

EMISIVITA – POTÍŽ PŘESNÉHO RADIOMETRICKÉHO MĚŘENÍ

Ing. Jaroslav Smetana

Blue Panther Instruments

Infračervená radiometrie (IR) je velmi užitečný způsob měření teploty. Oproti kontaktnímu měření má přednost v rychlosti odezvy a neovlivňuje měřený předmět. Její hlavní nevýhodou je pak, že není tak přesná jako metoda kontaktní. Jedním z hlavních zdrojů nejistoty měření u této metody je emisivita měřeného povrchu. Stejně je to i při kalibraci přístrojů pro tato měření. Nejlepší způsob jak kalibrovat IR teploměry je použití téměř dokonalého černého tělesa. Ale takové zařízení nemusí být vždy prakticky použitelné pro kalibraci. Pro některé teploměry je vhodné použít ploché desky. Emisivita nemusí být vždy vyhovující. Emisivita se může měnit s časem, to znamená, že nátěr povrchu desky musí být vyzrálý a stabilizovaný. Emisivita se také mění s vlnovou délkou a teplotou. V tomto článku bychom rádi pohovořili o možných zdrojích chyb emisivity ploché desky používané ke kalibraci. Znalost zdrojů těchto chyb může pomoci k přesnější kalibraci IR teploměrů.

CO JE EMISIVITA

Emisivita je schopnost materiálu vyzařovat jako dokonalé černé těleso. Je to poměr nebo procento výkonu dokonalého černého tělesa které by zářilo na dané teplotě. Každý materiál vyzařuje energii. Množství této energie je závislé na teplotě materiálu a jeho emisivitě.

ČERNÁ TĚLESA

Nejlepší kalibrátor pro IR teploměry je černé těleso. Je to proto, že černá tělesa mají emisivitu blízko 1,000. Jeho emisivita je z podstatné části určena jeho geometrií a ne jeho povrchem.

Dokonalé černé těleso

Dokonalé černé těleso by mělo mít emisivitu 1,000. Jedná se o fiktivní věc, která v reálném světě neexistuje, ale je to dobrý prototyp pro modelování tepelného vyzařování.

Planckův zákon

Matematický výraz popisující spektrální výkon vyzařování dokonalým černým tělesem pro danou vlnovou délku je nazýván Planckovým zákonem. Integrujeme-li Planckův zákon přes celé elektromagnetické spektrum, dostaneme Stefan-Boltzmannův zákon. Ten je znám jako zákon T na 4 (T⁴). Problém se Stefan-Boltzmannovým zákonem je, že není omezen na specifické pásmo. Pro získání výsledku v omezeném pásmu bychom museli provést integraci Planckova zákona pro takové omezené pásmo. Takový integrál bohužel nelze řešit analyticky.

Matematické řešení využitím Planckova zákona

Nejlepší způsob jak tento problém vyřešit pro vyzářenou energii černého tělesa je v daném frekvenčním pásmu numerická integrace Planckova zákona v daných mezích. Další způsob je použití aproximace pro Planckův zákon. Tato metoda musí být provedena velmi opatrně, neboť může zanechat nejistotu do výpočtu teploty.

$$L(\lambda, T) = \frac{c_{1L}}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}$$

$$M = \sigma T^4 = \pi \int_0^\infty L(\lambda, T) d\lambda$$

Obr. 1: Planckův a Stefan-Boltzmannův zákon

První z těchto aproximací je Wienův zákon. Ten aproximuje Planckův zákon od vlnové délky 0 k délce kolem vrcholové délky na dané teplotě. Vrcholová délka je predikována Wienovým rozdělovacím zákonem. Další možná aproximace je použití Rayleigh-Jeans zákona. Toto je dobrá aproximace pro teploty spolehlivé pod špičkovou vlnovou délkou, ale není přesná pro délky 8 – 14 μm a pro teploty ne vyšší než 500°C.

Použitím Wienova rozdělovacího zákona dostaneme špičkovou vlnovou délku pro 23°C 9,8 μm.

$$L = \frac{c_{1L}}{\lambda^5} \exp\left(\frac{-c_2}{\lambda T}\right)$$

Obr. 2: Wienův zákon

$$\lambda_{\max} T = c_3$$

Obr. 3: Wienův rozdělovací zákon

Symbol	Název	Veličina a jednotka
L	Spektrální vyzařování	W m ⁻² μm ⁻¹ sr ⁻¹
M	celková intenzita	W m ⁻²
λ	Vlnová délka	μm
T	teplota	K
Σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	5.67051e-8 W m ⁻² K ⁻⁴
C _{1L}	První radiační konstanta	1.191044e8 W μm ⁴ m ⁻² sr ⁻¹
C ₂	Druhá radiační konstanta	1.438769e4 μm K
C ₃	Třetí radiační konstanta	2897.7 μm K

Tab. 1: Symboly v radiometrických rovnicích

Použijeme-li kteroukoliv z těchto rovnic, můžeme zvolit vždy jen jednu vlnovou délku v pásmu. Mapříklad použijeme 11 μm pro aproximaci výpočtu v pásmu 8-14 μm. To může znamenat problém je-li většina energie posunuta k jednomu konci pásma jako je to v případě 8-14 μm pásma na 500°C.

Chyba může být ověřena matematicky, abychom určili chybu zavedenou do výpočtu tak, aby byla menší než potřebná nejistota.

Dutiny

Jak jsme se zmínili na počátku není nic takového v reálném světě jako dokonalé černé těleso. Dobrým přiblížením je například dutina. Dutinou může být válec, koule, jehlan nebo jejich kombinace. Obecně je emisivita dutin závislá na

jejich geometrii a blíží se velmi 1,000. Dutiny mají emisivitu typicky 0,99, 0,999 nebo 0,9999. Čím více má hodnota emisivity 9, tím více se blíží ideálnímu černému tělesu.

Dutiny jsou však nepraktické pro kalibraci IR teploměrů, zvláště pak ručních. Je to hlavně potřebnou velikostí terče. V praxi je nutné, aby 100% signálu zasahovalo výrobcem definovanou plochu terče.

Šedá tělesa a IR kalibrace

Pro vyhovění nutnosti velikosti terče jsou většinou používány šedá tělesa tvořená plochou deskou.

Šedé těleso je povrch, který má konstantní emisivitu uvnitř definovaného vlnového pásma.

Pro kalibraci IR teploměrů je třeba mít emisivitu blízko 1,00 (obvykle mezi 0,90 a 1,00).

Dobrá deskový kalibrátor se vyznačuje několika důležitými vlastnostmi. Tou nejdůležitější je povrch desky a jeho emisivita. Znalost emisivity desky kalibrátoru v pásmu, ve kterém je prováděna kalibrace IR teploměrů je nezbytná pro dobré výsledky. Protože desky jsou vyrobeny z kovu je otázka proč nepoužít holý kov. Jsou dva důvody proč ne. Za první kov má velmi nízkou emisivitu, která je obvykle někde mezi 0,02 až 0,50 v závislosti na druhu kovu. Za druhé, kov oxiduje. To sice způsobí vzrůst emisivity až na 0,80, ale s vysokou nejistotou a s velkou závislostí na čase.

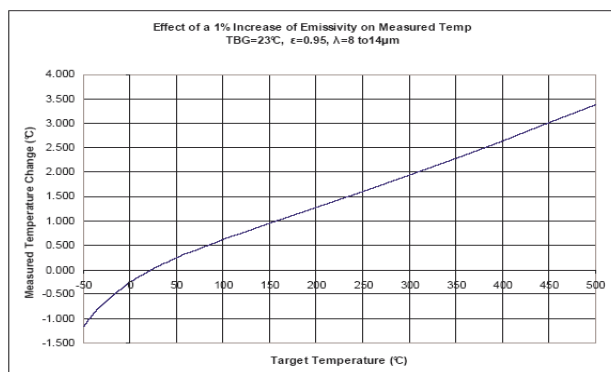
Pro odstranění těchto problémů s kovy jsou desky kalibrátorů lakovány. Pro pásmu 8 – 14 μm jsou dostupné speciální laky, které zajistí průměrnou emisivitu 0,90 až 0,95.

NEJISTOTA ZPŮSOBENÁ EMISIVITOU

Emisivita je velkým podílníkem na nejistotě připoužití kalibrátorů s plochou deskou. Je třeba dbát pečlivě o znalost emisivity daného deskového kalibrátoru. **Obr. 4** ukazuje chybu, která může být způsobena změnou emisivity. Například, je-li emisivita povrchu kalibrátoru 0,93, a je předpokládáno, že je 0,95. Tato odchylka způsobí chybu 6,6°C na povrchu s teplotou 500°C měříme-li v pásmu 8 – 14 μm .

Vliv vlnové délky

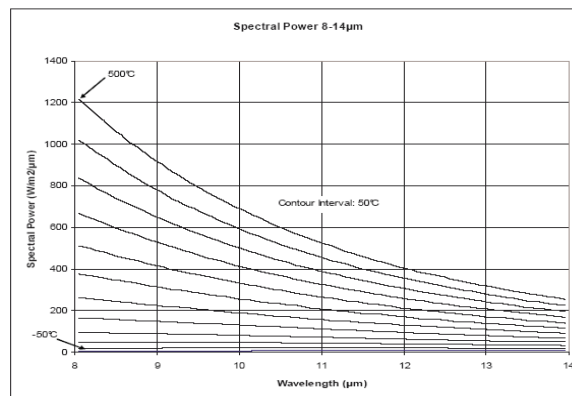
Je k dispozici mnoho příruček, kde nalezneme tabulky s emisivitami různých materiálů. Ty jsou jistě dobré pro představu o vlastnostech materiálů, ale neukazují celou pravdu. Emisivita většiny materiálů se mění s vlnovou délkou. Jinak řečeno materiály mají spektrálně závislou emisivitu. IR teploměr integruje emisivitu v jeho pásmu.



Obr. 4: Vliv nejistoty emisivity

Vliv teploty

Emisivita je také závislá na teplotě. Jak teplota roste, energie emitovaná povrchem se posouvá od vyšších vlnových délek k nižším, jak je předpovězeno Wienovým distribučním zákonem. To způsobí, že jak roste teplota efektivní emisivita teploměru se posouvá od horního konce pásma k dolnímu. To je vidět na **obr. 5**.

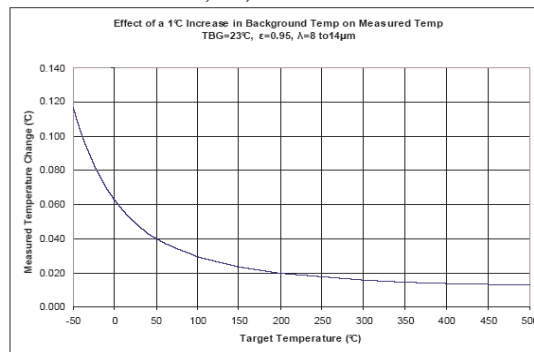


Obr. 5: Posun energie při růstu teploty

Vliv pozadí

Dalším vlivem emisivity je teplota pozadí. Má-li matný povrch emisivitu 0,95, znamená to, že 5% energie je odraženo jak určuj Kirchoffův zákon. Těchto 5% je závislých na teplotě povrchu nasměrovaného k měřenému povrchu. Tato teplota se nazývá teplotou pozadí.

Dobry příklad efektu teploty pozadí je povrch na 0°C měřený v pásmu 8 – 14 μm . Stojí-li uživatel IR teploměru proti terči, bude tvořit velmi dobré pozadí. To může zvýšit teplotu pozadí z 23°C na 37°C a způsobit chybu měření 3,5°C (Předpokládáme emisivitu 0,95).



Obr. 6: Vliv teploty pozadí

Vliv teploty pozadí roste s tím, jak klesá teplota terče. Vzrůstá také s poklesem emisivity. Podíváme-li se na extrémní příklad pak by měl dokonalý reflektor emisivitu 0,000 a odrážel by 100% pozadí. v takovém případě teploměr neměří teplotu povrchu, ale teplotu pozadí.

ZÁVĚR

Emisivita je jedním z největších zdrojů chyb při radiometrickém měření. Znalost emisivity měřeného povrchu je velmi důležitou součástí jakéhokoliv IR měření. Jak je patrné, je třeba dát velkou pozornost vlivům emisivity povrchu na měření. Stejně tak je důležitá znalost teploty pozadí a vlivu emisivity předmětů v pozadí. Tyto faktory jsou pak mnohem důležitější mluvíme-li o kalibrátoru IR teploměrů.