Původ tohoto problému tkví především v obtížnosti přesného stanovení emisivity reálných těles.

Úkolem této práce je provést kalibraci termovizního zařízení Fluke Ti30, který je majetkem Biofyzikálního ústavu Lékařské fakulty Masarykovy univerzity v Brně. Vzhledem k tomu, že došlo k závadě na této kameře, byl zapůjčen po dobu opravy

stejný typ kamery od firmy TSI System s.r.o., na kterém byla následně kalibrace prováděna. Po opravě bylo provedena kalibrace i s opravenou kamerou, a proto jsme se rozhodli rozšířit bakalářskou práci o porovnání přesnosti měření těchto dvou termovizních kamer. Ke kalibraci bylo použito simulátoru absolutně černého tělesa FLIR SYSTEM BB150-P.

1. Infračervené záření

1.1 *Objev a historie infračerveného záření*

Infračervené záření bylo neznámé až do doby před 200 lety, kdy Frederick William Herschel (1738–1822) provedl svůj pokus. Herschel, vědec a astronom, objevil roku 1800 v Anglii při experimentování se slunečním světlem infračervené záření. Pomocí hranolu nejprve rozložil sluneční světlo na spektrum a k jeho jednotlivým částem poté přikládal teploměr. Směrem k červené oblasti spektra teplota rostla. Poté přiložil teploměr za červenou část spektra a zjistil, že teplota stoupla více než v kterékoliv části červeného spektra. Tato oblast byla nazvána infračervenou (z latinského *infra* = *pod*).

Dále následovaly práce Kirchhoffa, Stefana, Boltzmann, Wiena, Rayleighe. Max Planck nakonec završil úsilí formulací známého Planckova zákona.

1.2 *Charakteristika infračerveného záření*

Jedná se o elektromagnetické vlnění se stejnými fyzikálními vlastnostmi jako má viditelné záření. Jelikož se jedná o elektromagnetické záření, zabírá oblast vlnových délek mezi viditelnou a mikrovlnnou částí spektra. Infračervené záření se dělí na blízkou infračervenou oblast ($\lambda=780\text{--}1400\text{nm}$), střední infračervenou oblast ($\lambda=1,4\text{--}3\mu\text{m}$) a vzdálenou infračervenou oblast ($\lambda=3\mu\text{m}\text{--}1\text{mm}$). Hranice mezi jednotlivými částmi infračerveného záření však nejsou přesně stanoveny a rozdělení se u různých autorů liší. Mnou použité hodnoty vychází z [1].

Použití tohoto rozdělení je velmi výhodné, pokud mluvíme o zdrojích a detektorech infračerveného záření. V blízké infračervené oblasti se používají stejné prostředky jako pro viditelné záření. Ve střední infračervené oblasti se používají jen některé stejné prostředky jako pro viditelné záření a ve vzdálené oblasti se používají pouze tepelné prostředky.

Jinou veličinou pro popis infračerveného záření je vlnocet ν , který odpovídá počtu vln na 1 m.

$$\nu = \frac{1}{\lambda} \quad [m^{-1}]$$

Příčinou vzniku infračerveného záření jsou vnitřní fyzikální procesy probíhající ve zdrojích tohoto záření. Jedná se o vibrační a rotační pohyby atomů v molekule, přechody elektronů mezi jednotlivými elektronovými hladinami nebo kmity uzlů mřížky.

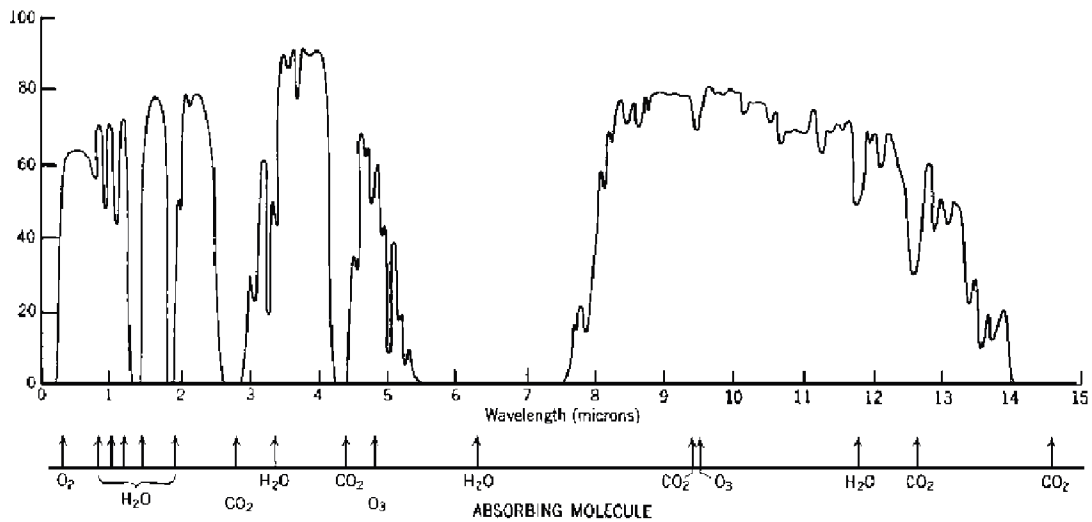
1.3 Prostup infračerveného záření atmosférou

Znalost chování infračerveného záření při prostupu atmosférou je důležitá pro všechny aplikace na Zemi. Atmosféra obsahuje plyny, tekutiny i pevné látky, které zeslabují nebo rozptylují procházející infračervené záření. Rozptyl znamená změnu ve směru šíření paprsku záření, což je způsobeno pohlcení a následným vyzářením energie částicemi prostředí. Rozptyl molekulami plynu je zanedbatelný pro vlnové délky větší než 2 μm . Stejně tak částice kouře jsou malé s ohledem na vlnovou délku infračerveného záření, a proto jím může toto záření pronikat dále než viditelné světlo. Okolo 78% atmosféry je tvořeno dusíkem a 20% kyslíkem. Zbytek se skládá z helia, oxidu uhličitého, vodíku, methanu, neonu, kryptonu a ozonu.

Vodní pára je patrně nejdůležitější součástí atmosféry z hlediska pohlcování infračerveného záření. Vodní pára pohlcuje záření nejvíce při vlnových délkách 1,38 μm , 1,87 μm , 2,7 μm a 6,3 μm . Nejvíce vodní páry je při zemském povrchu.

Kromě toho nejvíce k zeslabení infračerveného záření přispívají oxid uhličitý a ozon. Oxid uhličitý silně absorbuje při vlnových délkách 2 μm , 2,7 μm , 4,3 μm a 15 μm . Pásmo absorpce ozonu leží v oblasti mezi 9,3 a 9,8 μm .

Následující graf je převzatý z [22] a znázorňuje závislost průchodu na vlnové délce záření.



Graf 1: Procentuelní průchod záření v závislosti na jeho vlnové délce. Níže znázorněny absorbující částice.

2. Záření absolutně černého tělesa

2.1 Model absolutně černého tělesa a emisivita

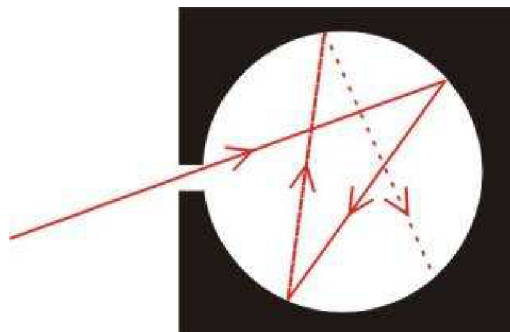
Všechny tělesa vyzařují energii do svého okolí úměrnou jejich absolutní teplotě. Tepelná energie vyzářená každým objektem se dá vyjádřit ve vztahu k energii, kterou by vyzářil dokonalý zářič při stejné teplotě. Tento zářič se označuje jako absolutně černé těleso. Jedná se o fyzikální pojem pro objekt, který pohltí veškeré dopadající záření a vyzáří více tepelného záření pro všechny vlnové délky než jakékoli jiné těleso stejných rozměrů a teploty.

Emisivita jakéhokoliv tělesa je rovna poměru vyzařování tohoto tělesa ku vyzařování absolutně černého tělesa při téže teplotě a platí pro ni tento vztah:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) M_{0\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} M_{0\lambda} d\lambda},$$

kde M_0 = intenzita vyzařování černého tělesa, $M_{0\lambda}$ = spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa, $\varepsilon(\lambda, T)$ = emisivita jako funkce vlnové délky a teploty. Pro absolutně černé těleso tedy platí, že emisivita je rovna jedné ($\varepsilon=1$). Emisivita materiálu nebo plynu je dána jeho molekulární strukturou. Stejně jako pro viditelné světlo tak i pro infračervené záření platí, že čím je povrch materiálu více vyleštěný, tím více záření odráží. Proto je dále hodnota emisivity určena povrchovými vlastnostmi materiálu. A tedy velmi vyleštěný objekt z nerezové oceli bude mít mnohem menší emisivitu než hrubě opracovaný objekt ze stejného materiálu. Třetím faktorem ovlivňujícím zdánlivou emisivitu materiálu nebo plynu je spektrální citlivost senzoru. Spektrální citlivost detektorů infračerveného záření bude více vysvětlena v části týkající se optických systémů IČ-teploměrů. Emisivita není obecně funkcí barvy, pokud ovšem zdroj barvy není radikálně odlišné podstaty od vlastního materiálu. Příkladem jsou metalické barvy s obsahem hliníku.

Absolutně černé těleso je ideální model, který však v praxi neexistuje. Laboratorní zdroje vyzařují s 98% a vyšší účinností vzhledem k absolutně černému tělesu. Nejběžnější postup při výrobě těchto zdrojů je použitím dutiny kulovitého či jiného vhodného tvaru s malým otvorem na povrch, kterým prochází záření. Matné vnitřní stěny jsou udržovány na stále stejné teplotě. Uvnitř tělesa je záření několikrát absorbováno a emitováno, až nastane tepelná rovnováha se stěnami tělesa. Na obr. 1 je znázorněn takový model absolutně černého tělesa.



Obr. 1: Schématické znázornění černého tělesa

2.2 Planckův zákon

Vyjadřuje závislost spektrální hustoty záře $L_\lambda(\lambda, T)$ na vlnové délce a teplotě. Planck také vyslovil předpoklad, že záření vzniká tepelnými pohyby hmotných částic. A dále také prohlásil, že výměna energie se uskutečňuje po určitých množstvích – kvantech energie ε a to podle vztahu:

$$\varepsilon = h\nu,$$

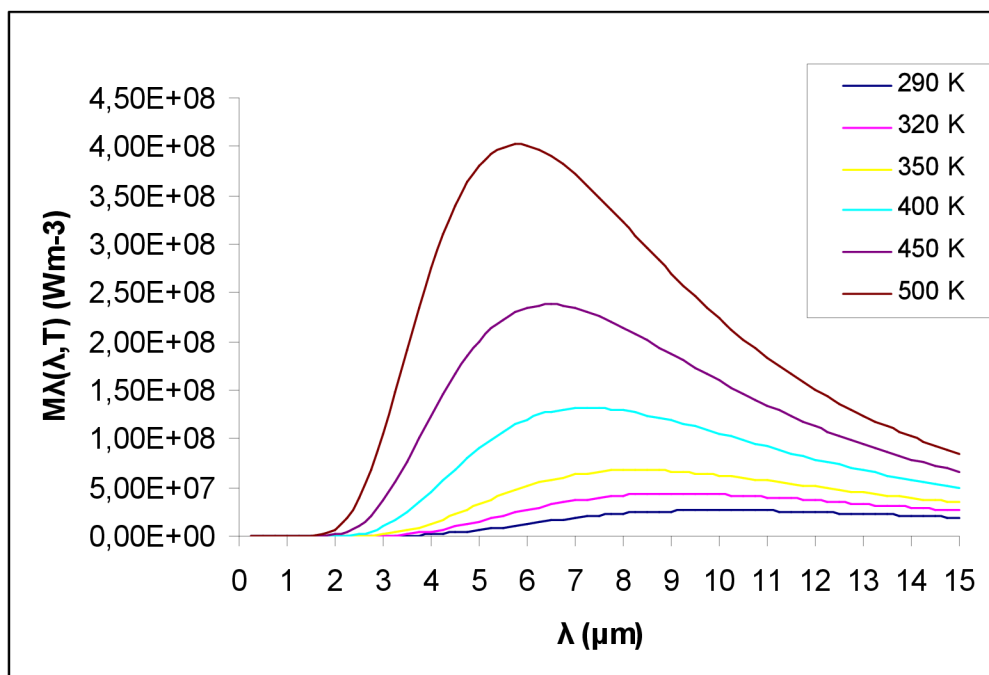
kde ν označuje frekvenci záření a $h=(6,625\ 17\pm 0,000\ 23)\text{Js}^{-1}$ je Planckova konstanta.

Dále lze určit vztah pro spektrální hustotu intenzity záření černého tělesa:

$$M_\lambda(\lambda, T) = \pi L_\lambda(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1},$$

kde $c_1 = 2\pi^5 h^6 c^2 / 15 \approx (3,741\ 50\pm 0,000\ 09) \cdot 10^{-16} [\text{W m}^2]$

$$c_2 = \frac{hc}{k} = (1,438\ 80\pm 0,000\ 06) \cdot 10^{-2} [\text{m K}]$$



Graf 2: Průběh spektrální hustoty intenzity vyzařování černého tělesa podle Planckova zákona

2.3 Wienův zákon posuvu

Z tohoto zákona vyplývá, že maximum spektrální hustoty intenzity vyzařování se s rostoucí teplotou posouvá ke kratším vlnovým délkám. Vlnovou délkou, při které dosahuje funkce maxima dostaneme ze vztahu:

$$\lambda_m T = 2898,82 \quad [\mu\text{m K}]$$

2.4 Stefan-Boltzmannův zákon

Tento zákon vyjadřuje závislost intenzity vyzařování na teplotě. Lze ho například získat integrací spektrální hustoty záření $L_\lambda(\lambda, T)$ v mezích od 0 do ∞ . Výsledný vztah pro intenzitu vyzařování je:

$$M(T) = \pi L(T) = \sigma T^4,$$

kde $\sigma = (5,6697 \pm 0,0010) 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$.

2.5 Kirchhoffův zákon

Intenzita vyzařování tepelného zářiče M v poměru ku pohltivosti α závisí pouze na termodynamické teplotě a ne na jeho chemickém složení. Stejný vztah pak také platí pro zář L . Pro černé těleso tedy platí, že intenzita vyzařování i zář jsou funkcemi pouze termodynamické teploty.

$$\frac{M}{\alpha} = f(T), \frac{L}{\alpha} = f(T),$$

pro černé těleso se jednotlivé veličiny často značí indexem 0, pak tedy platí:

$$M_0 = f(T), L_0 = f(T).$$

To platí i pro spektrální hustoty veličin jen s tím rozdílem, že se pak bude jednat také o funkci vlnové délky.

$$\frac{M_\lambda}{\alpha_\lambda} = \frac{M_{0\lambda}}{\alpha_{0\lambda}} = M_{0\lambda} = f(\lambda, T), \frac{L_\lambda}{\alpha_\lambda} = \frac{L_{0\lambda}}{\alpha_{0\lambda}} = L_{0\lambda} = f(\lambda, T).$$

Z Kirchhoffova zákona vyplývá, že těleso pohlcuje nejsilněji ty spektrální složky elektromagnetického záření, které samo nejsilněji vyzařuje a naopak. Proto pro černé těleso platí, že pohltivost i spektrální pohltivost jsou rovny jedné ($\alpha=1$, $\alpha_\lambda=1$). Dále také platí, že:

$$\varepsilon = f(\lambda, T),$$

z čehož lze vyvodit vztahy:

$$M = \varepsilon M_0, M_\lambda = \varepsilon M_{0\lambda}, L = \varepsilon L_0, L_\lambda = \varepsilon L_{0\lambda}$$

Jestliže bude těleso pro záření nepropustné (propustnost $\tau=0$), dojde k tepelné rovnováze a podle Kirchhoffova zákon bude platit, že emisivita bude rovna pohltivosti ($\varepsilon=\alpha$ a $\varepsilon_\lambda=\alpha_\lambda$).

Šedým tělesem nazveme objekt, jehož pohltivost je menší než pohltivost černého tělesa a zároveň je konstantní a nezávislá na vlnové délce. Potom zákon zachování energie můžeme zapsat takto:

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \quad \text{resp.} \quad \varepsilon + \tau + \rho = 1,$$

kde ρ označuje reflektanci.

3. Detektory infračerveného záření

Senzory infračerveného záření jsou snímače vyzařované energie. Nejsou citlivé na viditelné světlo a umožňují tak vidění při zatemněných podmínkách díky tomu, že detekují infračervené záření produkované objekty. Zachycená energie je přeložena do obrazů, které ukazují energetické rozdíly mezi jednotlivými objekty. Pod infračerveným světlem se odkrývají charakteristiky, které nejsou pod viditelným světlem vůbec zřejmé. Proto je možné pozorovat siluety lidí a zvířat za úplné tmy nebo odhalit přehřívající části strojních zařízení.

Nejprve je třeba uvést několik základních parametrů pro snímače záření. V první řadě se jedná o *integrální citlivost* K , která je dána podílem elektrického signálu na výstupu snímače U a zářivého toku Φ , který dopadá na citlivou plochu snímače.

$$K = \frac{U}{\Phi} [VW^{-1}].$$

Spektrální citlivost K_λ udává závislost citlivosti snímače na vlnové délce dopadajícího zářivého toku Φ_λ .

$$K_\lambda = \frac{U}{\Phi_\lambda} [VW^{-1}].$$

Spektrální citlivost je nejdůležitější charakteristikou detektorů záření. V praxi se však většinou užívá *relativní spektrální citlivost* S_λ .

$$S_\lambda = \frac{K_\lambda}{K_{\lambda \max}}$$

Časová konstanta τ vyjadřuje setrvačnost detektoru záření. Jedná se o minimální dobu, kterou potřebuje senzor na změření změny teploty.

NEP (Noise Equivalent Power) se označuje jako výkonový ekvivalent a udává minimální intenzitu záření, kterou je senzor schopen detekovat.

$$NEP = \Phi \frac{\sqrt{u_s^2}}{U} \left[WHz^{\frac{1}{2}} \right],$$

kde $\sqrt{u_s^2} = \sqrt{\frac{U_s^2}{\Delta f}}$ je spektrální hustota šumového napětí.

Detektivita D neboli detekční schopnost je definována jako:

$$D = \frac{1}{NEP}.$$

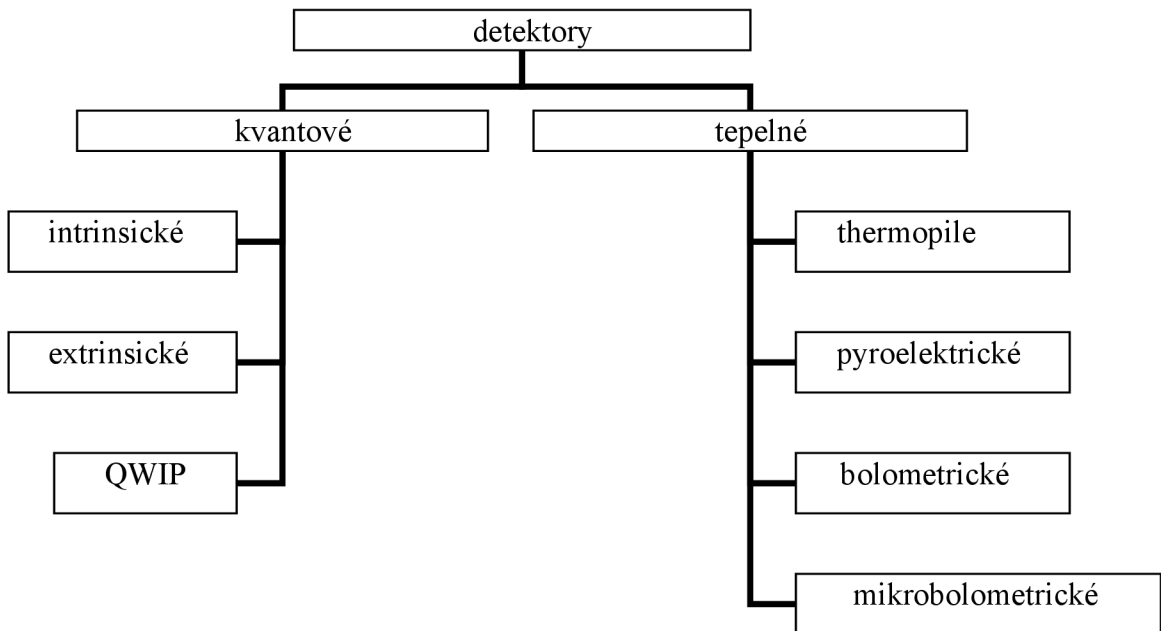
Specifická detektivita D^* je detektivita D rozšířená o vliv plochy detektoru S .

$$D^* = \frac{\sqrt{S}}{NEP} \left[W^{-1} mHz^{\frac{1}{2}} \right].$$

3.1 Rozdělení senzorů infračerveného záření

Existují dva fundamentální typy infračervených senzorů, a to kvantové a tepelné. V kvantových detektorech dochází ke vzniku volných nosičů elektrického náboje interakcí fotonů s vázanými elektrony. Kvantové detektory se dělí na intrinsické, extrinsické a novější QWIP (*Quantum Well Infrared Photodetector*). U tepelných detektorů dochází k vyhodnocení pohlcené energie nepřímo. Absorpcí fotonů dojde ke změně teploty citlivé části detektoru, která je zaznamenána snímači teploty.

Tepelné detektory se rozdělují na thermopile, pyroelektrické, bolometrické a mikrobolometrické. Na obr. 2 je toto rozdělení přehledně znázorněno.



Obr. 2: Detektory infračerveného záření

3.2 Intristické detektory

Takto se nazývají detektory infračerveného záření, které jsou vyrobeny z čistého polovodiče. Intristický detektor se také označuje jako fotorezistor. Mechanismus funkce spočívá ve změně v pohyblivosti nosičů náboje poté, co nastane kontakt dopadajících fotonů s polovodičovou vrstvou. Vodivost je v tomto případě funkcí toku fotonů. Detektor vyžaduje vnější elektrické pole, které způsobí přenos nosičů náboje a následný průtok elektrického proudu.

3.3 Extrinsické detektory

Mechanismus jejich funkce je založen polovodičovém P-N přechodu. Počet nosičů náboje je v tomto případě dán počtem příměsí. V polovodiči typu N se vyskytují příměsové atomy s nadbytkem valenčních elektronů. U polovodiče typu P vzniká opačná situace. Příměrové atomy se vyznačují nedostatkem valenčních elektronů. Spojením těchto dvou typů polovodičů vzniká P-N přechod, ve kterém difuzí děr z P do N a elektronů opačným směrem ustaluje dynamická rovnováha a

vyrovnávají se koncentrace elektronů a děr na obou stranách. Vzniká tak elektrická dvojrivrstva. Absorpcí fotonu v této dvojrivrstvě dojde ke vzniku páru elektron-díra a následnému pohybu elektronu do oblasti N a díry do oblasti P. Tak vzniká na fotodiodě napětí. Rozlišujeme *fotovodivostní a fotovoltaické* fotodiody.

3.4 QWIP

Pracovní princip tohoto zařízení je stejný jako u extrinsického detektoru. Tento typ detektoru je založen na využití kvantových jam. Jedná se o nepatrně tenké struktury, které jsou naskládány těsně na sobě a ve kterých se uplatňují zákony kvantové mechaniky. Detektor je složen z více než 100 vrstev polovodiče GaAs a každá vrstva má sílu 10–700 atomů. K vyražení elektronu z kvantové jámy je třeba foton s přesnou energií. To umožňuje vyladění tohoto detektoru na potřebné vlnové délky záření. QWIP detektor je mnohem citlivější než extrinsický detektor, protože celá kvantová jáma, ne jenom příměsový atom, působí jako pohlcující člen.

3.5 Thermopile detektory

Také bývají nazývány radiační pyrometry nebo infratermočlánky. Konstrukce spočívá v tom, že na černý infračervené záření absorbující materiál se připojují aktivní konce termočlánků. Ty vznikají spojováním dvou pásků vyrobených z rozdílných kovů. Ve spojích pásků vzniká napětí. Toto napětí je úměrné teplotě spojení. Když je záření opticky fokusováno na termočlánek, jeho teplota se zvětší nebo zmenší podle toho, zda se tok infračerveného záření zvýší či sníží. Pro zvýšení citlivosti musí být detektor izolován od svého okolí. Pro rychlou odpověď musí být thermopile schopen rychle uvolnit nahromaděné teplo. Při výrobě thermopile detektorů je nutno brát v potaz kompromis mezi oběma těmito požadavky.

3.6 Pyroelektrické detektory

Pyroelektrické detektory jsou zhotovovány z polarizovatelného materiálu a fungují na principu pyroelektrického jevu. Jak je uvedeno ve [2], při pyroelektrickém jevu

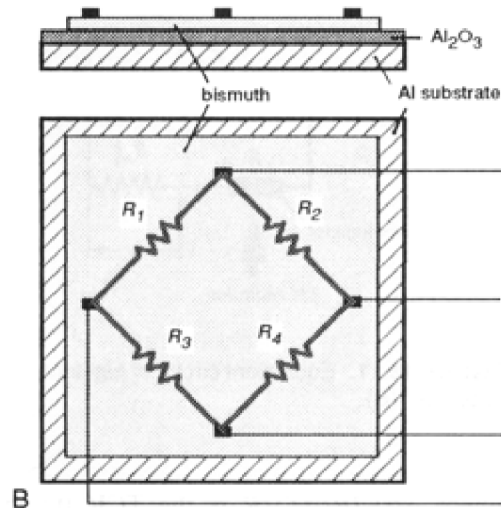
dochází ke změně spontánní polarizace při změně teploty. Detektory pracují tak, že výkyvy v ozáření detektoru odpovídají kolísání polarizace, a tak vzniká střídavý proud, který již může být monitorován vnějším zesilovačem. Kromě pyroelektrik se tento jev vyskytuje také u feroelektrik, kde orientaci domén vytváří silné vnější pole.

3.7 Bolometrické detektory

Princip funkce tohoto typu detektoru je velmi podobný principu funkce termočlánku. Jeho elektrický odpor se také mění se změnou teploty. Změna odporu bolometru pak odpovídá množství pohlceného infračervenému záření. K tomu je ale také nutná tepelná izolace detektoru od okolí. Mechanismus funkce: *Infračervené záření dopadá na absorpční vrstvu senzoru tvořenou zlatou fólií, která pohlcuje až 95% záření. To ohřívá teplotně vodivý povrch i nosník. Na spodní straně nosníku je napařený meandr odporové dráhy, jejíž odpor se mění lineárně s teplotou.*¹

Dnes se častěji využívá bolometr, jehož model je znázorněn na obr. 3. Na hliníkovou desku, která je odizolována oxidem hlinitým Al_2O_3 , se na tepelně vodivou desku z bismutu napařují odporové dráhy z oxidů MnO , MgO , TiO , TiO_2 (tzv. termistorové bolometry) nebo chalkogenidové sklo (tzv. vrstevné bolometry). U jednoduchých bolometrů se zapojují čtyři dráhy (R_1 až R_4) do Wheatstonova můstku. Některé se používají jako kompenzační nebo referenční.

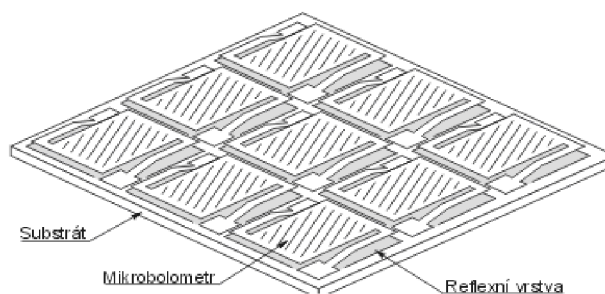
¹Vojáček A., Co jsou bolometry a mikrobolometry?, [online].
(<http://automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2005111601>)



Obr. 3: Bolometr

3.8 Mikrobolometrické detektory

Tento typ detektoru pracuje na stejném mechanismu jako bolometrický detektor. Jediný rozdíl je v tom, že obsahuje více odporových plošek na jednom senzoru. Jednotlivé detektory bývají uspořádány do rovinné struktury (dvourozměrného pole). Celý senzor je vyroben jako monolitický křemíkový obvod. Jako odporový materiál se v mikrobolometrech nejčastěji používá oxid vanadičitý VO_2 nebo nitrid křemíku. Odporová ploška je z důvodů tepelné izolace vyvýšena nad křemíkový substrát. Vzniklý prostor vyplňuje vzduch, který tak plní funkci izolantu. Pro zvýšení účinnosti se křemíkový substrát opatřuje reflexní vrstvou. Kvůli dalšímu zpřesnění měření se některé mikrobolometry umísťují na Peltierův element. Díky tomu se udržuje konstantní teplota detektoru až v rozmezí $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Tyto detektory se nejčastěji využívají v termovizních kamerách.



Obr. 4: Mikrobolometr

4. Optické systémy infračervených teploměrů

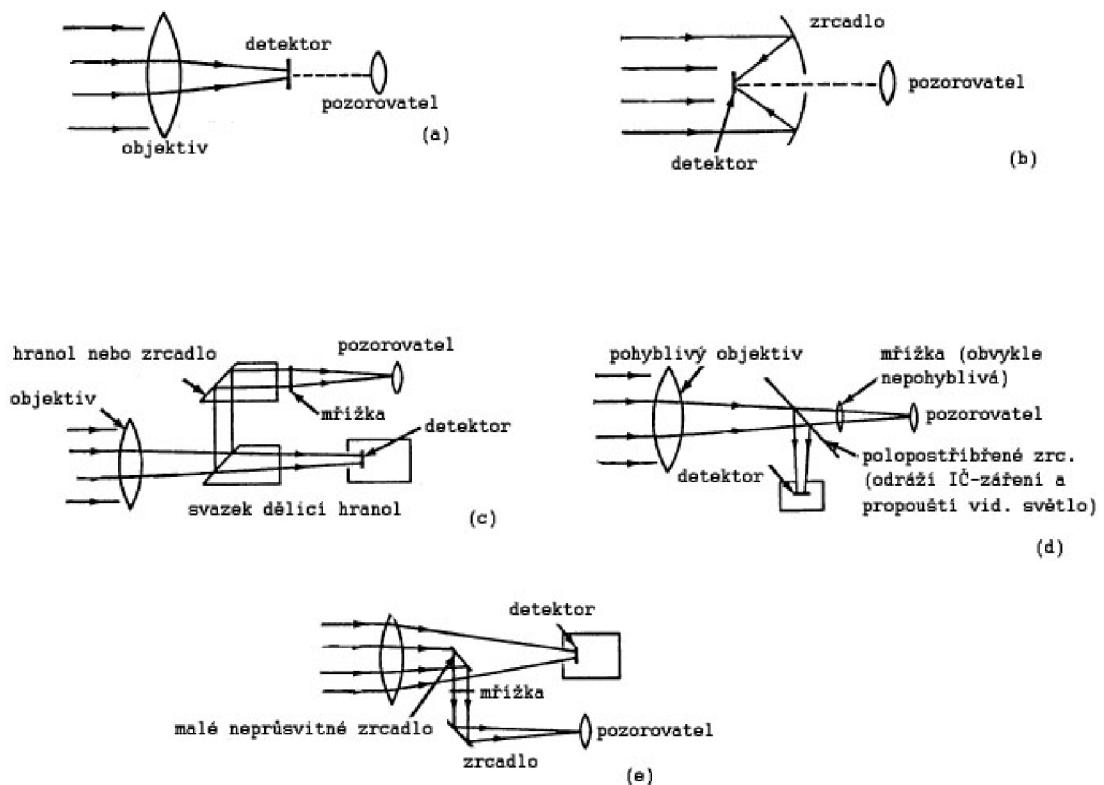
Vytvoření infračerveného obrazu těles bezdotykovým teploměrem závisí velice na optickém systému přístroje. Optika infračervených teploměrů se skládá z čoček, zrcadel nebo kombinací obou. Příklady jednotlivých optických systémů jsou na obr. 5. Systém zrcadel obecně nerozhoduje o spektrální citlivosti přístroje, jelikož odrazivost není závislá na vlnové délce v rozsahu používaném pro průmyslové měření teplot. Je však nutno dbát na to, aby byl systém chráněn před poškozením nebo znečištěním. To bývá zajištěno ochranným okénkem. Nejlepšími materiály na výrobu zrcadel v infračervené oblasti jsou zlato, stříbro a měď. Stříbrné a měděné povrchy by měly být dále pokryty ochranným filmem proti ztrátě lesku. Vlastnosti materiálu okénka ovlivní rozsah vlnových délek, na které bude přístroj reagovat. Sklo nepropouští dobře v oblasti nad $2,5\ \mu\text{m}$, proto se hodí pouze pro měření vyšších teplot. Quartz (křemenné sklo) propouští záření do $4\ \mu\text{m}$, krystalický fluorid vápenatý do $10\ \mu\text{m}$. Germanium a sulfid zinečnatý propouští záření v rozsahu $8\text{--}14\ \mu\text{m}$. Okénka a filtry umístěné před a za optickým systémem zaručují, že systém se stává neprůhledným pro záření mimo rozsah požadovaných vlnových délek.

Systém zrcadel se hlavně používá u přístrojů s pevně nastavenou velikostí optické vzdálenosti. Pokud požadujeme možnost změny ohniskové vzdálenosti, vzniká nutnost pohybu jednotlivých částí optického systému. Z tohoto důvodu je lepší

použít systém čoček, u kterých je zajištění pohybu méně komplikované. Volba materiálu čoček a okénka je kompromisem mezi jeho optickými a fyzikálními vlastnostmi a požadovanou citlivostí na požadované vlnové délky. Nezbytnou charakteristikou materiálů vhodných pro výrobu čoček, hranolů a okének jsou přibližně nulová odrazivost a hranice propustnosti pro krátké a dlouhé vlnové délky. Chemické a fyzikální vlastnosti mohou předepisovat volbu materiálu k dosažení daných pracovních podmínek. Odchytky vyskytující se u systémů s jednou čočkou nemusí dovolovat tvorbu dokonalého obrazu na detektoru. Proto se optický systém musí v těchto případech skládat z více částí.

Různé sestavení optického systému je typické pro různé typy detektorů a různé použití přístrojů. Schémata (a) a (b) na obr. 5 jsou typická pro přístroje, ve kterých se jako detektor používá křemíkové články nebo termoelektrické články. Ty dávají stabilní stejnosměrný proud s milivoltovým napětím na výstupu bez předzesílení. Uspořádání (a) se také používá, když je třeba, aby byl na výstupu místo stejnosměrného střídavý proud. V takových případech se točící disk nebo vibrující jazýček vsunuje mezi objektiv a detektor a cyklicky přerušuje záření, takže detektor „vidí“ pulsy záření. Uspořádání (c), (d) a (e) se používají, když jsou rozměry detektoru příliš velké. Detektor by pak bránil pozorování objektu. Proto se svazek dopadajícího záření nejprve rozdělí na dvě části. Jedna část následně dopadá na detektor a druhá umožňuje pozorování objektu.

Optické systémy infračervených teploměrů shromažďují energii z kruhové stopy a zaostřují ji na detektor. Proto se definuje optické rozlišení jako poměr vzdálenosti od přístroje k velikosti stopy ($D:S$). Velká hodnota poměru vypovídá o lepším rozlišení a tedy možnosti měřit menší stopy z větší vzdálenosti. Hodnota optického rozlišení je specifická pro jednotlivé bezdotykové teploměry. Další důležitou hodnotou je optický graf, který znázorňuje geometrii cesty infračerveného záření, jak je viděna čočkami přístroje.



Obr. 5: Schéma optického systému

5. Elektronika infračervených teploměrů

Kalibrační křivky detektoru výstup versus teplota nejsou lineární, protože rovnice vztahující se k množství záření vysílaného tělesem jsou mocninné funkce. Výstup na detektoru můžeme aproximovat

$$e = KT^N,$$

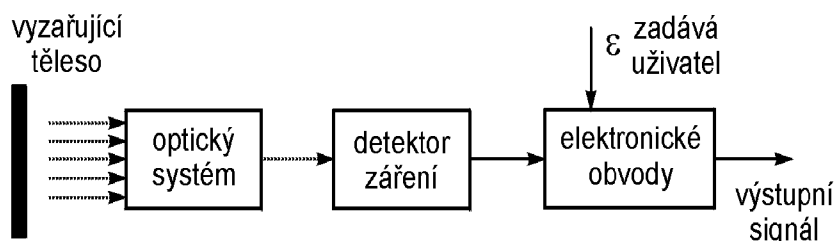
kde N má minimálně hodnotu 4, ale může také nabývat až hodnoty 20. Elektronika infračervených teploměrů musí signál zesílit, řídit, linearizovat a převést tento signál do mA nebo mV úměrným teplotě na výstupu.

Předtím než se začaly používat mikroprocesory bylo měření složitější a vyžadovalo mnohem sofistikovanější přístup. V dnešní době dovolují mikroprocesory velice snadnou linearizaci signálu. Elektronika založená na mikroprocesorech se dostává dál než konvenční analogová technika, protože může být použita k opravám nedokonalostí detektorů, poskytnout kompenzaci emisivity či odraženého záření a

poskytnout digitální výstupy pro dvojcestnou komunikaci mezi teploměrem a PC. Dále v případě výše zmíněného vztahu mezi výstupním napětím a teplotou (mocninový vztah) dokáže mikroprocesor řešit složitý algoritmus až se sedmi podmínkami namísto linearizace, což výrazně zvýší přesnost.

6. Termografie

Termografie neboli snímání tepelných polí se obecně zabývá plošným zobrazením tepelných polí. Snímá se buď vyzařování infračervených paprsků přímo z povrchu sledovaného objektu nebo odražené záření z povrchu objektu, kterému je tepelná energie dodávána z nějakého vnějšího zdroje. Obrazový signál se pak převádí na monitor v řadě barevných odstínů, z nichž každý zastupuje určitou teplotu. V poslední době se tato metoda těší stále větší oblibě, protože díky ní lze získat množství cenných informací o nejrůznějších jevech a situacích, které nějak souvisejí se změnou teploty. Přístroje zde požívané se skládají ze systému čoček, které směřují záření vysílané zkoumaným objektem na detektor, jenž následně převádí energii záření na elektrický signál, a elektronické obvody pro korekci emisivity a odraženého záření. Blokové schéma takového termografického systému je na obr. 6. Jednotlivá termografická zařízení lze rozdělit do dvou základních kategorií, a to na přístroje pracující bez rozkladu a s rozkladem (opticko-mechanickým nebo elektronickým) obrazu.



Obr.6: Schéma termografického systému

Systémy, které zviditelňují teplotní pole diagnostikovaného obrazu přímou cestou, tedy bez rozkladu, se vyskytují méně často. Patří sem hlavně obrazové měniče, které využívají fotoemisi a následnou sekundární emisi elektronů. Jsou to především vakuové fotodiody, u kterých vytváří optika tepelný obraz na fotokatodě.

To způsobí fotoemisi elektronů. Fotonásobičem se zesílí tok těchto elektronů, které jsou následně elektrickým polem usměrněny na luminiscenční stínítko, kde vznikne samotný obraz. V tomto systému se v poslední době používá mikrokanálová destička MCP (*microchanell plate*). Elektrony generované fotokatodou procházejí touto destičkou, ve které dochází ke zvětšení jejich počtu a to v důsledku způsobuje zvětšení intenzity výstupního záření. Mikrokanálová destička je vlastně kotouč tloušťky 1–3 mm, jehož konce jsou připojeny ke zdroji napětí. V kotouči je několik milionů skleněných kapilár s průměrem 16–40 μm . Jejich vnitřní povrch je pokryt vrstvičkou polovodičového materiálu, který slouží jako sekundární emitör. Výsledný obraz je pak přes optiku převeden například na CCD (Charge Coupled Device) čip. Další typ obrazových měničů pracuje na schopnosti některých luminoforů měnit intenzitu elektrického pole vlivem teploty.

Dalším typem zařízení pracujících bez rozkladu obrazu jsou evapografy. U těchto přístrojů se vytváří infračervený obraz na membráně kyvety zrcadlovým objektivem. Na této membráně dochází k vypařování či kondenzaci tekutiny tepelným zářením, což způsobuje převedení obrazu do viditelné podoby. Velkou výhodou evapografů je velká rozlišovací schopnost a možnost rozlišení objektů, jejichž teplota se liší pouze o 0,5°C od okolí.

Infračervený obraz lze bezrozkladovou metodou získat také pomocí infrafotografií. U této metody se používají fotografické materiály s citlivou v infračervené oblasti. Využitím této techniky je zaznamenávání infračervené energie objektů o teplotě nad 250°C, a to relativní metodou.

6.1 Termovize

Takto se označují systémy, které využívají rozkladu obrazu. Je to systém záznamu obrazu pomocí televizního signálu, který umožňuje zobrazení rozdělení teplot na povrchu pozorovaného objektu. Rychlá odezva zařízení dovoluje lépe sledovat souvislosti pozorovaných jevů a zkoumat například dynamický vývoj systému. Tepelná pole se zobrazují pomocí termogramů, což je plocha s různými odstíny barev nebo případně šedí. Stupnice na straně umožňuje identifikaci jednotlivých

teplot v termogramu. Rozlišujeme dva typy termovizních systémů. Jsou to systémy s opticko-mechanickým rozkladem obrazu a systémy s maticovým detektorem.

Kamery s opticko-mechanickým rozkladem obrazu snímají jednotlivé body sledovaného objektu řízenou optickou osou. Rozklad představuje postupné zobrazování jednotlivých bodů objektu v řádcích jako při snímání na televizní obrazovce. Dráhy rozkladu infračerveného obrazu bývají různé a jsou uskutečňovány změnou směru optické osy soustavy, kterou umožňují optické části přístroje (zrcadla nebo hranoly). Při použití zrcadla otočného kolem jedné osy se rozkládají body objektu do řádku nebo po obvodu kruhu. Zrcadlo otáčející se kolem dvou os vytváří rozklad do sítě a při použití soustavy zrcadel, optických klínů a hranolů dostaneme složitější křivočarý rozklad. Kamery s opticko-mechanickým rozkladem nacházejí v současnosti využití ve vojenských aplikacích.

Kamery s maticovým rozkladem využívají chlazené a nechlazené mikrobolometrické a kvantové FPA (*Focal Plane Arrays*) detektory (řádkové a maticové). Jsou velice podobné CCD čipům, ale jsou spíše citlivé na infračervené záření než na viditelné světlo. Každý pixel, který utváří infračervený obraz, odpovídá jednomu detektoru. Ty jsou uspořádány do dvojrozměrných polí. Jednořádková pole se používají pro vytváření řádkových obrazů. Matice detektoru je umístěna do ohniskové roviny optického systému přístroje (odtud také název). I přes značné pokroky ve vývoji obsahují pole vadné pixely. Software se obvykle zbavuje této vady interpolací dat z okolních pixelů. Chlazení se provádí Stirlingovým chladičem nebo termoelektrickým chladičem, který pracuje na principu Peltierova jevu. Jak je uvedeno v [2], zpracování signálů se realizuje přímo na čipu prostřednictvím multiplexerů a 14bitových A/D převodníků v každém řádku matice. Software dodávaný k moderním termovizním kamerám umožňuje různé způsoby zpracování signálu, ke kterým patří vykreslení teplotního profilu, vyhodnocení maximální a střední teploty, zobrazení izoterm, změna barevné palety atd.

Při snímání se používají hlavně krátkovlnné (2 – 5 μm) a dlouhovlnné (7 – 13 μm) pásmo vlnových délek. Přístroje pracující v krátkovlnné oblasti se hodí více pro měření vyšších teplot. *Prostřednictvím amplitudového diskriminátoru videosignálu*

lze u termovize nastavit pro libovolné rozmezí teplot libovolnou barvu nebo alespoň zvolit některou z volitelných barevných palet. Je nutno si uvědomit, že termovize pracuje v neviditelné části spektra záření, kde žádné barvy neexistují, takže přiřazení barev je umělé.¹

7. Problémy při bezdotykovém měření teploty

Klíčem ke správnému používání infračervených systémů pro bezdotykové měření teploty je nutnost dobrého porozumění problému vyzařování energie objektů v infračervené oblasti a zvažování všech možných typů přenosu tepelné energie (proudění, vedení, záření) v a okolo zkoumaných těles. Jedním z největších problémů je určení přesné hodnoty emisivity zkoumaného objektu. Různé velikosti emisivity jednotlivých těles mohou výrazně změnit vzhled infračerveného obrazu. Emisivita je funkcí teploty, vlnové délky a řady dalších vlastností povrchu materiálu. Je to bezrozměrná veličina, která popisuje schopnost objektu vyzařovat infračervené záření. Jen pro tzv. šedá tělesa je rovna konstantě pro libovolnou vlnovou délku. U reálných tuhých těles je závislost emisivity na teplotě spojitá, pro plyny má však diskrétní charakter. Velikost nejistoty teploty $\pm\Delta T$ pro měřenou teplotu T je pro malé hodnoty odchylky emisivity $\pm\Delta\varepsilon$ úhrynných pyrometrů rovna:

$$\Delta T = \Delta t \approx -0,25T \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}.$$

Jak již bylo uvedeno dříve, stav povrchu také ovlivňuje hodnotu emisivity. S postupující oxidací se její hodnota zvyšuje a klesá vliv povrchové úpravy objektu. Obraz vyleštěného kovového povrchu obsahuje tepelnou informaci jak o vlastním měřeném objektu tak o okolním prostředí, jelikož na povrchu dochází k odrazu záření.

Další chyby mohou vzniknout znečištěním optiky přístroje, stárnutím detektoru či nedodržením zaměřovací vzdálenosti udávané výrobcem. Ta je udávána jako podíl vzdálenosti od zkoumaného objektu a jeho velikosti. Při měření je také třeba brát ohled na různou propustnost záření v jiných prostředích (H₂O, CO₂, prach). Měření

¹ Kreidl M.: Měření teploty senzory a měřící obvody, BEN – Praha 2005

také nelze považovat za přesné, pokud se za průhledným objektem nachází zdroj rušivého záření.

Proto je nutné bezdotykové teploměry pravidelně kalibrovat. Trvalá přesnost je podmíněna způsobem rekalibrace a četností následných rekalibrací. Dosažení absolutní přesnosti měření požaduje u bezdotykových teploměrů mnohem sofistikovanější přístup než u kontaktních. Tato nevýhoda je však kompenzována snadnou opakovatelností a reprodukovatelností měření. Existují tři základní metody pro kalibraci infračervených teploměrů. *První metodou je použití komerčního simulátoru absolutně černého tělesa, což je izotermicky zahřátá dutina s relativně malým otvorem, na který je zaměřen radiální teploměr. Při vyšších teplotách se jako reference používají kalibrované wolframové lampy. Poslední možností je použití referenčního pyrometru, o němž se ví, že je přesně zkalibrován. Podle něj se seřizuje výstup kalibrovaného přístroje, až jsou výstupy obou shodné.*¹

8. Kalibrace termovizního systému Fluke Ti30

S rozvojem technologie, při níž jsou maticové detektory umísťovány do ohniskové roviny (*FPA = focal plane array*) optického systému termografického zařízení, se na poli snímání infračervených obrazů objevila řada možností pro jejich nová využití. S tím se ale také objevují nové problémy, které se týkají polovodičového materiálu, z něhož je detektor vyroben, způsobu chlazení nebo získání a zpracování obrazu. Na rozdíl od kamer s opticko-mechanickým rozkladem obrazu zde odpadá problém s rozkladem prostoru, časem pro zachycení obrazu, šumem pozadí a kvalitou obrazu. Na druhou stranu u FPA kamer chybí zařízení pro měření vnitřní referenční teploty, se kterou by byl signál neustále srovnáván. Z tohoto důvodu musí být takovéto kamery často kalibrovány, zvláště když jsou používány pro kvantitativní měření. Dále musí kalibrační procedura brát v úvahu nerovnoměrnosti na výstupu maticového detektoru. Podle [12] také nepříznivě ovlivňuje práci infračervené kamery náhodný prostorový šum.

¹ Zpravodaj pro měření a regulaci, číslo 1, 2.vydání, [online].
(http://www.newport.cz/techinfo/PDF/techinfo_1.pdf)

Pravidelná kalibrace zaručuje, že kamera pracuje optimálně a poskytuje přesné a hodnověrné výsledky měření. Úkolem této práce je provedení kalibrace a následné srovnání dvou termovizních systémů Fluke Ti30 s mikrobolometrickým obdélníkovým detektorem. První z kalibrovaných přístrojů (dále bude označován jako model č.1) je majetkem Biofyzikálního ústavu Lékařské fakulty MU v Brně. Druhý přístroj (dále jen model č.2) byl zapůjčen firmou TSI System s.r.o. Kalibrace kamery byla určena porovnáním teploty nastavené na modelu černého tělesa a teploty určené termovizní kamerou. Černým tělesem byla udržována homogenní teplota v rozsahu 26–80 °C. Následující kapitola obsahuje charakteristiky modelu černého tělesa. Kromě kalibrační závislosti byl dále také určen prostorový šum zkoumaných termovizních systémů.

8.1 Model černého tělesa

Jako zdroj infračerveného záření použitý ke kalibraci termovizní kamery byl použit model černého tělesa FLIR SYSTEM BB 150-P. Nejedná se v tomto případě o klasický dutinový model černého tělesa, ale o zařízení, které obsahuje tepelnou desku. Deskové modely černého tělesa jsou zvláště vhodné ke kalibracím termovizních kamer, jelikož udržují shodnou teplotu na celém svém povrchu. Toho lze s výhodou využít ke kalibraci všech senzorů a určení prostorového šumu maticového detektoru. BB 150-P je model černého tělesa, u kterého zajišťují ohřívání přesné odporové prvky, jež také zabezpečují uniformní rozložení teploty na povrchu tělesa. Průměr vyzařujícího kruhového otvoru dosahuje velikosti 80 mm a emisivita povrchu je výrobcem udávána na hodnotu 0,98. Pro zadávání rozdílných teplot je černé těleso spojeno s regulátorem teploty FLIR SYSTEM Temperature Controller 150-2, což je klasický PID regulátor, který umožňuje nastavení teploty černého tělesa s přesností 0,1°C. Model černého tělesa i s regulátorem teploty je na obr.7.



Obr. 7: Černé těleso s regulátorem teploty

Poslední kalibrace černého tělesa i s regulátorem teploty byla provedena 16. 12. 2004. Kalibrační data jsou uvedena v Tab. 1.

| Nastavená teplota (°C) | Skutečná teplota (°C) | Měřená teplota (°C) | Oprava (°C) |
|------------------------|-----------------------|---------------------|-------------|
| 30.0 | 30.1 | 30.0 | 0.1±0.8 |
| 40.0 | 40.1 | 40.0 | 0.1±0.8 |
| 70.0 | 70.1 | 70.0 | 0.1±0.9 |
| 100.0 | 100.2 | 100.0 | 0.2±1.0 |
| 120.0 | 120.0 | 120.0 | 0.0±1.1 |
| 150.0 | 149.4 | 150.0 | -0.6±1.2 |

Tab. 1: Kalibrační data černého tělesa

8.2 Termovizní kamera

Termovizní kamera Fluke Ti30 (obr.8) je termovizní systém vyrobený ve tvaru pistole. Přístroj je citlivý na infračervené záření v rozmezí 7 – 14 μm . Záření dopadá na nechlazený mikrobolometrický detektor, který obsahuje 120 x 160 senzorů. Umožňuje bezkontaktní měření teploty v rozsahu -10°C až 250°C . Při měření teploty vyšší než 0°C je teplota podle výrobce určována s přesností $\pm 2\%$ nebo $\pm 2^{\circ}\text{C}$, a to vždy vyšší hodnotu. Při měření teplot nižších než 0°C je pak přesnost $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Displej zobrazuje teploty s přesností na $0,1^{\circ}\text{C}$ a elektronický šum měřený na výstupu je $0,2^{\circ}\text{C}$. Optické rozlišení pro kruhovou stopu je 90:1. Zorné pole kamery zabírá 17° (horizontálně) \times $12,8^{\circ}$ (vertikálně). Integrační doba senzorů

je 1/20 s. K pozorování určité části objektu lze použít naváděcí laserový paprsek. Termogram je také možno částečně doostřit pomocí ovladače zaostření.

Pomocí Fluke Ti30 pořizovat teplotní obrazy – termogramy. Ty se zobrazují na LCD displeji. Na něm se kromě termogramu zobrazuje teplota v záměrném kříži. Dále je možno při jednotlivých měřeních nastavit hodnotu emisivity a kompenzaci záření odraženého od okolních objektů. Teplotám jsou přiřazovány barvy z nabízených barevných palet (odstíny šedé, odstíny železa, duha). Do vnitřní paměti přístroje lze uložit až 100 termogramů, které lze poté stáhnout do počítače k dalšímu zpracování.

Konstrukce kamery a její vlastnosti ji předurčují k použití při inspekcích, kontrolách a údržbách v odvětvích energetického, strojního a stavebního průmyslu. Z dalších oborů lze také aplikovat Fluke Ti30 například ve zdravotnictví. Zde je možné využití v diagnostice zánětů především pohybového aparátu, postižení cévního systému, nádorového bujení různých tkání (prsy, kost, štítná žláza) apod. Ve zdravotnictví se ale využívá jen jako doplňková metoda.

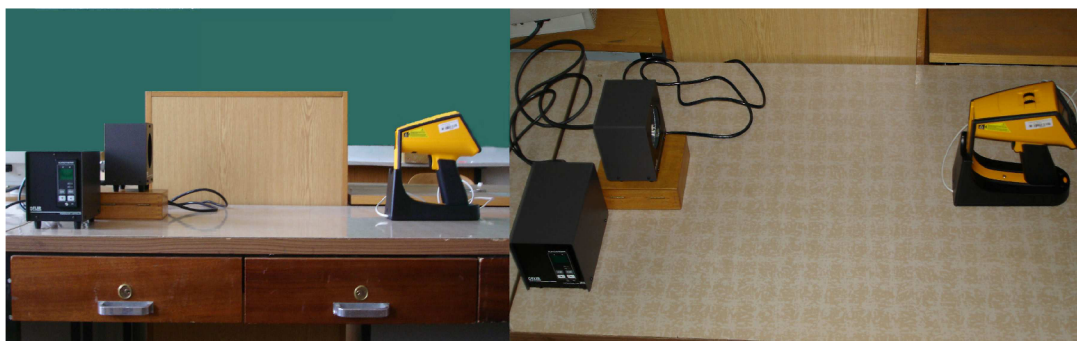


Obr. 8: Fluke Ti30

8.3 Metodika experimentu

Nejprve byla na kameře nastavena emisivita na hodnotu 0,98. Měření bylo prováděno v rozsahu teplot 26–80°C a to tak, že první hodnotou byla teplota 26°C, následně 30°C a pak další teploty s krokem 5°C. Bylo provedeno čtyřicet sad

měření v rozsahu uvedených teplot. Polovina byla získána postupným zvyšováním teplot od 26 do 80°C, druhá polovina pak postupným snižováním teploty od 80 do 26°C. Pro nastavenou teplotu černého tělesa byla zaznamenána teplota zobrazovaná na displeji kamery. Ta odpovídá teplotě měřené kamerou v centrální části pole detektorů. Kamera byla umístěna do vzdálenosti 60 cm od modelu černého tělesa. Tato hodnota reprezentuje nejmenší vzdálenost, na kterou dokáže kamera zaostřit, a zajišťuje zanedbatelný efekt vzhledem k absorpci ve vrstvě atmosféry mezi kamerou a černým tělesem. Při takové vzdálenosti zabírá plocha černého tělesa jen přibližně jednu pětinu obrazu. Z tohoto důvodu je nemožné kalibrovat ve stejnou dobu všechny senzory maticového detektoru. Výsledky v následujících odstavcích se proto vztahují pouze k centrální části pole detektorů. Dva pohledy na nastavení experimentu jsou na obr. 9.



Obr. 9: Kalibrace Fluke Ti30

8.4 Výsledky

Při zpracování výsledků byla předpokládána hypotéza, že naměřené hodnoty splňují podmínky normálně rozložené náhodné veličiny. Opakováním měření téže veličiny za stejných podmínek dochází díky náhodným a nekontrolovatelným odchylkám od skutečné veličiny. Takto vzniklé náhodné chyby se obvykle řídí zákonem normálního rozdělení. Normálně rozdělená náhodná veličina vzniká složením různých náhodných složek, vlivů a veličin, které jsou navzájem nezávislé, a každá z nich ovlivňuje výslednou veličinu jen malým příspěvkem.

Pro každou hodnotu teploty černého tělesa byly sestaveny četnostní diagramy teploty zobrazované termovizní kamerou. Následující grafy (obr. 10) ukazují pouze

histogramy pro teploty 26°C, 40°C a 70°C obou zkoumaných modelů kamer. Kromě histogramů byl pro každou teplotu černého tělesa vypočten odhad střední hodnoty normálního rozdělení (tedy aritmetický průměr naměřených hodnot), a to podle vztahu

$$T_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i,$$

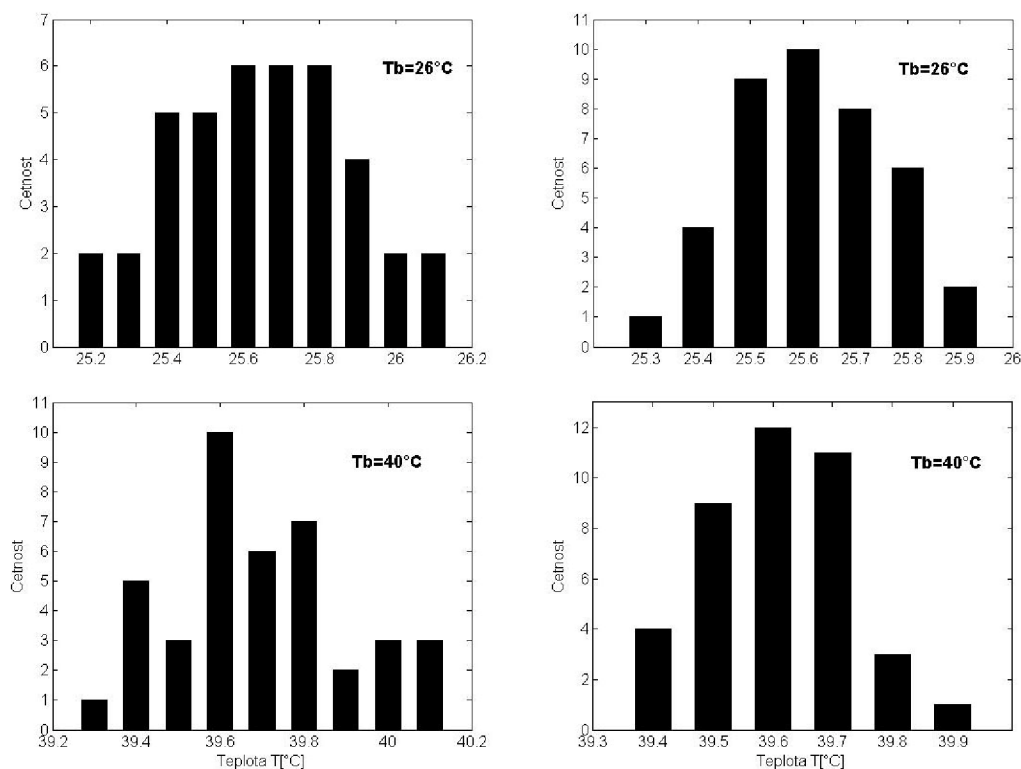
kde N je počet měření a T_i zastupuje jednotlivé teploty zobrazované termovizní kamerou. Dále byl vypočítán odhad směrodatné odchylky jednoho měření σ a odhad směrodatné odchylky aritmetického průměru δ podle rovnic

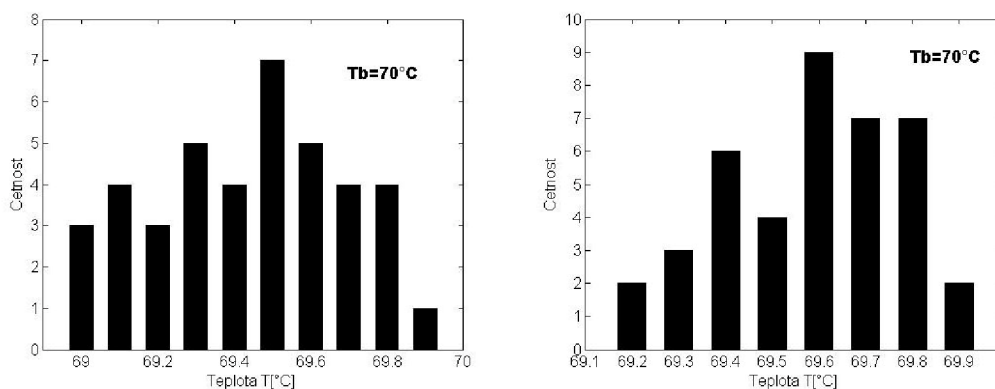
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - T_s)^2}, \quad \delta = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (T_i - T_s)^2}.$$

Jelikož chyba černého tělesa (viz tabulka 1) není mnohem menší než směrodatná odchylka aritmetického průměru, nelze ji zanedbat a musí být proto spočtena celková směrodatná odchylka měření podle vztahu

$$\delta_c = \sqrt{\delta^2 + \left(\frac{\Delta_b}{3}\right)^2},$$

kde Δ_b je chyba černého tělesa. Celková chyba měření byla obdržena vynásobením celkové směrodatné odchylky δ_c Studentovým koeficientem pro 39 stupňů volnosti a hladinu spolehlivosti 0,6827 ($k = 1,014$). Výsledky shrnují v tabulky 2 a 3.





Obr. 10: Histogramy četností teplot zobrazovaných termovizní kamerou pro teploty černého tělesa 26°C, 40°C, 70°C. V levém sloupci jsou histogramy pro model č.1, v pravém sloupci pro model č.2.

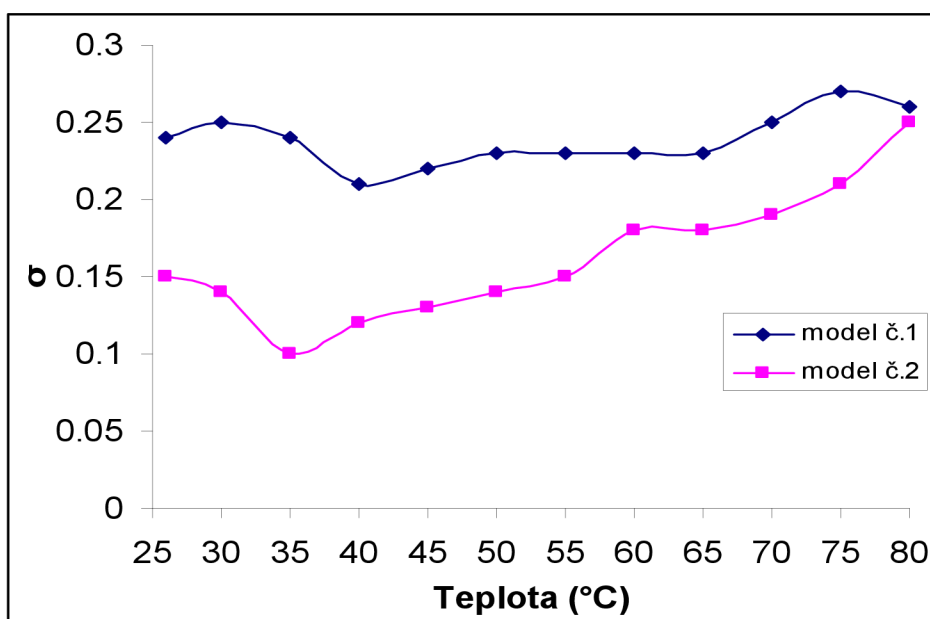
| $T_b(^{\circ}\text{C})$ | $T_s(^{\circ}\text{C})$ | $\sigma(^{\circ}\text{C})$ | $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ |
|-------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 26.00 | 25.60 | 0.24 | ± 0.27 |
| 30.00 | 29.60 | 0.25 | ± 0.27 |
| 35.00 | 34.60 | 0.24 | ± 0.27 |
| 40.00 | 39.70 | 0.21 | ± 0.27 |
| 45.00 | 44.60 | 0.22 | ± 0.27 |
| 50.00 | 49.60 | 0.23 | ± 0.27 |
| 55.00 | 54.60 | 0.23 | ± 0.27 |
| 60.00 | 59.60 | 0.23 | ± 0.31 |
| 65.00 | 64.40 | 0.23 | ± 0.31 |
| 70.00 | 69.40 | 0.25 | ± 0.31 |
| 75.00 | 74.40 | 0.27 | ± 0.32 |
| 80.00 | 79.30 | 0.26 | ± 0.31 |

Tab. 2

| $T_b(^{\circ}\text{C})$ | $T_s(^{\circ}\text{C})$ | $\sigma(^{\circ}\text{C})$ | $\Delta T(^{\circ}\text{C})$ |
|-------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 26.00 | 25.60 | 0.15 | ± 0.27 |
| 30.00 | 29.70 | 0.14 | ± 0.27 |
| 35.00 | 34.60 | 0.10 | ± 0.27 |
| 40.00 | 39.60 | 0.12 | ± 0.27 |
| 45.00 | 44.60 | 0.13 | ± 0.27 |
| 50.00 | 49.60 | 0.14 | ± 0.27 |
| 55.00 | 54.50 | 0.15 | ± 0.27 |
| 60.00 | 59.60 | 0.18 | ± 0.31 |
| 65.00 | 64.60 | 0.18 | ± 0.31 |
| 70.00 | 69.60 | 0.19 | ± 0.31 |
| 75.00 | 74.50 | 0.21 | ± 0.31 |
| 80.00 | 79.50 | 0.25 | ± 0.31 |

Tab. 3

Výše uvedené tabulky 2 a 3 shrnují výsledky kalibrace termovizních kamer Fluke Ti30. V tabulce 2 jsou zapsána kalibrační data pro model č.1, v tabulce 3 pak pro model č.2. T_b je teplota černého tělesa, T_s je střední hodnota teploty naměřené při dané teplotě černého tělesa, σ je směrodatná odchylka jednoho měření a ΔT je celková chyba měření.



Graf 3: Závislost směrodatné odchylky na teplotě černého tělesa.

Jak uvádí Money v [12], prostorový šum se týká po-kompenzačního šumu pozorovaného v termogramu. Jeví se jako struktura, která se mění obraz od obrazu a může se měnit v čase nebo se změnami pracovního prostředí. Používáním termínu prostorový šum se však spíše snažíme zdůraznit náhodný charakter této struktury. Ve skutečnosti je prostorový šum soubor nestejnorodostí v termogramu, které přetrvávají i po digitálním zpracování obrazu.

Ke zhodnocení hladiny šumu byl použit postup navržený Marinettin a popsany v [13]. Byly získány dva termogramy černého tělesa při téže teplotě a třetí byl získán jejich odečtením. Prostorový šum kamery byl poté odhadnut prostřednictvím parametru

$$\sigma_G = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j [C(i, j) - C_s]^2}{2N}},$$

ve kterém $C(i, j)$ je intenzita záření zaznamenaná senzorem o souřadnicích i, j v matici vzniklé odečtením dvou termogramů. C_s udává střední hodnotu a N celkový počet senzorů, u kterých byl šum stanovován. Protože kamera zobrazuje při zpracování teploty snímané jednotlivými senzory, musely být tyto hodnoty přepočítány na intenzitu vyzařování podle Stefanova-Boltzmannova zákona, aby mohly být výsledné hodnoty porovnány s hodnotami získanými Marinettim v [13] respektive Rainierim v [11]. Získané hodnoty jsou uvedeny v druhých sloupcích

tabulek 4 a 5. Kromě toho jsou ve třetích sloupcích těchto tabulek uvedeny směrodatné odchylky teplot testované matice senzorů, které jsou považovány za šum detektoru.

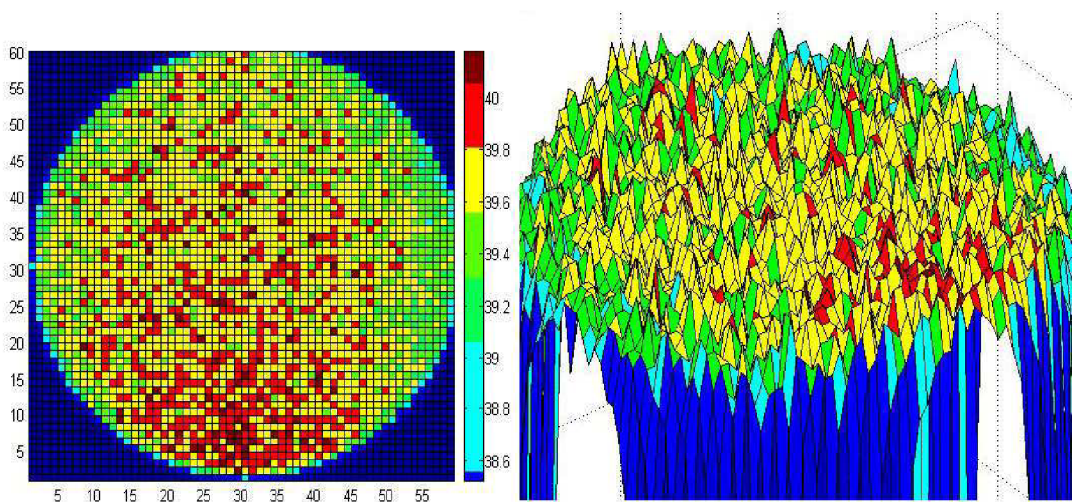
| T(°C) | σ_G | σ (°C) |
|-------|------------|---------------|
| 25.60 | 1.14 | 0.17 |
| 29.60 | 1.14 | 0.17 |
| 34.60 | 1.15 | 0.18 |
| 39.70 | 1.19 | 0.17 |
| 44.60 | 1.13 | 0.17 |
| 49.60 | 1.20 | 0.17 |
| 54.60 | 1.16 | 0.18 |
| 59.60 | 1.24 | 0.18 |
| 64.40 | 1.18 | 0.19 |
| 69.40 | 1.35 | 0.21 |
| 74.40 | 1.21 | 0.22 |
| 79.30 | 1.28 | 0.23 |

Tab. 4

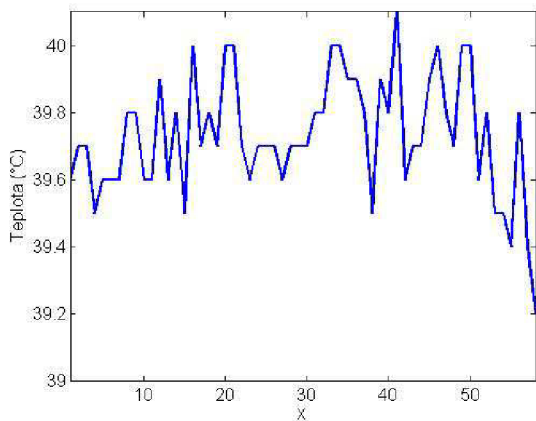
| T(°C) | σ_G | σ (°C) |
|-------|------------|---------------|
| 25.60 | 1.09 | 0.16 |
| 29.70 | 1.13 | 0.17 |
| 34.60 | 1.24 | 0.18 |
| 39.60 | 1.14 | 0.16 |
| 44.60 | 1.19 | 0.17 |
| 49.60 | 1.20 | 0.18 |
| 54.50 | 1.37 | 0.16 |
| 59.60 | 1.27 | 0.20 |
| 64.60 | 1.18 | 0.19 |
| 69.60 | 1.17 | 0.21 |
| 74.50 | 1.33 | 0.19 |
| 79.50 | 1.24 | 0.23 |

Tab. 5

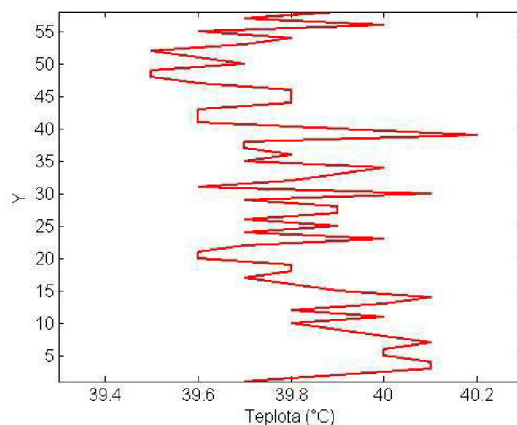
Hodnoty pro odchylky teploty a úroveň šumu založené na rovnici pro σ_G .



Obr. 11: Znárodnění šumu při zobrazování černého tělesa o teplotě 40°C termovizní kamerou. Různých teplotám jsou zde přiřazeny různé barvy. Vlevo se nachází dvojdimenzionální zobrazení, vpravo pak trojdimenzionální obraz.

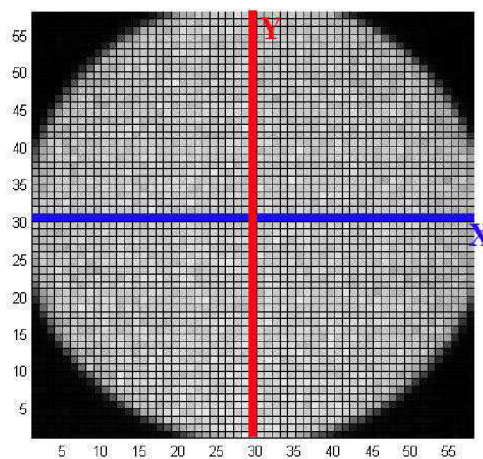


Graf 4



Graf 5

Teplotní profily podél os x,y při teplotě černého tělesa 40°C. Zvolení os je patrné z obr.12

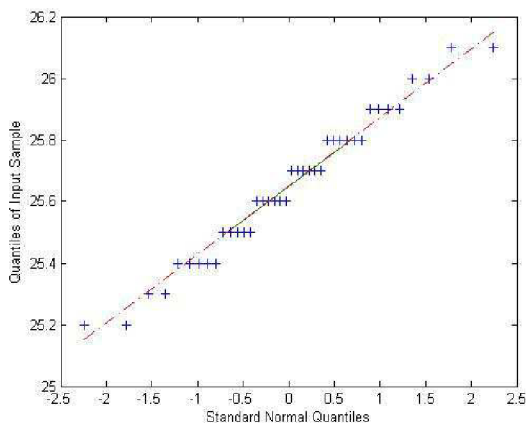


Obr. 12: Znárodnění os x,y na černém tělese. V grafech 4 a 5 jsou teplotní profily vytvořené podél těchto os.

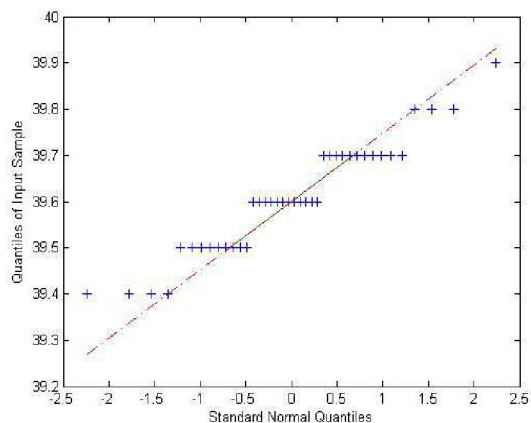
9. Diskuse

Při zpracování hodnot získaných pro kalibraci dvou modelů termovizních kamer byla předpokládána hypotéza, že tato data splňují podmínku normálně rozdělené náhodné veličiny. Potvrzení hypotézy patří k základním požadavkům pro následnou analýzu dat, testování vybočujících měření a testy na nezávislost jednotlivých prvků výběru. Pokud není zkoumaná hypotéza potvrzena, stává se vyhodnocení dat podstatně složitějším problémem. V této práci bylo k ověření normality získaných hodnot a jejich následnému zpracování využito programu Matlab. Ke zhodnocení normality dat byla vybrána metoda, při které se používá Q-Q (kvantil-kvantilový)

graf. Tato grafická metoda srovnává soubor zkoumaných dat tak, že vynáší na jednu osu data s normálním rozdělením a na druhou osu zkoumané hodnoty. V případě, že studovaný soubor dat má také normální rozdělení, je grafem závislosti přímka.



Graf 6



Graf 7

Q-Q grafy pro teploty černého tělesa 26°C (vlevo) a 40°C (vpravo) pro model č.1.

Na grafu 6 je vidět, že zkoumané hodnoty mají jen minimální odchylku od prokládané přímky. Z toho můžeme usoudit, že tento soubor dat velmi dobře splňuje podmínky normálního rozdělení. U grafu 7 jsou již významnější odchylky od prokládané přímky a i z obr. 10 (prostřední vlevo) je patrné, že naměřené hodnoty odpovídají normálnímu rozdělení s určitou odchylkou. Pro další ověření, že získaná data odpovídají normálnímu rozdělení, byl proveden z-test. Tento test pracuje tak, že ověří příslušnost zadaných dat k normálnímu rozdělení při stanovené střední hodnotě a směrodatné odchylce. Pro hladinu významnosti 5% bylo dokázáno, že všechny naměřené hodnoty splňují podmínky normálního rozdělení náhodné veličiny pro střední hodnoty a směrodatné odchylky uvedené v tab. 2 a 3.

Naměřené hodnoty byly uspořádány do četnostních histogramů, které byly porovnávány prvotně podle toho, jak se tvar histogramu podobá Gaussově křivce. Ke kvantifikaci byla použita p-hodnota. Ta udává pravděpodobnost náhodného pozorování daného výsledku, když je splněna hypotéza normálního rozdělení zkoumané veličiny. Získané p-hodnoty ukazují, že pro model č. 2 se nejvyšší pravděpodobnosti vyskytují pro teplotu černého tělesa do 50°C a nabývají hodnot okolo 70%. Při teplotách nad 50°C se pravděpodobnost snižovala až na hodnotu

kolem 30% a při teplotě 65°C byla zjištěn pravděpodobnost pozorování dané veličiny z 10%. U modelu č.1 termovizní kamery nebyla pozorována žádná takováto závislost teploty černého tělesa na pravděpodobnosti pozorování výsledku. Maximální hodnoty nabývala pro teplotu 30°C (90%) a minimální pro 35°C (19%). V ostatních případech se hodnota pravděpodobnosti pohybovala v rozmezí 30 – 70%, a to bez jakékoliv závislosti na teplotě černého tělesa.

Ke zhodnocení přesnosti měření termovizních kamer nejlépe poslouží hodnoty uvedené v tab. 2 a 3. Z nich je patrné, že získané hodnoty jsou ve většině případů o 0,4°C nižší než je teplota černého tělesa. Lze také vyčíst, že tyto odchylky rostou se stoupající teplotou černého tělesa. Maximálních hodnoty dosahují tyto odchylky pro teplotu 80°C (0,7°C u modelu č.1). Výrobce stanovená chyba měření je u této kamery $\pm 2^\circ\text{C}$ nebo $\pm 2\%$, a to vždy vyšší hodnota. Mnou zjištěné hodnoty, které se nacházejí ve čtvrtém sloupci tab. 2 a 3, se pohybují v oblasti 0,27–0,31°C (to je 1,1–0,4%). Není bez zajímavosti, že hodnoty jsou velmi podobné pro oba modely termovizních kamer a že je možno pozorovat závislost chyby měření na teplotě černého tělesa. V oblasti 55–60°C se chyba měření mění skokem z hodnoty 0,27°C na 0,31°C. Tuto náhlou změnu chyby měření lze vysvětlit tak, že detektor je kalibrován s danou přesností jen na určitý rozsah teplot a lze tedy předpokládat, že s dalším zvyšováním teploty kalibračního zdroje by při určité teplotě došlo opět ke změně chyby měření skokem. Pro úplnost je nutno dodat, že dané chyby měření jsou udány pro hladinu spolehlivosti 68,27%. Z tohoto důvodu je také celková chyba měření nižší než chyba měření kalibračního zdroje uvedená v tab. 1, ve které jsou uvedeny hodnoty pro hladinu spolehlivosti 99,73%. Pokud přepočítáme chybu měření termovizních kamer na stejnou hladinu spolehlivosti dostaneme interval 0,91–1,01°C (tj. 3,55–1,27%).

Přesnost měření lze také posoudit z grafu 3, který obsahuje závislost směrodatné odchylky jednoho měření na teplotě černého tělesa. Stojí za zmínku, že nejnižší hodnoty nabývá pro teploty 30°C resp. 35°C. Tato minimální hodnota může být interpretována jako zbytková porucha v signálu neboli šum, který limituje možnosti přístroje a který je s největší pravděpodobností závislý na příslušných pracovních charakteristikách, jako jsou např. podmínky okolního prostředí. Další možným vysvětlením je aplikace výsledků J. M. Bakera, který v [14] dokázal pro teploty

20°C a 30°C, že k nejlepší shodě s kalibrační křivkou udávanou výrobcem a tudíž nejmenší chybě dochází, když je teplota matice detektorů shodná s teplotou zkoumaného objektu.

Při snímání černého tělesa termovizní kamerou za jeho konstantní teploty se ukázalo, že pro jednotlivé senzory napříč maticí se detekované hodnoty teplot významně liší. Toto chování může být způsobeno nerovnoměrností v citlivosti pole senzorů nebo šumem pozadí přítomného při procesu měření. Mimo to bylo pozorováno, že rozsah teplot, které detektor zaznamenal při stálé teplotě černého tělesa, je větší pro vyšší teploty černého tělesa. Pro teplotu 80°C tak byl rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou zaznamenanou detektorem na kalibrované oblasti 1,6°C. Naproti tomu pro teplotu 26°C byl tento rozdíl 0,8°C. Nehomogenity detektoru jsou patrné z obr. 10, který zobrazuje dvojdimenzionální a trojdimenzionální pohled na kalibrovanou oblast při teplotě 40°C. Jednotlivým teplotám jsou přiřazeny různé barvy. Na grafech 4 a 5 jsou pak znázorněny teplotní profily, které ukazují nehomogenity podél souřadných os. Osy byly zvoleny tak, že osa x prochází středem kalibrované oblasti ve směru horizontálním a osa y ve směru vertikálním. Z těchto grafů lze vyčíst, že rozložení teplot je v obou směrech nahodilé. Pro kvantifikaci nestejnomyšerného rozložení teploty napříč maticí detektoru byla pro všechny teploty černého tělesa vypočtena směrodatná odchylka a ta byla dále považována za šum měření. Získané hodnoty jsou ve třetích sloupcích tab. 4 a 5. Z nich je patrné, že hodnoty rostou se zvyšováním teploty kalibračního zdroje a jsou v podstatě shodné pro oba zkoumané modely. Ještě je třeba doplnit, že získané velikosti šumu měření se velmi dobře shodují s hodnotami udávanými výrobcem. Ten určuje šum měření na hodnotu 0,2°C.

K posouzení hladiny šumu měření byla použita metoda navržená Marinettim v [13]. Šum kamery byl poté stanoven pomocí parametru σ_G , jehož výpočet je uveden v předchozí kapitole. Získané hodnoty pro σ_G , které jsou uvedeny v tab. 4 a 5, jsou blízké hodnotám získaným Rainierim v [11] pro FLIR System PRISM DS s PtSi maticovým detektorem, který získal σ_G v rozsahu 1,11–1,71, a to pro teploty 10,3–49,7°C.

Kromě výše uvedených výsledků měření je třeba zmínit, že při kalibraci se vyskytl problém při získávání dat. Za konstantní teploty černého tělesa došlo při zmrazení obrazu ke změně teploty v centrální části matice detektoru, která je zobrazována na displeji. Tato náhlá změna teploty byla co do velikosti náhodná a dosahovala rozdílu až 1°C od teploty zobrazované na displeji termovizní kamery před zmrazením obrazu. Mimo to nebyla objevena ani žádná závislost změny teploty na teplotě kalibračního zdroje. Jev byl pozorován u obou zkoumaných modelů termovizních kamer s tím, že u modelu č.1 se tyto změny vyskytovaly více. Nebyla nalezena žádná závislost, která by danou vlastnost uspokojivě vysvětlila, a proto je tato vlastnost považována za problém související s konstrukcí termovizní kamery Fluke Ti30.

10. Závěr

V této práci je prezentována kalibrace dvou modelů termovizní kamery Fluke Ti30 s mikrobolometrickým maticovým detektorem umístěným v ohniskové rovině optické soustavy. Kalibrace byla prováděna porovnáváním teploty nastavené na modelu černého tělesa s teplotou zobrazovanou termovizní kamerou. Vzhledem k tomu, že rozměry černého tělesa neumožňovaly kalibraci celé matice detektorů najednou, byla kalibrována jen jeho centrální oblast odpovídající senzorům, na kterých se černé těleso zobrazovalo.

Měření bylo provedeno v rozsahu teplot $26\text{--}80^{\circ}\text{C}$. Ze získaných dat byly stanoveny charakteristiky, které popisují přesnost měření. Z výsledků lze usoudit, že model č.2 se při měření jevil jako přesnější. Dále byl stanoven šum měření. Zde není možné posoudit, který ze zkoumaných modelů byl přesnější, protože oba vykazovaly v podstatě stejné výsledky. Hlavním problémem při kalibraci se jevila náhlá změna teploty v centrální části detektoru při zmrazení obrazu. Ta byla nakonec posouzena jako nedostatek související s konstrukcí kamery.

Fluke Ti30 lze s úspěchem používat všude tam, kde je třeba bezkontaktního měření tepelných polí a kde není vyžadována absolutní přesnost měření. V případech, kdy testované objekty se liší teplotou v řádu $0,1^{\circ}\text{C}$, nelze její použití doporučit.

Literatura

- [1] Levitin I. B.: Infračervená technika, ALFA – Bratislava 1973
- [2] Kreidl M.: Měření teploty senzory a měřicí obvody, BEN – Praha 2005
- [3] Lloyd J. M.: Systémy teplovidění, Mir – Moskva 1978
- [4] Optical society of America: Handbook of Optics, McGraw-Hill – USA 1994
- [5] Kolektiv autorů: Fluke Ti30 Users manual, Test equipment depot – USA 2005
- [6] Meloun M., Militký J.: Statistické zpracování experimentálních dat, Ars magna – Praha 1998
- [7] Pánek P.: Úvod do fyzikálních měření, Vydavatelství MU – Brno 2001
- [8] Kolektiv autorů: Zpravodaj pro měření a regulaci, číslo 1, 2.vydání, [online]. (http://www.newport.cz/techinfo/PDF/techinfo_1.pdf)
- [9] Vojáček A.: Co jsou bolometry a mikrobolometry?, [online]. (<http://automatizace.hw.cz/view.php?cislocianku=2005111601>)
- [10] Kadlec K.: Bezdotykové teploměry, [online]. (<http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html>)
- [11] Rainieri S.: Data processing technique applied to the calibration of a high performance FPA infrared camera, Infrared Physics and Technology 43 (2002) [online]. (<http://www.elsevier.com/locate/infrared>)
- [12] Mooney J. M.: Charakterizing IR FPA nonuniformity and IR camera spatial noise, Infrared Physics and Technology 37 (1996) [online]. (<http://www.elsevier.com/locate/infrared>)
- [13] Marinetti S.: Calibration procedure for focal plane array cameras and noise equivalent material loss for quantitative thermographic NDT, Material Evaluation 3 (1997).
- [14] Baker J. M.: A new approach to infrared thermometry, Agricultural and Forest Meteorology 108 (2001) [online]. (<http://www.elsevier.com/locate/agrformet>)
- [15] Griffith B.: Infrared Thermographic Systems, The Encyclopedia of Imaging Science and Technology (2001) [online]. (<http://btech.lbl.gov/papers/46590.pdf>)
- [16] Sharma U.: Infrared detectors, M. Tech Credit Seminar Report, Electronic System Group, EE Dept, IIT Bombay (2004).

- [17] Rogalski A.: Infrared devices and techniques, Opto-electronics review 10(2) (2002) [online].
([http://www.wat.edu.pl/review/optor/10\(2\)111.pdf](http://www.wat.edu.pl/review/optor/10(2)111.pdf))
- [18] Mikron: Infrared Thermometers: Theory and Construction, [online].
(http://www.mikroninfrared.com/mikron_university/IR_Sensor_Construction.pdf)
- [19] About thermal imaging (Infrared Thermography) [online].
(<http://www.temperatures.com/thermalimaging.html>)
- [20] Metody bezdotykového měření teploty (2.díl), [online].
(<http://www.mmspektrum.com/tisk.php?idcl=041278>)
- [21] IR thermometers and Pyrometers, [online].
<http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/thermometers3.html>
- [22] What is a Blackbody and Infrared Radiation?, [online].
(<http://www.electro-optical.com>)