



Termovizní měření teplotních polí

přednáška pro FEL ČVUT

Jan Sova, Workswell s.r.o.

<http://www.termogram.cz>

<http://www.workswell.cz>

Základní seznámení s problematikou

- ▶ Termovizní měření teplotních polí (dále termovize) je jednou z metod nedestruktivní diagnostiky.
- ▶ Zabývá se zobrazováním teplotních polí z povrchů měřených objektů.
- ▶ K tomu se používá tzv. **termovizní kamera**. Princip termovizní kamery je velmi podobný klasické kameře od které se liší především:
 - ▶ typem (případně i principem) detektoru,
 - ▶ optikou (sklo klasických čoček špatně propuští IR záření).
- ▶ Jaký je princip vyzařování předmětů v infračerveném spektru? Jak souvisí teplota objektu s tímto vyzařováním.

Vyzařování předmětů v infračerveném spektru

- ▶ Velice obecně si můžeme představit, že každý objekt se skládá z tzv. kvantových systémů (tj. atomů a jiných částic v různém stavu a uspořádání).
- ▶ Tyto kvantové systémy na základě různých principů a dějů generují fotony, tj. elementární částice elektromagnetického záření.
- ▶ Max Planck kolem roku 1900 odvodil spektrální hustotu vyzařování absolutně černého tělesa (k tomuto pojmu se vrátíme).
- ▶ **Pozn.** *analýza vyzařování objektů stála u zrodu kvantové fyziky a vedla Maxe Plancka a Alberta Einsteina k položení teoretických základů tohoto oboru.*

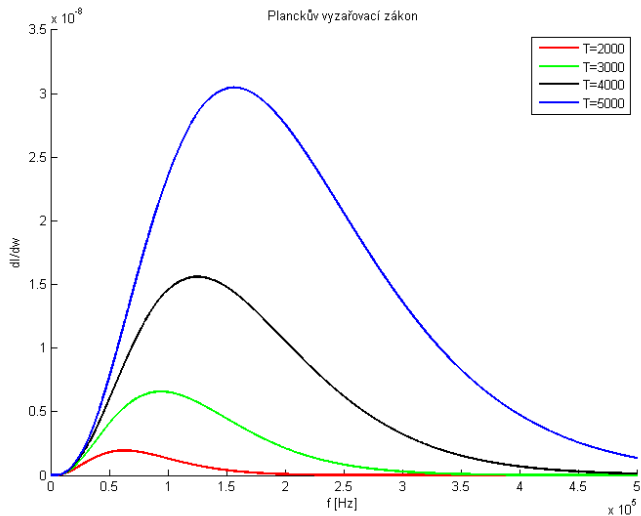
Planckův vyzařovací zákon

- ▶ **Tepelné vyzařování** je převážně důsledkem děje, při němž atomy látky získávají vlivem tepelného pohybu vyšší energii a tu pak v podobě fotonů vyzařují. V případě tzv. černých a šedých těles je spektrální intenzita tohoto záření závislá na povrchové teplotě tělesa podle **Planckova vyzařovacího zákona**:

$$M_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad \text{kde} \quad (1)$$

- ▶ $M_{0\lambda}$ je spektrální hustota intenzity záření černého tělesa,
- ▶ $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$,
- ▶ $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$,
- ▶ λ je vlnová délka záření,
- ▶ T je teplota povrchu tělesa.

Vyzařování absolutně černého tělesa



Obrázek: Vyzařování absolutně černého tělesa pro různé teploty T .

Infračervená kamera (termokamera)

- ▶ Vytváří obraz (termogram) na základě povrchem tělesa emitovaného infračerveného záření.
- ▶ Vlastní měření záření emitovaného povrchem objektu se provádí pomocí speciálních fotodetektorů (tzv. bolometrů a polovodičových detektorů) pracujících v oblatech 7,5 až 13 μm .



Obrázek: Termovizní kamera Flir T335

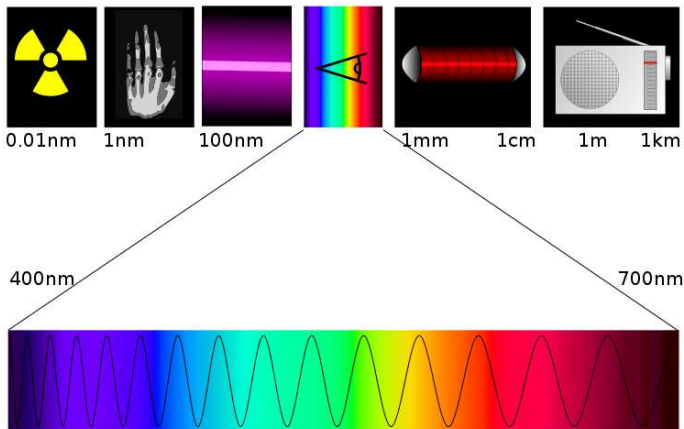
Parametry kamery Flir T335

- ▶ **Zorné pole:** $25^{\circ} \times 19^{\circ}$
- ▶ **Teplotní citlivost:** $< 0.05^{\circ}\text{C}$
- ▶ **Detektor:** 320×240 pixelů (bolometr)
- ▶ **Teplotní rozsah:** -20 až $+650^{\circ}\text{C}$ (s vysokoteplotním filtrem až $+1200^{\circ}\text{C}$)
- ▶ **Spektrální rozsah:** $7,5$ až $13\ \mu\text{m}$
- ▶ **Doba výdrže baterie:** 4 hodiny v nepřetržitém provozu
- ▶ **Hmotnost:** 880 g včetně akumulátoru
- ▶ vestavěná digitální videokamera 3,1 Mpix, laserový zaměřovač, světlo pro přisvícení, funkce obraz v obraze, dotykový displej

Je čas na praktickou ukázkou!

Další výklad bude následovat po této ukázce

Spektrum elektromagnetického záření



Obrázek: Spektrum elektromagnetického záření.

► kvantem je foton, viz fotoelektrický jev dále



Vybrané pojmy a jevy

- ▶ emisivita, spektrální emisivita
- ▶ absolutně černé těleso, šedé těleso, selektivní zářič
- ▶ bolometr, detektor záření
- ▶ termogram, termovizní snímek, protokol o termovizním měření
- ▶ spektrální pohltivost atmosféry a plynů,
- ▶ elektromagnetické záření a jeho spektrum, foton, infračervené záření
- ▶ tepelný odraz, radiační teplota okolí

Základní fyzikální zákony

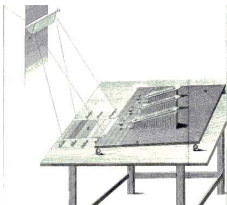
- ▶ **Kirchhoffův zákon termální radiace**
- ▶ **Planckův vyzařovací zákon (Stefan-Boltzmannův zákon, Wienův posunovací zákon)**
- ▶ Radiometrie a radiometrické veličiny
- ▶ Lambertův zákon
- ▶ Maxwellova teorie elektromagnetického pole
- ▶ **Fotoelektrický jev**
- ▶ Zákony popisující chování tepla a ochlazování (Newtonův ochlazovací zákon, Fourierův zákon apod.)

Vybrané aplikace termovize

- ▶ stavebnictví
- ▶ hledání hot-spotů na fotovoltaických panelech
- ▶ medicína, veterinární medicína
- ▶ diagnostika elektrických strojů a zařízení
- ▶ teplovody, rozvody tepla
- ▶ ekologie
- ▶ a řada dalších

Počátky měření v IR oblasti

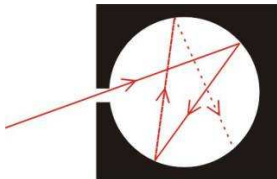
- ▶ Kolem roku 1800 experimentoval Herschel v Anglii se slunečním světlem, kdy pozoroval Slunce přes různě barevná skla a všiml si, že tepelný vjem není vždy stejný.
- ▶ Při pokusu posunul teploměr až za konec červené složky světa teplota vzrostla ještě více než v kterémkoliv z předchozích případů. Tato „neviditelná složka“ světla byla pojmenována infračervená (tj. pod červenou).



Obrázek: Znázornění Herschelova pokusu.

Kirchhoffův zákon a absolutně černé těleso

- ▶ **První Kirchhoffův zákon:** součet spektrální odrazivosti ρ_λ , spektrální pohltivosti α_λ , spektrální propustnosti τ_λ je jedna ($\rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda = 1$).
- ▶ **Druhý Kirchhoffův zákon:** předmět je tak dokonalým zářičem, jak dovede záření pohlcovat ($\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$).
- ▶ Absolutně černé těleso je definováno, jako těleso, které zcela pohlcuje veškeré elektromagnetické záření, které na něj dopadá.



Další zákony

- ▶ **Stefan-Boltzmannův zákon:** Stefan-Boltzmannův zákon umožňuje určit celkovou intenzitu záření I absolutně černého tělesa v závislosti na jeho teplotě: $I = \sigma T^4$, kde T je termodynamická teplota absolutně černého tělesa a $\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$.
- ▶ **Wienův posunovací zákon:** Diferenciací Planckova vyzařovacího vztahu podle proměnné λ a nalezení maxima této funkce získáme vztah: $\lambda_{max} = \frac{2898}{T}$, kde T je termodynamická teplota absolutně černého tělesa a λ_{max} je poloha maxima intenzity záření absolutně černého tělesa při dané teplotě.
- ▶ **Fotoelektrický jev:** $E = h\nu$, kde h je Planckova konstanta a ν je frekvence záření. Kvantem záření je foton.

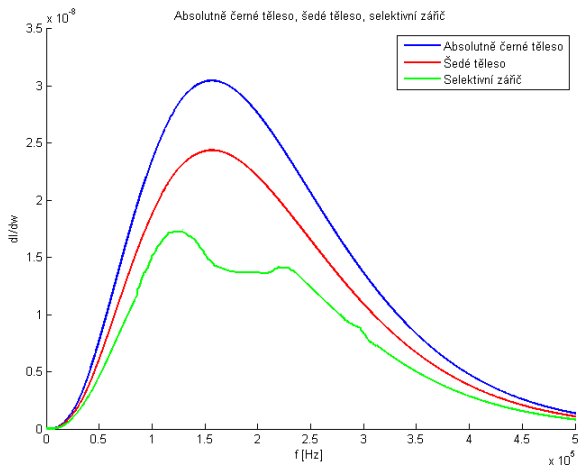
Emisivita, černé a šedé těleso, selektivní zářič

- ▶ Emisivita ϵ_λ je poměr mezi energií W_λ spektrálního zářiče skutečného (reálného) objektu a energií absolutně černého tělesa $W_{\lambda 0}$ při stejné vlnové délce a teplotě:

$$\epsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda 0}}. \quad (2)$$

- ▶ **Emisivita** je obecně funkcí vlnové délky. U tzv. **šedých těles** si vystačíme bez uvažování této frekvenční závislosti, u tzv. **selektivních zářičů** je třeba uvažovat emisivitu jako funkci vlnové délky.
- ▶ Mohlo by se zdát (a různé tzv. tabulky emisivit tomuto zdání napomáhají), že emisivita je konstantní. Ve skutečnosti emisivita závisí na všech představitelných parametrech: úhlu odklonu od normály povrchu, teplotě, vlnové délce, barvě povrchu, struktuře povrchu apod.

Vyzařování černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče

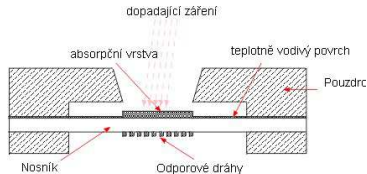


Obrázek: Vyzařování absolutně černého tělesa, šedého tělesa a selektivního zářiče.

Detektory infračerveného záření

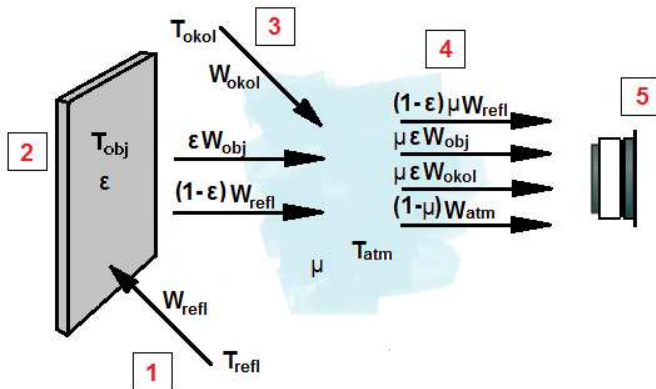
Detektory dle interakce fotonů s materiálem detektoru členíme na tepelné a kvantové. Z tepelných FPA detektorů se používají tzv. mikrobolometry, kdy absorbcí fotonů dochází k oteplení odporové vrstvy, čímž dochází ke změně elektrického odporu, který je následně vyhodnocen.

V případě tzv. kvantových detektorů je princip detekce fotonů v infračervené oblasti založen na fotoelektrickém jevu: tj. přímé přeměně energie fotonů na elektrickou energii. Konstrukce těchto detektorů je však vzhledem k řadě fyzikálních skutečností poměrně náročná.



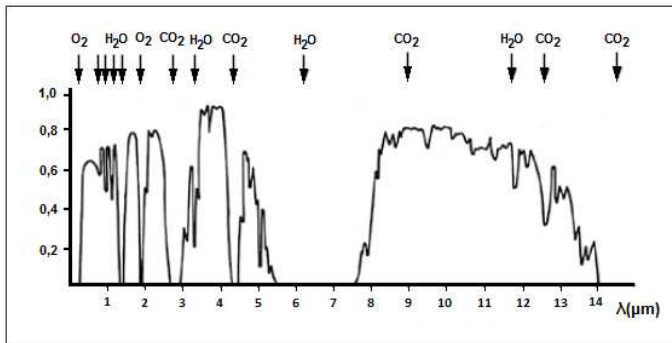
Obrázek: Schematický náčrt bolometru.

Obecná situace při termovizním měření



Obrázek: Obecná situace při termovizním měření.

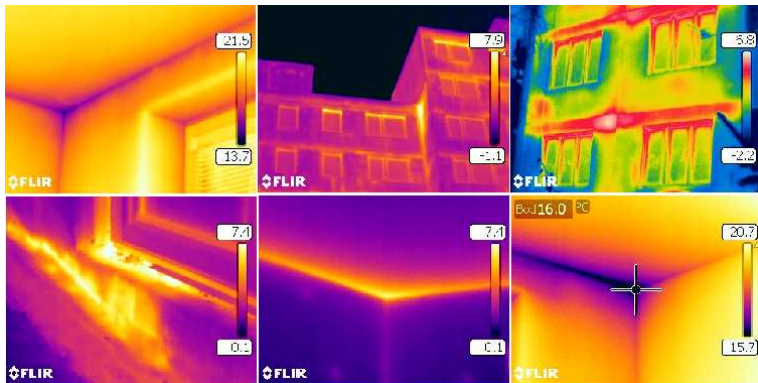
Spektrální propustnost ovzduší



Obrázek: Spektrální propustnost ovzduší.

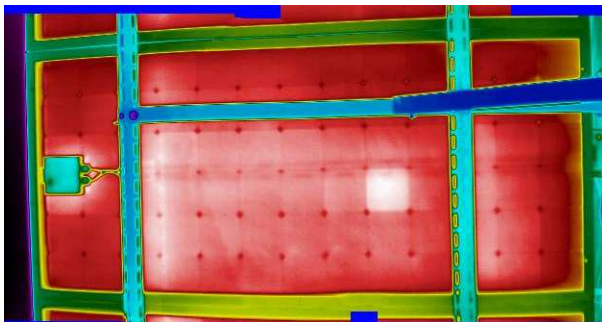
Termovize ve stavebnictví

- ▶ Detekce a lokalizace tepelných mostů, lokalizace netěsnosti vzduchotěsné obálky budovy.
- ▶ Oteplování a ochlazování konstrukce během různých dějů.
- ▶ Lokalizace rozvodů chlazení a tepla, vyhledávání zkratů v elektrickém vedení.



Termovize v energetice - fotovoltaické elektrárny

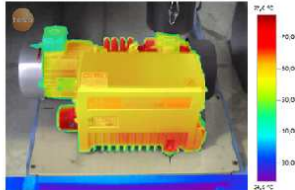
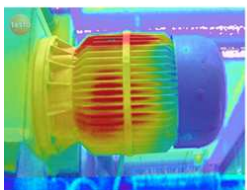
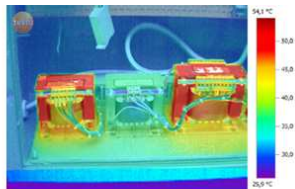
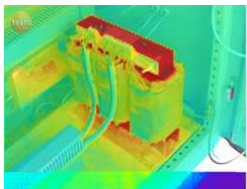
- ▶ Přehřívání na vedení vysokého napětí.
- ▶ Hledání hot-spotů na fotovoltaických panelech.



Obrázek: Termogram solárního panelu s hot-spoty.

Termovize při diagnostice elektrických strojů a zařízení

- ▶ Velice široké spektrum využití. Měřený objekt musí pracovat při jmenovitém nebo provozním zatížení.
- ▶ Přetěžování, zkrat, přehřívání rozvaděčů a jisticích prvků, mechanické namáhání, přechodové odpory (včetně vysílacích antén), nedostatečné chladnutí, stárnutí prvků apod.

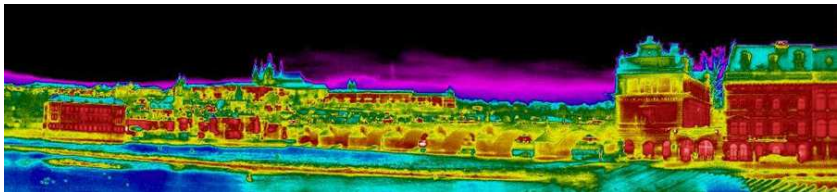


Termovize v medicíně

- ▶ Tepelná symetrie těla.
- ▶ Hojení ran.
- ▶ Prokrvení tkání, nádorové onemocnění (v současné době především mamografie).
- ▶ Odezva těla na lokální zahřátí.
- ▶ Diagnostika poškození těla z přetížení.
- ▶ Svaly, šlachy, šlachové pochvy, vazy, úpony, kloubní pouzdra, kosti, uzliny, cévy a jiné vnitřní orgány.

Děkuji vám za pozornost!

Prostor pro diskuzi.



Pro hloubavé

- ▶ termovize NEMĚŘÍ teplotu
- ▶ termovize NEUKAZUJE tepelné ztráty
- ▶ termovize NEUKAZUJE spotřebu tepla
- ▶ termovize NEUKAZUJE tepelné odpory
- ▶ termovize NEODHALUJE možný výskyt plísní
- ▶ termovize NEUKAZUJE oblasti kondenzace vodní páry
- ▶ termovize NEUKAZUJE tepelné mosty
- ▶ termovize NEPROKAZUJE kvalitu konstrukce
- ▶ termovize NEDIAGNOSTIKUJE rakovinu
- ▶ ...