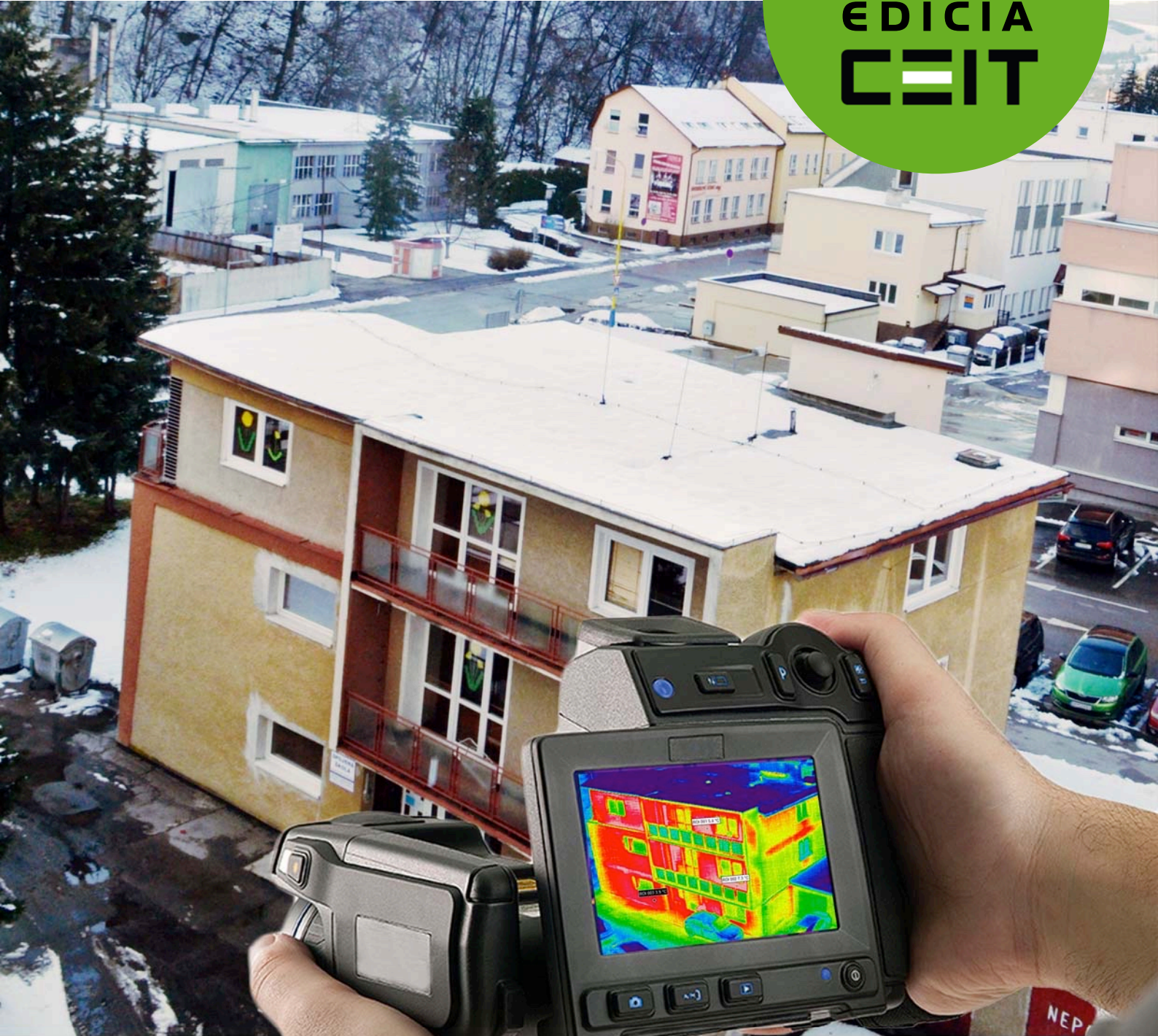


Termovízia v praxi



HOLUBČÍK Michal
HOLUBČÍKOVÁ Lucia
KANTOVÁ Nikola



2015



Publikácia bola vydaná s podporou CEIT, a.s



Publikácia bola vydaná s podporou
Katedry energetickej techniky

Autori: Ing. Michal Holubčík, PhD.
Ing. Lucia Holubčíková
Bc. Nikola Kantová

Recenzenti: doc. Ing. Jozef Černecký, CSc.
doc. Ing. Ján Kizek, PhD.

Vedecký redaktor: Prof. RNDr. Milan Malcho, PhD.

© Michal Holubčík – Lucia Holubčíková – Nikola Kantová

ISBN 978-80-971684-3-8

Obsah

1. Zoznam použitých označení, symbolov a skratiek	6
2. Úvod	8
3. Infračervené žiarenie	9
3.1 Objav a história infračerveného žiarenia	9
3.2 Charakteristika infračerveného žiarenia	9
3.3 Zdroje infračerveného žiarenia	11
3.4 Šírenie infračerveného žiarenia atmosférou	12
3.5 Žiarenie čierneho telesa a jeho zákony	13
4. Meranie teploty	16
4.1 Teplota, teplotná stupnica	16
4.2 Teplo a teplota	17
4.3 Prenos tepla	17
4.3.1 Prenos tepla vedením	18
4.3.2 Prenos tepla prúdením	19
4.3.3 Prenos tepla radiáciou	20
4.4 Bezdotykové meranie teploty	20
4.4.1 Pyrometre	21
4.4.2 Termovízne systémy	23
5. Termovízne systémy	24
5.1 Vývoj termovízie	24
5.1.1 História vývoja termokamier	24
5.2 Termokamera	24
5.3 Termografia	25
5.3.1 Pasívna termografia	25
5.3.2 Aktívna termografia	26
5.4 Termovízia	26
5.5 Zobrazovacie metódy	27
5.5.1 Termovízna metóda s rozkladom obrazu: opticko - mechanický rozklad	27
5.5.2 Termovízna metóda s rozkladom obrazu: elektronický rozklad	27
5.5.3 Fotografická metóda merania teploty: fotometria	27
5.6 Termovízne systémy	28

5.7	Súčasné termovízne systémy	29
5.7.1	Prenosné termovízne systémy	31
5.7.2	Stacionárne termovízne systémy	31
6.	Termovízne meranie	33
6.1	Termodiagnostika	33
6.2	Ideálne podmienky pri termovíznom meraní	33
6.3	Vzdialenosť merania	34
6.4	Emisivita	35
6.5	Vplyvy meraného objektu na meranie	37
6.5.1	Materiál a emisivita	37
6.5.2	Farba	37
6.5.3	Povrch meraného objektu	38
6.6	Vplyvy okolia prostredia na meranie	38
6.6.1	Teplota okolia	38
6.6.2	Žiarenie	38
6.6.3	Počasiť	39
6.6.4	Vzduch	39
6.6.5	Svetlo	40
6.7	Meranie na skle	40
6.8	Meranie na kovoch	41
6.9	Zdroje chýb merania	41
6.10	Vyhodnotenie merania, termogram	42
7.	Termovízne systémy v praxi	43
7.1	Použitie termovíznych systémov v stavebníctve	43
7.1.1	Izolačné chyby a úniky vzduchu	44
7.1.2	Detekcia úniku vzduchu	47
7.1.3	Detekcia vlhkosti	47
7.1.4	Tepelné mosty	48
7.1.5	Zásobovacie linky a diaľkové vykurovanie	49
7.1.6	Infiltrácia vody do plochej strechy	51
7.1.7	Lokalizovanie únikov v podlahovom vykurovaní	52
7.1.8	Zabezpečenie kvality	53
7.1.9	Stavebné rekonštrukcie	53
7.1.10	Klmpiarstvo	53
7.1.11	HVAC zariadenia	54
7.1.12	Elektrické poruchy	55
7.2	Použitie termovíznych systémov v energetike	56

7.3	Použitie termovíznych systémov v priemysle	57
7.3.1	Preventívna údržba mechanizmov	58
7.3.2	Kontrola naplnenia zásobníkov	60
7.3.3	Vizualizácia prehrievania na doskách plošných spojov	61
7.3.4	Kontrola kvality vo výrobe lisovaných plastových dielcov	61
7.4	Použitie termovíznych systémov v telekomunikáciách	62
7.5	Použitie termovíznych systémov v medicíne	63
7.6	Použitie termovíznych systémov na alternatívne zdroje energie	64
7.7	Použitie termovíznych systémov vo výskume a vývoji	65
7.8	Použitie termovíznych systémov v ekológii	65
7.9	Použitie termovíznych systémov na špeciálne aplikácie	65
8.	Záver	67
9.	Použitá literatúra	68

1. ZOZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ, SYMBOLOV A SKRATIEK

a - pomerná pohltivosť [-]

AGV Automated guided vehicle - automaticky riadené dopravné zariadenie

C - súčiniteľ sálania šedého telesa [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

CCD charge-coupled device - nábojovo viazaná súčiastka

C_0 - súčiniteľ sálania absolútne čierneho telesa [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$]

E - emisivita

e - pomerná sálavosť [-] EÚ - Európska únia FOV - zorné pole

FPA Focal Plane Array - plošné maticové usporiadanie detektorov

grad t - gradient teploty

HVAC heating, ventilating, and air conditioning....- vykurovacie vetracie a klimatizačné systémy

I - množstvo energie, ktoré vyžiari šedé teleso [$W \cdot m^{-2}$]

I_0 - celkový sálavý tok [$W \cdot m^{-2}$]

$IFOV_{geo}$ - najmenší rozpoznateľný objekt

$IFOV_{means}$ - najmenší merateľný objekt / miesto merania

IR - infračervené

LWIR long wavelenght infrared region - vzdialená oblasť infračerveného spektra

MWR middle wavelenght infrared region - stredná oblasť infračerveného spektra

NWIR near wavelenght infrared region - blízka oblasť infračerveného spektra

ρ - pomerná priepustnosť [-]

QWIP Quantum Infrared Photo Detector - špeciálny druh kvantového detektora

\dot{Q} - tepelný tok [$W \cdot s^{-1}$]

\dot{q} - hustota tepelného toku [$W \cdot m^{-2}$]

r - pomerná reflexia [-]

RTC - odrazná teplota

S - plocha [m^2]

SPRITE Signal Processing In The Element - druh detektora využívaný v termokamerách

T - teplota telesa [K]

T_{∞} - teplota okolia [K]

ν - vlnčet (vlnové číslo)

x, y, z - súradnice bodu telesa

α - súčiniteľ prestupu tepla prúdením [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-2}$]

λ - tepelná vodivosť [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

λ - vlnová dĺžka [μm]

τ - čas [s]

2. ÚVOD

V súčasnej dobe sa neustále zvyšujú nároky na všetky oblasti ľudského života, nevynechávajúcu vedu a techniku. Kladie sa dôraz predovšetkým na presnosť, kvalitu a spoľahlivosť pri zodpovedajúcej cene a šetrení životného prostredia.

S rozvojom rôznych technologických a výrobných procesov vznikali aj požiadavky na rozličné spôsoby merania teploty týchto procesov. Keďže nie vždy je možné využiť priame kontaktné meranie, objavila sa požiadavka na vznik zariadení schopných zmerať teplotu zariadení alebo procesov diaľkovo, jedná sa o bezkontaktné meranie teploty.

Priame kontaktné metódy si vyžadujú priamy a pomerne dlhodobý kontakt s meraným predmetom. Pri použití bezkontaktných metód merania teploty nevzniká chyba vplyvom nedokonalého dotyku sond s nerovným povrchom. Nehrozí nebezpečenstvo deštrukcie snímača vplyvom dotyku s meraným povrchom. Meraná hodnota teploty je k dispozícii okamžite. Obsluha aj meracie zariadenia môžu byť vzdialené od meraného objektu aj niekoľko metrov. Z jedného meracieho miesta je možné získať prehľad o rozložení teplôt na veľkej ploche. Možnosť merania teploty i tam, kde kontaktné metódy zlyhávajú, napr. veľmi vysoké teploty, agresívne prostredie, rýchle sa pohybujúce predmety a pod.

Zariadenia, ktoré sú schopné merať teplotu bezkontaktné, sa nazývajú pyrometre. S postupným vývojom nových technológií nastal aj vývoj zariadení určených na bezkontaktné meranie teploty od prvých porovnávacích, kde bolo detektorom žiarenia ľudské oko cez bodové teploměry až k termovízii schopnej zobrazovať plošné teplotné snímky.

Termovízia je metóda snímania tepelného žiarenia objektov v infračervenej oblasti elektromagnetického spektra a umožňuje bezdotykové meranie teploty na povrchu daného objektu. Umožňuje plošné meranie povrchovej teploty objektov aj na väčšie vzdialenosti. Infračervené žiarenie objavil v roku 1800 Frederick William Herschel, keď pomocou hranola rozložil slnečné svetlo na spektrum a k jeho jednotlivým častiam prikladal teplomer. Infračervené žiarenie je časťou širokého spektra elektromagnetického žiarenia, ktoré má rovnakú fyzikálnu povahu ako viditeľné žiarenie.

Termovíznu techniku je možné využívať v celom rade ľudskej činnosti zahrňujúcej stavebníctvo, priemysel, energetiku, telekomunikácie, medicínu, ekológiu, bezpečnosť a ďalšie oblasti.

Cieľom tejto publikácie je oboznámenie s jednotlivými druhmi bezdotykových meracích prístrojov a spôsobov merania, predovšetkým termovíznych systémov a ich uplatnenie v praxi.

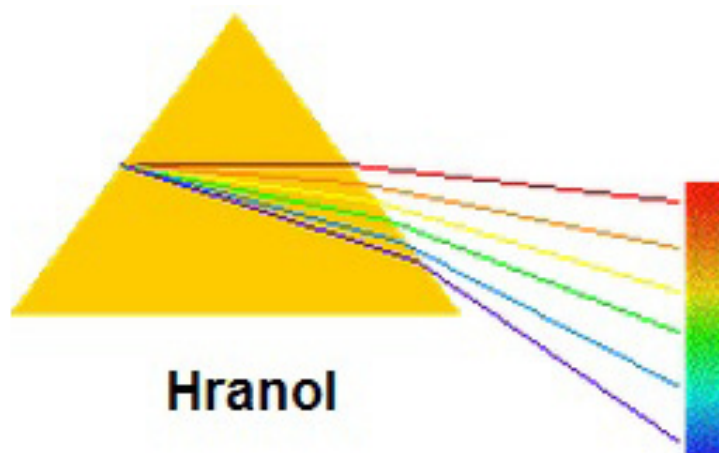
Táto publikácia bola vytvorená v spolupráci s **CEIT, a.s** a **Katedrou energetickej techniky Strojníckej fakulty Žilinskej univerzity v Žiline**.

3. INFRAČERVENÉ ŽIARENIE

3.1 Objav a história infračerveného žiarenia

Slovo „infračervený“ sa dá preložiť ako „pod červenou“ a ukazuje na to, kde sa tieto vlnové dĺžky nachádzajú v elektromagnetickom spektre. Výraz „termografia“ je odvodený zo základného slova „Termogram“, ktoré znamená „obraz teploty“.

Infračervené žiarenie bolo neznáme až do doby pred 200 rokmi, kedy Frederick William Herschel (1738-1822) vykonal svoj pokus. Herschel, vedec a astronóm, objavil roku 1800 v Anglicku pri experimentovaní so slnečným svetlom infračervené žiarenie. Pomocou hranola najprv rozložil slnečné svetlo na spektrum, viď. obr. 1, a k jeho jednotlivým častiam potom prikladal teplomer. Smerom k červenej oblasti spektra teplota rástla. Nasledovne priložil teplomer za červenú časť spektra a zistil, že teplota stúpala viac než v ktorejkoľvek časti červeného spektra. Táto oblasť bola nazvaná infračervená (z latinského infra = pod) (NOVÁČEK, 2007).



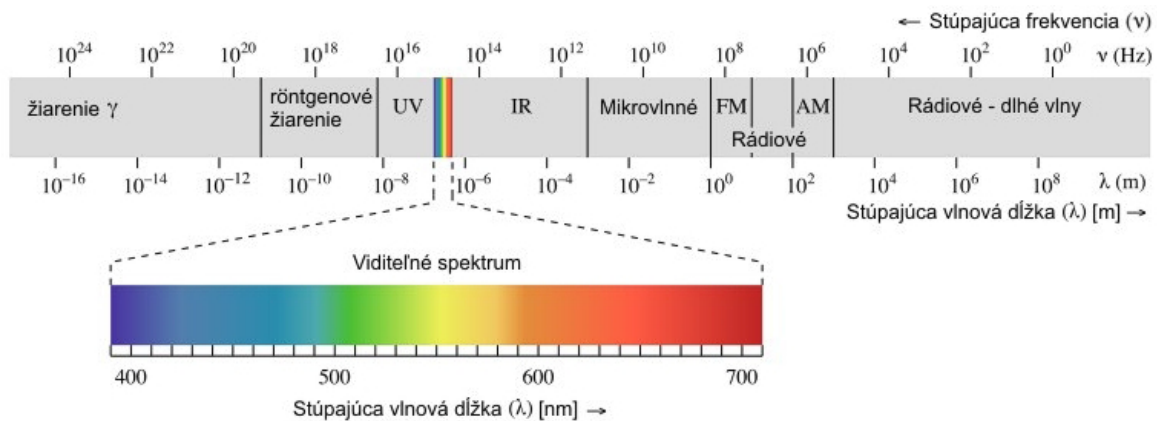
Obr. 1 Rozloženie slnečného svetla na spektrum pomocou hranola

3.2 Charakteristika infračerveného žiarenia

Infračervené žiarenie je elektromagnetické vlnenie s rovnakými fyzikálnymi vlastnosťami ako má viditeľné žiarenie. Keďže sa jedná o elektromagnetické žiarenie, zaberá oblasť vlnových dĺžok medzi viditeľnou a mikrovlnnou časťou spektra. Tvoria ho priečne elektromagnetické vlny, ktoré sa šíria v homogénnych prostrediach, vo vákuu, v plynch, v kvapalinách a pevných látkach približne priamočiario.

Pomocou šošoviek, ktoré sú vyrobené z optických materiálov a prepúšťajú infračervené žiarenie, alebo zrkadiel, možno toto žiarenie rovnako ako viditeľné žiarenie odkláňať od pôvodného smeru lomom alebo odrazom, sústreďovať a rozkladať na monochromatické zložky (pomocou hranolov alebo mriežok).

INFRAČERVENÉ ŽIARENIE



Obr.2 Spektrum elektromagnetického žiarenia (www.uspornaziarovka.sk)

Infračervené žiarenie, rovnako ako viditeľné žiarenie, má okrem vlnových vlastností aj časticové vlastnosti.

Termovízia využíva infračervenú časť spektra definovanú ako termografické spektrum. Ako vyplýva z obr. 2, spektrum elektromagnetického žiarenia sa delí podľa vlnových dĺžok na pásma. Tieto sú nazvané podľa metód, ktoré sa používajú na ich vybudenie alebo detekciu. Vyžarovanie v rozličných oblastiach sa nemení, má rovnaký fyzikálny základ a jediným rozdielom sú vlnové dĺžky.

Infračervené žiarenie ako druh elektromagnetického vlnenia zaberá v spektre široký rozsah (podstatne širší ako viditeľné žiarenie). Na strane kratších vlnových dĺžok hraničí s tmavočervenou oblasťou viditeľného pásma (s vlnovou dĺžkou $\lambda = 780$ nm) a na strane dlhších vlnových dĺžok s mikrovlnovou oblasťou spektra (vlny budené rádiovými zdrojmi). Hranice dlhovlnného infračerveného žiarenia nie sú presne definované. Zväčša sa používa zaokrúhlený údaj asi $\lambda = 1$ mm.

Široký rozsah infračerveného žiarenia sa delí na:

- blízku infračervenú oblasť $\lambda = 780$ až 1400 nm,
- strednú infračervenú oblasť $\lambda = 1,4$ až 4 μm ,
- vzdialenú infračervenú oblasť $\lambda = 3$ μm až 1 mm.

Prípadne sa často stretávame s rozdelením na štyri menšie pásma:

- blízke infračervené žiarenie $\lambda = 780$ až 3000 nm,
- stredné infračervené žiarenie $\lambda = 3$ až 6 μm ,
- ďaleké infračervené žiarenie $\lambda = 6$ až 15 μm ,
- extrémne infračervené žiarenie $\lambda = 15$ až 1000 μm .

Toto delenie je výstižné pre zdroje a snímače žiarenia: v blízkej infračervenej oblasti sa používajú rovnaké prostriedky ako v rozsahu viditeľného žiarenia, v strednej infračervenej oblasti len niektoré rovnaké prostriedky, vo vzdialenej infračervenej oblasti len tepelné prostriedky.

Infračervené žiarenie vzniká ako dôsledok fyzikálnych procesov, ktoré prebiehajú v objekte vyžarovania pohybom atómov, molekúl, kmitov uzlov kryštalickej mriežky a elektrónových

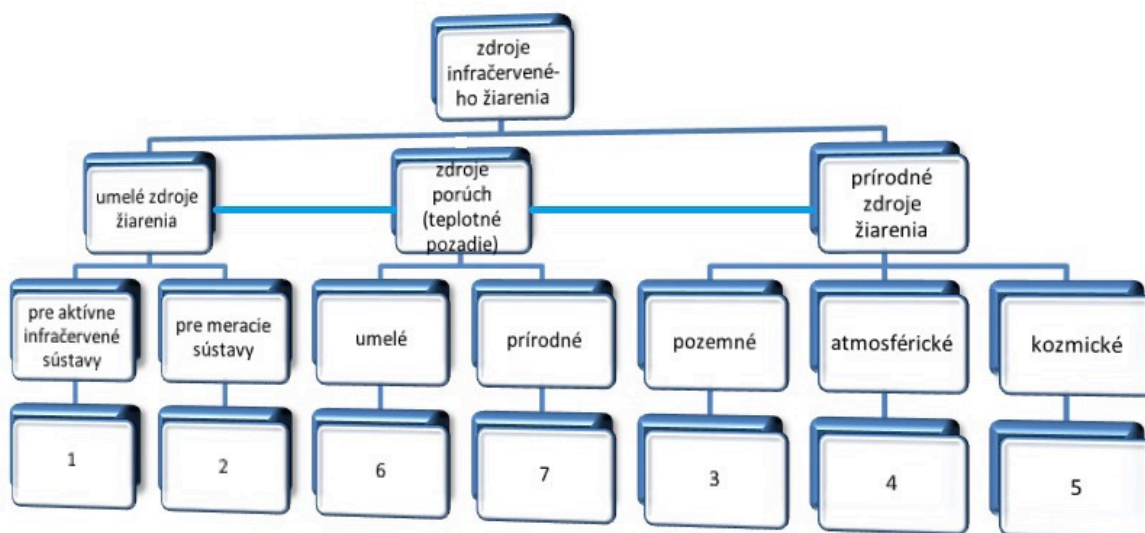
prechodov z jednej energetickej hladiny na inú. Základným zdrojom infračerveného žiarenia je budenie žiarenia zvýšenou teplotou žiaríča. Vysielané žiarenie sa potom nazýva teplotné.

Na charakterizovanie infračerveného žiarenia sa používa vlnová dĺžka λ , vyjadrená v mikrometroch (10^{-6} m) alebo nanometroch (10^{-9} m). Niekedy sa používa i pojem vlnočet (vlnové číslo) ν , ($\nu = 1/\lambda$) (ŠIMKO, 2007).

3.3 Zdroje infračerveného žiarenia

Infračervená technika používa rôzne zdroje infračerveného žiarenia, väčšinou ale teplotné zdroje žiarenia, ktoré tvoria rôzne telesá (plynné, kvapalné a pevné), ktorých teplota je vyššia ako 0 K.

Na obr. 3 je znázornené rozdelenie zdrojov infračerveného žiarenia.



Obr. 3 Schéma rozdelenia zdrojov infračerveného žiarenia

Vysvetlivky k obr. 3 sú nasledovné:

- 1 - obyčajné a reflektorové žiarovky, halogénové žiarivky, „tmavé“ žiaríče, oblúkovky, zábleskové výbojky, lasery
- 2 - dutinový žiaríč, silitové tyče, Nernstov horák, okysličený niklový pás
- 3 - pôda, rastlinstvo, voda, budovy, dopravné prostriedky, ľudia
- 4 - vodná para, plyny obsiahnuté v atmosfére, oblaky, polárna žiara
- 5 - Slnko, Mesiac, planéty, hviezdy, hmloviny
- 6 - optické časti a okná prístrojov, umelé zdroje pozemné
- 7 - obloha, oblaky, nebeské telesá, zemský povrch, obklopujúce objekty

Zdroje infračerveného žiarenia rozdeľujeme na umelé a prírodné.

Umelé zdroje žiarenia sa používajú v aktívnych infračervených sústavách a sú východiskom pre meranie žiarivých veličín. V aktívnych infračervených sústavách sa používajú hlavne žiarovky s volfrámovým vláknom (bežné typy a reflektorované žiarovky), halogénové žiarovky,

stredno - a nízko teplotné (tmavé) žiariče na ohrev, oblúkovky, výbojky, zábleskové výbojky, optické kvantové generátory (lasery).

Na meranie žiarivých veličín sa používajú zdroje, ktorých hodnoty žiarenia musíme presne poznať, napr. dutinový žiarič (model čierneho telesa), silitové tyče, okysličený niklový pás a pod.

Prírodné zdroje žiarenia tvoria rôzne nahriate telesá, ktoré predstavujú objekty pozorovania a merania (napr. pri bezdotykovom meraní teplôt rôznych telies) alebo zdroje porúch (teplotné pozadia), ktorých vplyv na meranie treba eliminovať (LEVITIN, 1979).

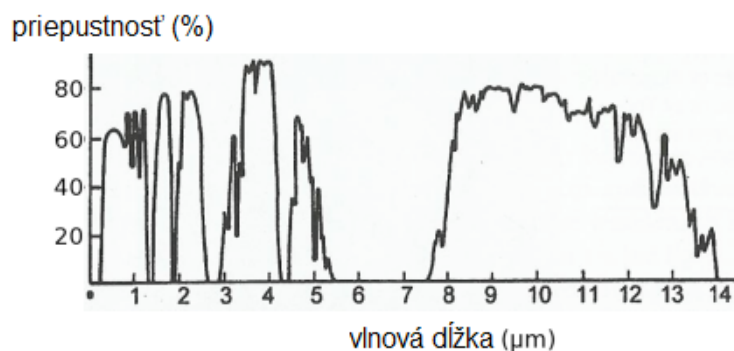
3.4 Šírenie infračerveného žiarenia atmosférou

Správanie infračerveného žiarenia pri prestupe atmosférou je dôležité pre všetky aplikácie na Zemi. Atmosféra obsahuje plyny, tekutiny aj pevné látky, ktoré zoslabujú alebo rozptyľujú prechádzajúce infračervené žiarenie. Rozptyľ znamená zmenu v smere šírenia lúča žiarenia, čo je spôsobené pohľtením a následným vyžiarovaním energie časticami prostredia. Rozptyľ molekulami plynu je zanedbateľný pre vlnové dĺžky viac ako 2 μm . Rovnako tak častice dymu sú malé vzhľadom na vlnovú dĺžku infračerveného žiarenia, a preto ním môže toto žiarenie prenikať ďalej než viditeľné svetlo. Okolo 78 % atmosféry je tvorené dusíkom a 20 % kyslíkom. Zvyšok sa skladá z hélia, oxidu uhličitého, vodíka, metánu, neónu, kryptónu a ozónu.

Vodná para je zrejme najdôležitejšou súčasťou atmosféry z hľadiska pohlcovania infračerveného žiarenia. Najviac pohlcuje žiarenie pri vlnových dĺžkach 1,38 μm , 1,87 μm , 2,7 μm a 6,3 μm . Najviac vodnej pary je pri zemskom povrchu.

Najviac k zoslabeniu infračerveného žiarenia prispievajú oxid uhličitý a ozón. Oxid uhličitý silne absorbuje pri vlnových dĺžkach 2 μm , 2,7 μm , 4,3 μm a 15 μm . Absorpčné pásmo ozónu leží v oblasti medzi 9,3 a 9,8 μm (NOVÁČEK, 2007).

Nasledujúci graf, na obr. 4, znázorňuje spektrálnu priepustnosť atmosféry v hrúbke 2 km vo vodorovnom smere u hladiny mora v pásme 0,2 až 15 μm . Z grafu je možné vidieť, že v sledovanej oblasti existuje niekoľko pásiem, ktoré sú pre elektromagnetické žiarenie úplne nepriepustné. Výrazné je to najmä pre oblasť 5,5 až 7,5 μm . V prípade kedy žiarenie prechádza kolmo k povrchu Zeme je priepustnosť ešte výraznejšie zmenená, najmä v krátkovlnovej oblasti, kde sa uplatní vplyv ozónovej vrstvy vo výške 60 km nad morom, ktorá úplne odfiltruje žiarenia Slnka kratšie ako 0,32 μm . Od 14 μm sa atmosféra stáva pre elektromagnetické žiarenie znova nepriepustná, a to až do vlnových dĺžok 104 μm .

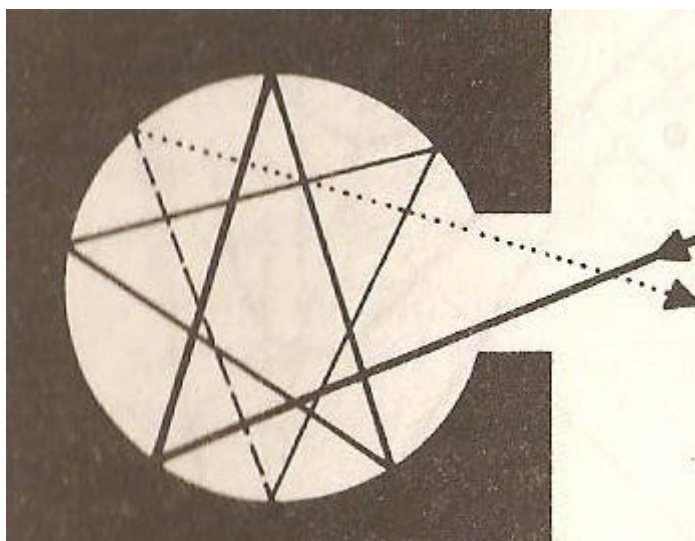


Obr. 4 Spektrálna priepustnosť atmosféry

3.5 Žiarenie čierneho telesa a jeho zákony

Teleso, ktoré neodrazí a ani neprepustí žiadne elektromagnetické žiarenie, ktoré na neho dopadne, nazývame absolútne čiernym telesom. Teda sa jedná o hypotetické teleso, ktoré úplne pohlcuje elektromagnetické žiarenie všetkých vlnových dĺžok dopadajúce na jeho povrch.

Na základe skúseností sa ukázalo, že čierne teleso možno realizovať dutinou so začierne-nými vnútornými stenami a malým otvorom, ktorým žiarenie vystupuje, vid' obr. 5. Pri mnohonásobných dopadoch a odrazoch na stenách dutiny sa toto žiarenie pohlcuje a opäť je dutinou vyžarované. Otvorom vychádza len malá časť žiarenia, takže tepelná rovnováha sa podstatne nenaruší. Pri pokusoch sa používa dutina v tvare dlhej úzkej trubice z ťažko tavitelného materiálu. Trubica sa vkladá do elektrickej piecky, kde sa jej steny zohrejú na požadovanú teplotu T . Žiarenie vychádzajúce z otvoru má potom vlastnosti ako žiarenie čierneho telesa (www.oskole.sk).



Obr. 5 Znáznornenie čierneho telesa (www.oskole.sk)

Teplotné žiarenie čierneho telesa popisujú nasledovné zákony:

- Planckov vyžarovací zákon
- Wienov posuvný zákon
- Stefan – Boltzmanov zákon
- Kirchhoffov zákon

Planckov vyžarovací zákon vyjadruje závislosť intenzity žiarenia čierneho telesa na vlnovej dĺžke a termodynamickú teplotu, vid' obr. 6. Pri konštantnej teplote telesa dosahuje maximum pri λ_{max} . Wien zistil, že so zvyšujúcou sa teplotou sa toto max. posúva ku kratším vlnovým dĺžkam. Vlnovú dĺžku určíme zo vzťahu :

$$\lambda_{max} = \frac{2,88 \cdot 10^3}{T} [\mu m] \quad (3.1)$$

kde T – teplota telesa [K]