

Jak změřit teplotu Měsíce?

Vladislav Lang
Západočeská univerzita v Plzni

ABSTRAKT

V příspěvku jsou ukázány možnosti dostupných termokamer pro měření teploty povrchu objektu nám vzdáleného statisíce kilometrů - Měsíce. Ukázány jsou dva možné přístupy k vyhodnocení termogramu, ve výuce použitelnější kvalitativní a významně složitější kvantitativní. Vlastní vliv termokamery na měření objektů zabírajících jen několik pixelů je ukázán na jednoduchém pokusu, který je snadné ve výuce realizovat.

ÚVOD

Termokamera umožňuje stanovit teplotu povrchu těles vzdálených několik centimetrů až statisíce kilometrů. Toto veliké rozmezí je dáno podstatou fungování termokamery, která zobrazuje intenzitu elektromagnetického záření z oblasti infračerveného spektra, které je jinak pro lidské oko neviditelné. Zdrojem tohoto infračerveného záření jsou veškerá tělesa kolem nás, která mají teplotu povrchu vyšší, než je 0 K (absolutní nula). Připočte-li se ještě to, že elektromagnetické záření se

šíří i ve vakuu, je termokamera nástrojem, kterým je možné stanovit povrchovou teplotu těles i mimo naši Zemi, například povrchovou teplotu Měsíce. Můžeme si pak dovolit tvrdit, že na nás Měsíc září, což si většina žáků a studentů neuvědomuje, v obecném povědomí mají, že Měsíc jen odráží záření Slunce.

POKUS Č. 1

Stanovení teploty povrchu Měsíce

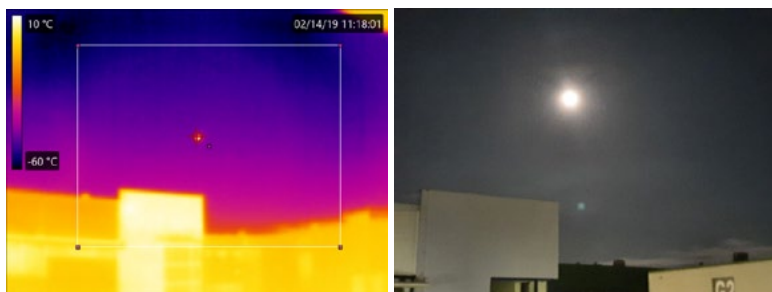
POMŮCKY

- Termokamera, lze zapůjčit v zápůjčních centrech platformy LabIR EDU [1],
- USB Flash disk pro uložení termogramu,
- volitelně LabIR software, lze bezplatně stáhnout [2].

POSTUP

Stanovení teploty povrchu Měsíce je nejlépe zrealizovat při úplňku a bezmračné, jasné noční obloze. Uvedeným se zajistí, že měřený objekt je zaznamenanatelný i termokamerou s objektivem o větším úhlu záběru (označuje se FOV Field of View) jako má například termokamera TIMI EDU [3] (FOV = 57°), ideální by bylo samozřejmě použití teleobjektivu s úhlem záběru menším než 10°.

Ideálně termokameru zapněte minimálně 20 minut před vlastním měřením a umístěte ji do venkovního prostoru, kde budete měření realizovat, aby se její vnitřní teplota stabilizovala.

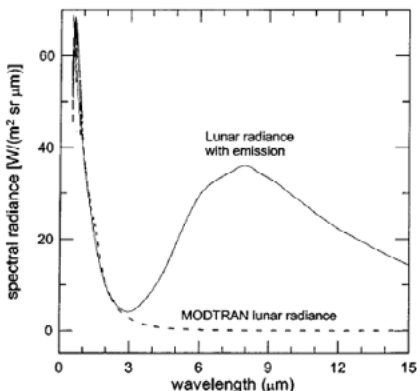


Obr. 1: Noční obloha s Měsícem v infračerveném a viditelném spektru - termokamera TIMI EDU.

K uvedenému měření je vhodné přistoupit nejprve jen kvalitativním způsobem, tj. hledají se teplotní anomálie = barevné anomálie v termogramu bez číselného vyhodnocení teploty (předpokladem je stejná emisivita zkoumaného povrchu/scény). Pro snadnější identifikaci teplotní anomálie – Měsíce na noční obloze je vhodné si vytvořit na displeji termokamery velkou obdélníkovou analýzu a aktivovat si hledání polohy maximální teploty, které nám pomůže Měsíc snadněji zviditelnit viz. obr. 1.

VYSVĚTLENÍ

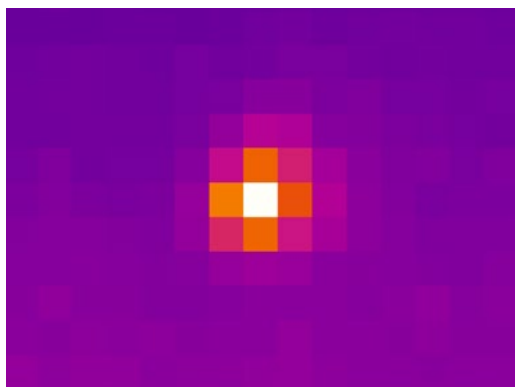
Termogram uvedený na obr. 1 potvrzuje, že od Měsíce k nám se šíří infračervené záření v intervalu vlnových délek úměrných spektrální citlivosti snímače termokamery TIMI EDU, tj. 8 až 14 mm. Z uvedeného není možné určit, zda je to odražené záření Slunce nebo vlastní vyzařování Měsíce. Klasické postupy stanovení odraženého záření uváděné například v normě ČSN ISO 18434-1 [4] zde z důvodu pro nás velmi komplikované dosažitelnosti měřeného objektu – Měsíce, nemůžeme použít. Rozhodnutí, co je dominantním zdrojem infračerveného záření, které termokamerou zaznamenáváme, je možné podpořit podklady uváděnými v literatuře [5].



Obr. 2: Spektrální záření Měsíce v úplňku vně atmosféry Země [5], čárkovaně bez zahrnutí vyzařování Měsíce, plná čára se zahrnutím vyzařování Měsíce.

Z grafu spektrálního záření Měsíce uvedeném na obr. 2, je zřejmý výrazně větší podíl vlastního vyzařování Měsíce v porovnání se zářením odraženým pro oblast vlnových délek 8 až 14 μm . Infračervené záření Měsíce zaznamenané termokamerou je hlavně emitované povrchem Měsíce, a tedy je úměrné jeho povrchové teplotě.

Pokud bychom chtěli toto měření vyhodnotit kvantitativně, tj. stanovit skutečnou povrchovou teplotu Měsíce, bylo by nebytné použít jiný typ termokamery, která bude mít minimálně teleobjektiv, tj. úhel záběru menší než 10° , protože u termokamer s velkým úhlem záběru TIMI EDU zaujímá Měsíc jen jeden pixel, viz. obr. 3.



Obr. 3: Detail termogramu Měsíce – termokamera TIMI EDU.

To jestli je nebo není pro stanovení teploty objektu jeho velikost zaujímaví 1 pixel na detektoru termokamery dostatečná, se ověří ve třetím pokusu.

PS: Kvantitativní měření teploty povrchu Měsíce zahrnuje větší množství činností, které je potřeba uskutečnit pro vyhodnocení teploty.

POKUS Č. 2

Kvantitativní stanovení teploty povrchu Měsíce

POMŮCKY

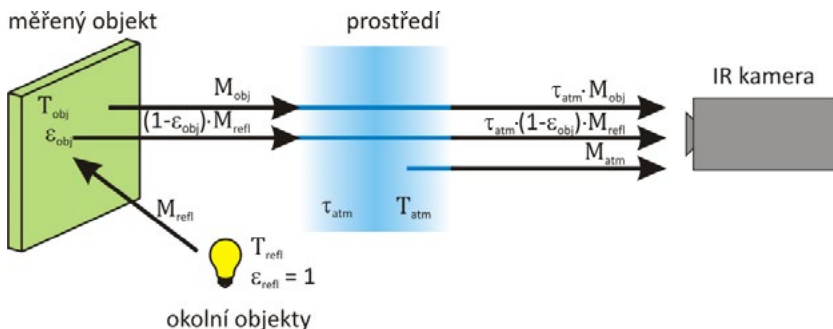
- Termokamera s rozlišením minimálně 640 × 480 px a s objektivem s FOV < 20°,
- LabIR software, lze bezplatně stáhnout [2].

POSTUP

Postup je identický jako při kvalitativním vyhodnocení měření teploty Měsíce. Stanovení teploty povrchu Měsíce je nejlépe zrealizovat při úplňku a bezmračné, jasné noční obloze. Pro tento experiment je nutné použít termokameru s teleobjektivem. Termokameru zapněte minimálně 20 minut před vlastním měřením a umístěte ji do venkovního prostoru, kde budete měření realizovat, aby se její vnitřní teplota stabilizovala.

Parametry pro vyhodnocení termogramu nastavte následující: emisivita $\varepsilon = 0,95$, bývá uváděna i vyšší [5,6]; transmisivita atmosféry $\tau = 0,6$, případně si můžete v software Modtran [7] vypočítat propustnost atmosféry pro Vaše podmínky, teplotu atmosféry T_{atm} na reálnou teplotu vzduchu, teplotu pozadí, používá se i termín odražená zdán-

lívá teplota, v tomto případě se jedná o infračervenou složku, interval indenty se spektrálním rozsahem detektoru v použité termokameře, elektromagnetického záření přicházející ze Slunce a odražené k nám povrchem Měsíce, T_{refl} má při vysoké hodnotě emisivity povrchu velmi malý vliv, lze použít hodnotu například $T_{refl} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 4: Schematické znázornění radiačních toků na detektor termokamery

Uvedenými parametry se podchytí radiační toky směřující na detektor v termokameře, obr. 9. Ty vychází jednak z povrchu měřeného objektu, ale jsou i doplněné o radiační toky z okolních předmětů, a i z okolní atmosféry.

Celkový radiační tok na detektor termokamery je tedy dán součtem jednotlivých radiačních toků:

$$M_{tot} = \tau_{atm} \cdot M_{obj} + \tau_{atm} \cdot (1 - \varepsilon_{obj}) \cdot M_{refl} + M_{atm}$$

Obr. 5: Rovnice celkového radiačního toku na detektor termokamery

Kde M_{tot} je celková intenzita záření na detektor ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), τ_{atm} je propustnost prostředí (-), M_{obj} je intenzita záření měřeného objektu ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), ε_{obj} je emisivita povrchu měřeného objektu (-), M_{refl} je intenzita záření okolních objektů a M_{atm} je intenzita záření prostředí.

K podrobnějšímu popisu je rovnice Obr. 5 rozdělena na tři skupiny:

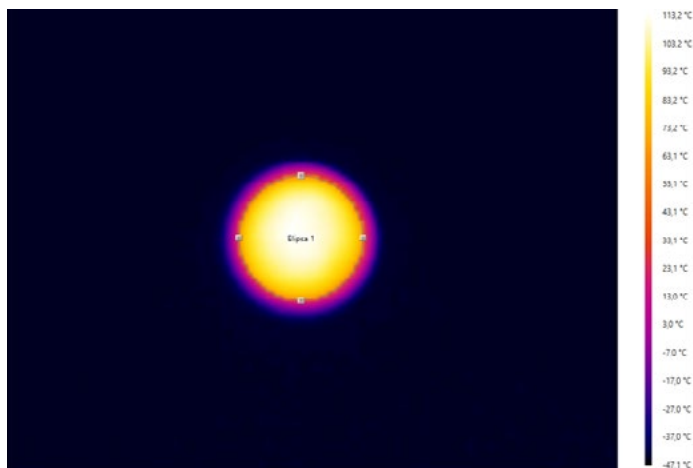
1. záření pocházející z povrchu měřeného objektu zeslabené propust-

ností prostředí t_{atm} , vyzařování měřeného objektu je

$$M_{\text{obj}} = \varepsilon_{\text{obj}} \cdot M_{\text{obj}}^{\text{BB}}$$

2. záření okolních objektů/zdrojů $M_{\text{refl}} = \varepsilon_{\text{refl}} \cdot M_{\text{refl}}^{\text{BB}}$, většinou je uvažováno $\varepsilon_{\text{refl}} = 1$, odražené od měřeného objektu, odrazivost objektu $r_{\text{obj}} = 1 - \varepsilon_{\text{obj}}$, je rovněž zeslabené propustností prostředí t_{atm} ,
3. záření prostředí (atmosféry) $M_{\text{atm}} = \varepsilon_{\text{atm}} \cdot M_{\text{atm}}^{\text{BB}}$, uvažujeme $\varepsilon_{\text{atm}} = 1 - t_{\text{atm}}$.

Při uvedených parametrech a za použití termokamery InfraTEC VarioCAM HD, kdy průměr Měsíce zaujímal na termogramu 33 pcx, viz obr. 6, se vyhodnotila povrchová teplota Měsíce $T_{\text{Lunar}} = 113 \text{ }^\circ\text{C}$. Uvedená hodnota je o pár stupňů nižší, než je udávaná maximální teplota pro Měsíc v úplňku, která je $T_{\text{Lunar}} = 118 \text{ }^\circ\text{C}$ [6].



Obr. 6: Termogram Měsíce za úplňku, termokamera InfraTEC VarioCAM HD

VYSVĚTLENÍ

Pokus o kvantitativní vyhodnocení teploty povrchu Měsíce je jedna z nejsložitějších úloh termografie, neboť zde významně vystupuje například vliv atmosféry (její propustnost), který u většiny pokusů je spíše zanedbatelný, stanovení její přesné aktuální hodnoty je navíc obtížné, neboť se v čase mění. Problematické je vyhodnocení i pro

vyhodnocovací softwaru, protože hluboce záporná teplota okolí Měsíce je na limitech, se kterými umí pracovat, je vhodnější pak změny propustnosti, emisivity, odražené teploty, teploty okolí provádět pouze pro lokální oblast povrchu Měsíce na termogramu.

ZÁVĚR

Pokusy zabývající se měřením teploty Měsíce mají rozšířit u studentů vnímání elektromagnetického záření, které bývá chápáno čistě skrze jeho viditelnou část. Stručněji jsou popsány radiální toky, které je potřeba uvažovat při bezkontaktním měření teploty povrchů a ukááno je zkreslení reality, které způsobují algoritmy zpracovávající signály od jednotlivých pixelů infračerveného detektoru.

POKUS Č. 3

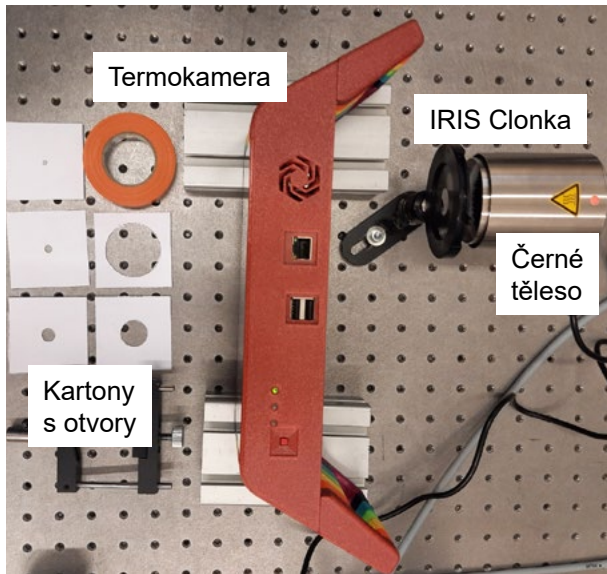
Vliv velikosti měřené plochy na stanovení její teploty

POMŮCKY

- Termokamera, lze zapůjčit v zápůjčních centrech platformy LabIR EDU [1],
- USB Flash disk pro uložení termogramu,
- volitelně LabIR software, lze bezplatně stáhnout [2],
- IRIS clonka, lze nahradit sérií destiček (tvrdý papír) s otvory o průměru 40, 20, 10, 6 a 3 mm,
- Černé těleso, lze použít případně keramický hrníček s horkou vodou, nebo cokoliv co po dobu několika minut bude mít přibližně neměnnou teplotu povrchu vyšší jak 40 °C a emisivitu povrchu větší než 0,8, rozměr povrchu by měl být minimálně 60 × 60 mm.

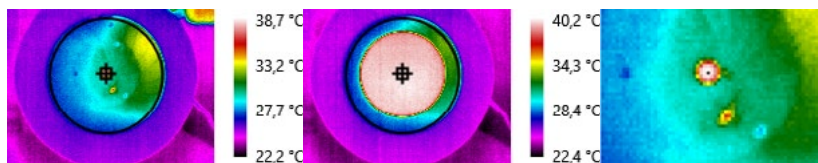
POSTUP

Termokamera, IRIS clonka a černé těleso se umístí do jedné osy, ideálně na optickou kolejnici, aby polohy byly fixovány. Vzdálenost termokamery od černého tělesa by měla být v intervalu 10 až 30 cm, IRIS clonka se umístí před černé těleso, viz obr. 7. V termokameře se nastaví hodnota emisivity $e = 0,97$ (platí pro použité černé těleso), odražená teplota (nebo teplota pozadí) $T_{\text{ref}} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, propustnost atmosféry $t_{\text{atm}} = 1$ a teplota atmosféry $T_{\text{atm}} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, měříme-li ve třídě.



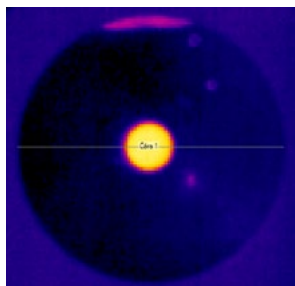
Obr. 7: Uspořádání pokusu vlivu velikosti měřené plochy.

Je-li k dispozici IRIS clonka, spustí se na termokameře nahrávání videa a plynule pomalu se IRIS clonka uzavírá do maximálního zavření a následně otevírá do maximálního otevření, nahrávání se ukončí a termogramy se vyhodnotí v softwaru LabIR.

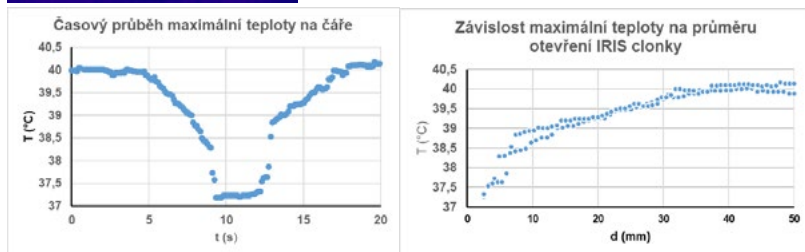


Obr. 8: Termogramy otevřená, uzavřená IRIS clonka a detail uzavřené IRIS clonky.

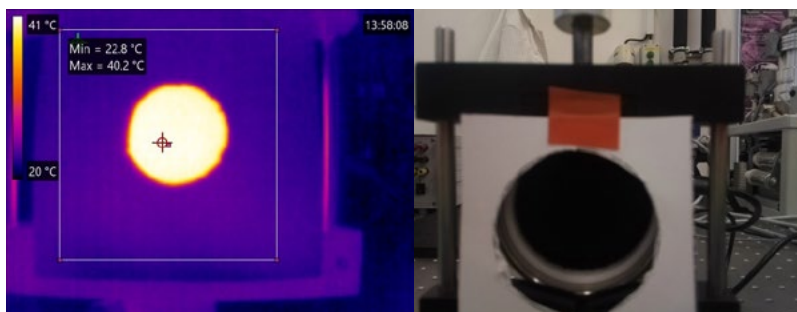
Termogramy pro otevřenou, uzavřenou a detail uzavřené IRIS clonky jsou na obr. 8. Z termogramů je patrný pokles hodnoty měřené teploty pro uzavřenou IRIS clonku. Termogram detailu uzavřené IRIS clonky ukazuje, že na maximální zavření IRIS clonky, kdy zůstane otvor o průměru 2,5 mm, připadá 5 pixelů. Pomocí softwaru LabIR lze vyexportovat časový průběh maximální teploty na definované čáře, viz obr. 9, takto získaný časový profil je možné při předpokladu plynného uzavírání a otevírání IRIS clonky převést na závislost maximální vyhodnocené měřené teploty na definované čáře na průměru otevření IRIS clonky, viz. obr. 9. Z uvedeného grafu je zřejmé, že již pro průměry menší než 40 mm otevření se začíná maximální vyhodnocená teplota snižovat.



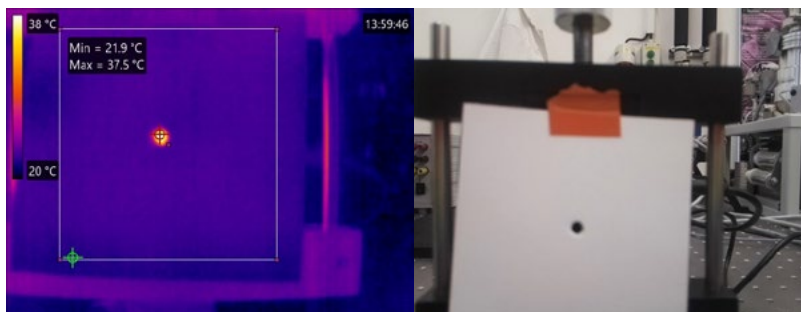
Obr. 9: Termogram s vyznačenou čarou pro vyhodnocení, časový průběh maximální vyhodnocené teploty na definované čáře, závislost maximální teploty na průměru IRIS clonky.



Jednodušší realizace, kdy není nutné ukládat video (sekvenci termogramů) a vyhodnocení následně zpracovávat v softwaru LabIR je při použití otvorů v kartonu s různým průměrem, nebo když se IRIS clonka bude uzavírat a otevírat v krocích. Na termokameře se vytvoří čtvercová analýza se zobrazením hodnoty a polohy maxima, analýza by měla zahrnovat jen prostor o velikosti kartonu s otvorem, případně o velikosti IRIS clonky. Pro každý průměr otvoru/krok uzavření IRIS clonky, se uloží termogram, viz obr. 10 a obr. 11, a zaznamenaná hodnota maximální teploty z oblasti, kontroluje se, aby poloha maxima byla vždy v otvoru. Z takto získaných hodnot je možné vytvořit graf závislosti maximální teploty na průměru použitého otvoru stejně, jako je ukázáno na obr. 9.



Obr. 10: Termogram se zobrazenou maximální hodnotou teploty pro otvor o průměru 40 mm a umístění kartonu s otvorem o průměru 40 mm před černé těleso.



Obr. 11 : Termogram se zobrazenu maximální hodnotou teploty pro otvor o průměru 3 mm a umístění kartonu s otvorem o průměru 3 mm před černé těleso.

VYSVĚTLENÍ

Se zmenšujícím se průměrem se postupně snižuje vyhodnocená maximální teplota. Uvedené je způsobeno zejména vyhlazovacími algoritmy termokamery, které zajišťují, že uživatelé jsou zobrazováni upravené hodnoty pro každý pixel tak, aby byl výsledný termogram například bez vadných pixelů, které by působily rušivě. Poučení z uvedeného je to, že pokud se něco měří, je vhodné, aby povrch měřeného objektu zaujímal co největší plochu obrazu, to se uskuteční tak, že termokameru umístíme do co možná nejbližší bezpečné vzdálenosti od měřeného povrchu objektu.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] <https://edu.labir.cz/>
- [2] LabIR software pro zpracování termogramů, <https://edu.labir.cz/edukit/software>
- [3] Termokamera TIMI EDU, technický list <https://www.timic.cz/files/TIMI%20EDU%20-%20Datasheet%20CZ.pdf>
- [4] ČSN ISO 18434-1 (011465), Monitorování stavu a diagnostika strojů - Termografie - Část 1: Všeobecné postupy, 07/2009
- [5] Joseph A. Shaw, Modeling infrared lunar radiance, Opt. Eng. 38(10) 1763–1764 (October 1999)
- [6] Müller T.G at all, The Moon at thermal infrared wavelengths: a benchmark for asteroid thermal model, Astronomy and Astrophysics 650, A38 (2021)
- [7] Modtran software výpočet propustnosti atmosféry <http://modtran.spectral.com/>



