

## OSNOVE TERMOVIZIJE

Niko Tršan, Fotona d.d., Stegne 7, 61210 Ljubljana

### Principles of Thermal Imagers

#### ABSTRACT

Thermal Imaging (TI), frequently called also Thermovision or Infrared Imaging, is an infrared analog of visible TV camera. A connotation of thermal imaging is so a system that provides a visible rendition of an invisible infrared radiation scene.

The purpose of thermal imaging is simply to see in the dark by detection and appropriate processing of the natural radiation emitted by all material bodies. At 300K, the peak of this radiation occurs at about 10  $\mu\text{m}$  wavelength. Since there is an atmospheric transmission window between 8  $\mu\text{m}$  and 14  $\mu\text{m}$ , this is a useful region in which to operate. There is also a window between 3 - 5  $\mu\text{m}$ , so operation here is also possible.

Application of thermal imaging is of great importance in military and security fields, but its importance in commercial field as being a valuable measuring equipment and analyzing tool is also very high and is rapidly growing.

This paper touches briefly the principles of operation, starting with fundamentals of TI and ending up with short description of achievements in this high technology field in Slovenian industry.

#### POVZETEK

Termovizijske naprave so infrardeča analogija navadnim video-kameram, ki očem nevidno IR-sevanje spreminjajo v vidno sliko. Sevanje teles s temperaturo 300 K ima vrh pri valovni dolžini približno 10 mikrometrov, ozračje pa je precej prepustno za sevanje z valovnimi dolžinami med 8 in 14 mikrometri. Podobno atmosfersko okno obstaja tudi za del spektra med 3 in 5 mikrometri in termovizijske naprave s pridom izkoriščajo obe območji.

Seveda je termovizija daleč najpomembnejša za vojake in policiste, a njena uporabnost in veljava v industriji, znanosti in tudi v medicini postajata vse večji.

V članku so kratko opisane osnove termovizije, na koncu pa je opisano tudi nekaj dosežkov slovenske industrije v tej visokotehnoški veji.

### 1 UVOD

Termovizijske naprave, ki jih pogosto imenujemo tudi infrardeče ali pa toplotne kamere, so človekovo sposobnost zaznavanja svetlobe razširile iz vidnega v infrardeči (IR) del spektra. Po delovanju se vsebinsko prav nič ne razlikujejo od navadnih video kamer, le da IR-sevanje teles spremenijo v vidno sliko.

Medtem ko je vidna slika rezultat razlik v reflektivnosti teles v sceni in je za njen nastanek nujno potrebna osvetlitev, bodisi z naravno ali pa z umetno svetlobo, je toplotna slika rezultat variacij lastnega sevanja, ki je posledica razlik v temperaturi in emisivnosti. Prav v tem pa tiči razlog za izredno razširjeno uporabo termovizije v vojaške in varnostne namene.

Uporabnost termovizijskih naprav je omejena na območje "atmosferskih oken", to je na tisti del spektra IR-sevanja, ki ga ozračje prepušča v zadovoljivi meri. Najpomembnejši za termovizijo sta okni v območju valovnih dolžin med 3 in 5 ter med 8 in 14 mikrometri. Za termovizijo pa je ugodna tudi okoliščina, da telesa z normalnimi zemeljskimi temperaturami, to je približno

300 K (27 °C), sevajo največ energije prav v območju valovnih dolžin med 8 in 14 mikrometri.

V splošnem so sistemi za infrardečo detekcijo, kamor seveda sodijo tudi termovizijske naprave, slabši od primerljivih optičnih, in sicer v smislu občutljivosti, ločljivosti ter enostavnosti uporabe. Vsled tega jih je smiselno uporabljati tam, kjer sistemi za detekcijo vidne svetlobe odpovedo. Za ilustracijo je spodaj navedenih nekaj zgledov uporabe:

- pregledovanje in nadzorovanje terena pri zmanjšani vidljivosti (noč, prah, dim, meglice)
- meritve toplotnih izgub stavb, toplovodov in podobnih sistemov
- odkrivanje začetnih požarov v rudnikih
- zgodnje odkrivanje motenj in bolezni vegetacije
- odkrivanje in merjenje stopnje določenega tipa onesnaženja okolice
- nekontaktno in daljinsko merjenje temperature
- odkrivanje plitvo zakopanih in zazidanih objektov ter napeljav
- iskanje preživelih v elementarnih nesrečah in v dimu gorečih stavb

Lahko bi našli še mnogo zgledov uporabe termovizijskih naprav v medicinske, industrijske in znanstvene namene, a to presega okvir tega članka.

### 2 Kratka zgodovina termovizije

Prvi resnejši koraki v termovizijo so bili storjeni v letu 1940, ko so pričeli iskati tehnične rešitve v dveh smereh. Prva je bila razvoj multielementnega diskretnega IR-detektorja in optomehanskega analizatorja slike-skenerja, druga pa je šla v razvoj IR-vidikonske elektronke. Oba koncepta sta se zgledovala po televiziji, odtod tudi ime termovizija. Ta razdelitev na sisteme z optomehanskim in elektronskim skeniranjem velja še danes, treba pa je dodati, da so vsi operativni visokokvalitetni vojaški termovizijski sistemi še vedno optomehanski, se pa vlagajo velikanska sredstva v raziskave in razvoj matričnih IR-detektorjev z elektronskim skeniranjem.

Leta 1956 so Američani izdelali prvi termovizijski sistem, ki je deloval v območju valovnih dolžin med 8 in 14 mikrometrov. Uporabljalo ga je letalstvo za snemanje tal.

Leta 1960 je firma Perkin-Elmer razvila prvo kopensko termovizijo, imenovano "Prism Scanner". Tehnične zmogljivosti, merjeno z današnjimi merili, so bile zelo skromne:

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| • vidno polje:             | 5 ° (okroglo)                                      |
| • prostorska ločljivost:   | 1 miliradian                                       |
| • temperaturna ločljivost: | 1°C  |
| • slikovna frekvenca:      | 5 sl./sec.   |
| • zaslon:                  | katodna elektronka z dolgo perzistenčnim fosforjem |

To je bil začetek intenzivnega in uspešnega razvoja dolge vrste termovizijskih naprav. V letih od 1960 do 1974 so v Ameriki razvili okrog 60 različnih prototipov in proizvedli nekaj sto termokamer za vse rodove vojske.

V razvoju, proizvodnji ter uvajanju termovizije v industrijske namene je bila prva, in mnogo let tudi edina, švedska firma AGA, danes znana pod imenom AGEMA, ki je tudi zaščitila ime "termovizija" (thermovision). Njihova prva industrijska termokamera je zagledala luč sveta le nekaj let po Perkin-Elmerjevi, kvaliteta slike pa je bila popolnoma primerljiva z ameriško.

Število proizvajalcev termovizijskih naprav raste, in deželam, ki obvladujejo to tehnologijo, se je pridružila tudi Slovenija.

### 3 Fizikalne osnove termovizije /1,2/

#### 3.1 Sevanje teles

Vsa materialna telesa s temperaturo nad absolutno ničlo sevajo elektromagnetno (EM) valovanje, ki ga popisuje Planckova enačba za sevanje črnega telesa:

$$W_{\lambda} = \frac{dj}{d\lambda_{BB}} = \left( \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \right) \left[ \exp\left( \frac{hc}{\lambda kT} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

$[W m^{-2} \mu m^{-1}]$

h.....Planckova konstanta =  $6.626 \cdot 10^{-34} Js$

k.....Boltzmannova konstanta =  $1.381 \cdot 10^{-23} JK^{-1}$

c.....hitrost svetlobe v vakuumu =  $2.997 \cdot 10^8 m s^{-1}$

T.....absolutna temperatura

$\lambda$ .....valovna dolžina

BB..črno telo

Sevanje realnega telesa pa je podano z enačbo:

$$\frac{dj}{d\lambda_{RB}} = \varepsilon(\lambda, T) \frac{dj}{d\lambda_{BB}} \quad (2)$$

$\varepsilon(\lambda, T)$ .....emisivnost

RB.....realno telo

Enačbo 2 lahko smatramo za definicijo emisivnosti, ki zavzema vrednosti od 0 (belo telo) do 1 (črno telo).

Celotno sevano moč dobimo z integracijo enačbe 2 preko vseh valovnih dolžin, to pa je nam vsem znani Stefanov zakon:

$$j = \varepsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

Logaritmični diferencial enačbe 3 ilustrira pomembnost emisivnosti in njen prispevek k nastanku termovizijske

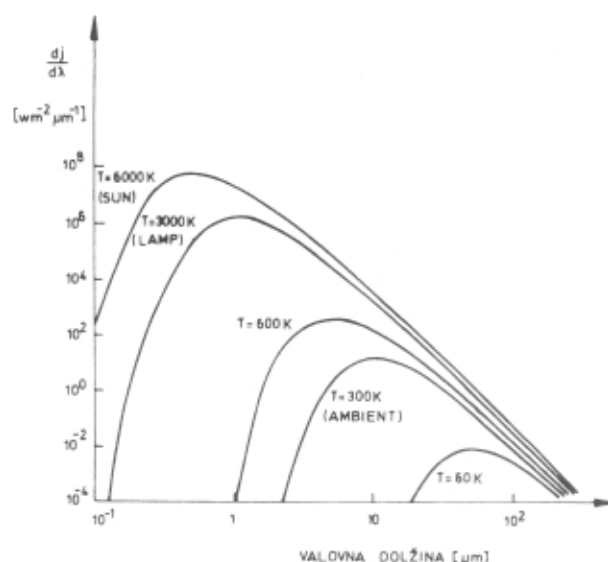
slike, ki je posledica variacij sevanja, prihajajočem iz posameznih točk IR-scene:

$$\frac{dj}{j} = \frac{d\varepsilon}{\varepsilon} + \frac{dT}{T} \quad (4)$$

Kdor se rad igra s številkami, lahko hitro ugotovi, da sprememba emisivnosti za 1% pri temperaturi 300K pomeni enako spremembo sevane moči kot sprememba temperature za 0,76 K.

Poznavanje emisivnosti kot funkcije valove dolžine, temperature in kota opazovanja je zelo pomembno pri uporabi termovizije, a seveda tudi preprostejših IR-naprav, za nekontaktno merjenje temperature.

Odvod enačb 1, 2, ali 3 po temperaturi nam da spremembo sevane moči na enoto stopinje, ki je v spektralnem pasu od 8 do 14  $\mu m$  in za črno telo s temperaturo 300K približno  $2,6 W m^{-2} K^{-1}$ . Najboljše današnje termokamere s fotonskimi detektorji, ki imajo ekvivalentno šumno temperaturo nekaj stotink stopinje, lahko ustvarijo zelo kvalitetno termično sliko IR-scene že pri temperaturnih razlikah nekaj stopinj.



Slika 1. Sevanje črnega telesa

#### 3.2 Vpliv ozračja

IR-sevanje pri prehodu skozi ozračje oslabi zaradi absorpcije ter sipanja na molekulah, aerosolih, dimu, prahu, dežju in snegu. Poznavanje mehanizmov, predvsem pa stopnje slabljenja sevanja, je zelo pomembno s stališča uporabe termovizijskih naprav v vojaške namene. Od tega je namreč odvisna razdalja odkrivanja in prepoznavanja objektov, kar je nedvomno najpomembnejši podatek. Največ podatkov o prepustnosti ozračja so zbrali Američani, in to po vsem planetu, v vseh letnih časih, v različnih nadmorskih višinah in za cel spekter sevanj od UV- do radijskih valov.

Največji del termičnega sevanja z valovnimi dolžinami med 2 in 20 mikrometri se absorbira na vodni pari, ogljikovem dioksidu in ozonu, ki tako v največji meri omejujejo prepustnost ozračja na znani "okni" 3 - 5 in 8 - 14 mikrometrov.

Drugi mehanizem slabljenja sevanja, to je sipanje na molekulah, aerosolih, prahu, dimu, meglicah, megli in oblakih, je zelo odvisen od velikosti delcev in valovne dolžine svetlobe. V splošnem velja, da je slabljenje manjše, čim manjši so delci in čim daljša je valovna dolžina. To je zelo pomembno dejstvo, kajti to pomeni, da je slabljenje IR-sevanja z valovnimi dolžinami med 8 in 14 mikrometri bistveno manjše kot slabljenje vidne svetlobe pri enakih fizikalnih razmerah, v ozračju seveda. S termovizijsko kamero tako torej vidimo skozi prah, dim, skozi tanjše in redkejše oblake, skozi meglice (mrč) veliko bolje kot s prostim očesom.

Prepustnost ozračja lahko popišemo z enačbo:

$$\tau = \exp(-\sigma R) \quad (5)$$

pri čemer je:

$$\sigma = \alpha + \gamma \quad (6)$$

$\sigma$ .....celotni koeficient slabljenja

$\alpha$ .....absorpcijski koeficient

$\gamma$ .....sipalni koeficient

R.....razdalja

Tu velja pripomniti, da je matematično-fizikalni model slabljenja IR-sevanja pri prehodu skozi ozračje precej kompleksnejši kot ga opisuje zgornja enačba 5, ki rabi le za vsebinsko ponazoritev. Za resne izračune obstajajo matematični modeli, ki upoštevajo množico eksperimentalno dobljenih podatkov o ozračju, kot na primer: temperatura, vlažnost, koncentracija različnih konstituentov in njihova porazdelitev po kraju in velikosti, opis turbulence in še kaj bi se našlo.

Absorpcijska komponenta prepustnosti je določena v glavnem s temperaturo in relativno vlažnostjo ozračja, medtem ko sipalno komponento določimo iz vidljivosti. Po definiciji je vidljivost razdalja, pri kateri je kontrast med svetlostjo opazovanega predmeta in okolice 0,02 oziroma 2%. Največji možni kontrast je seveda 1,0 oziroma 100%, vendar le v primeru enakomerno osvetljenega idealnega črnega in belega vzorca. V praksi to pomeni, da pri kontrastu 2% oko predmet ravno še udobno vidi, loči od okolice ali prepozna, če so izpolnjeni tudi drugi kriteriji za prepoznavanje. Iz enačbe 5 dobimo vidljivost, ki jo določa sipanje:

$$R_v = \frac{3.912}{\gamma} [km] \quad (8)$$

Za ilustracijo so v spodnji tabeli podane značilne vrednosti sipalnega koeficienta  $\gamma$  v odvisnosti od valovne dolžine in za nekaj različnih vidljivosti.

Pojem "vidljivosti" je sicer vezan na vidno svetlobo in oko, zato naj nam bo odpuščeno, ker bomo pri razlagi tabele uvedli tudi "termovizijsko" (ali IR) vidljivost.

Vzemimo torej primer rahlo meglenega ozračja, ko je optična vidljivost 1 km. Sipalni koeficient je v tem primeru precej velik (~4) in enak do valovne dolžine 5,0 mikrometrov. To pomeni, da bi tudi termokamera, ki bi

sprejemala IR-sevanje v pasu od 3 do 5 mikrometrov "videla" le 1 km daleč. Bistveno večja (~4,2 km) pa je vidljivost za valovne dolžine okrog 11 mikrometrov.

Tabela I. Sipalni koeficient

Valovna dolžina [ $\mu m$ ]	Vidljivost 44.5 km jasno $\gamma [km^{-1}]$	Vidljivost 9.8 km rahel mrč $\gamma [km^{-1}]$	Vidljivost 2.8 km gostejši mrč $\gamma [km^{-1}]$	Vidljivost 1.0 km rahlo megleno $\gamma [km^{-1}]$
0.55	0.088	0.40	1.40	4.0
3.0	0.026	0.30	1.1	4.0
4.0	0.014	0.20	1.4	4.0
5.0	0.0088	0.15	2.0	4.0
8.0	0.0079	0.07	0.4	1.1
9.0	0.0064	0.05	0.35	1.06
10.0	0.0053	0.035	0.30	1.0
11.0	0.0045	0.032	0.23	0.93
12.0	0.0038	0.030	0.20	0.90

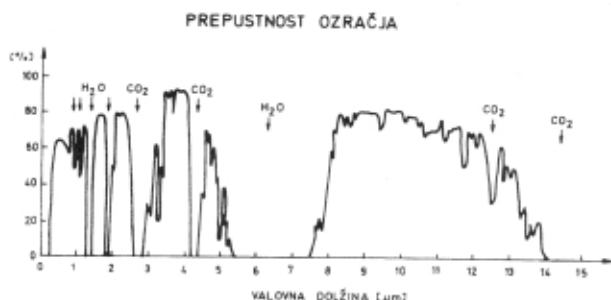
V primeru, ko je optična vidljivost 2,8 km, pa so razmere še zanimivejše. V tem primeru je narava in sestava delcev v ozračju takšna, da je termovizijska vidljivost za pas od 3 do 5 mikrometrov celo nekoliko manjša od optične, a se v pasu od 8 do 12 mikrometrov poveča na okrog 13 km.

S poskusi je bilo ugotovljeno, da je v megli in oblakih slabljenje IR-sevanja v območju okna 3 - 5 mikrometrov približno enako kot za vidno svetlobo, medtem ko je v območju okna od 8 do 14 mikrometrov za 2- do 3-krat manjše. To pa praktično pomeni za podoben faktor boljše "vidljivost".

Prepustnost ozračja je zelo odvisna tudi od letnega časa, zemljepisne lege in nadmorske višine. V srednjih geografskih širinah je v pasu od 8 do 14 mikrometrov prepustnost suhega ozračja precej boljše kot v pasu od 3 do 5 mikrometrov, kjer je ogljikov dioksid zelo močan absorber IR-sevanja. Vlažno tropsko ozračje pa ima precej boljše prepustnost v pasu od 3 do 5 mikrometrov, kajti v pasu od 8 do 14 mikrometrov vodna para močno absorbira IR-sevanje.

Često se postavlja vprašanje, katero atmosfersko okno je boljše za opazovanje s termovizijsko kamero. Odgovor sicer ni najbolj preprost, toda dejstvo, da megličasto ozračje precej močnejše slabi sevanje v pasu od 3 do 5 mikrometrov kot v pasu od 8 do 14 mikrometrov govori v prid slednjemu.

Opisani primeri so le manjša ilustracija posledic fizikalnih zakonov, ki določajo prepustnost ozračja, ki pa jih uporabnik termovizijskih naprav mora vsaj do neke mere razumeti in poznati, da lahko izkoristi vse prednosti, ki mu jih te nudijo.



Slika 2. Prepustnost ozračja

#### 4 Zgradba in delovanje termovizijskih naprav

Termovizijske naprave so tudi po zgradbi, ne le funkcijsko, zelo podobne videokameram. Glavni sestavni moduli so:

- optika
- skener z detektorjem
- elektronika
- prikazovalnik slike.

**Optika** ima tudi pri težavah nalogo, da ustvari čim boljše sliko scene. Konstruirana in izdelana je po enakih principih kot optika za vidno svetlobo, a od nje se razlikuje z nekaj posebnostmi, ki zelo grenijo življenje razvojnim inženirjem in izdelovalcem. Materiali, iz katerih se izdeluje, pa so pravi posebnosti, tako po lastnostih kot ceni. Med številno množico je najbolj znan germanij. Uporablja se praktično v vseh napravah, ki sprejemajo IR-sevanje v pasu od 8 do 14 mikrometrov.

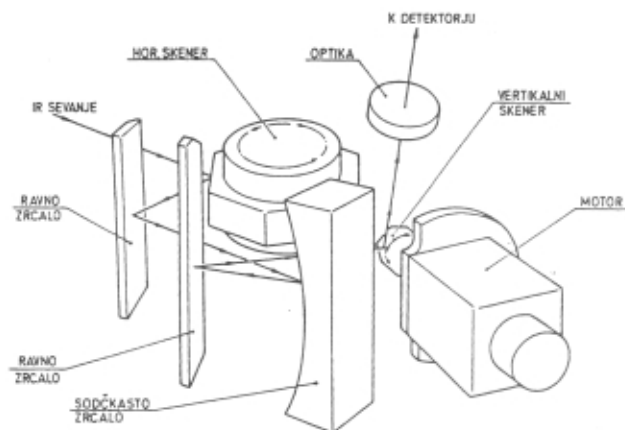
V spektru od 3 do 5 mikrometrov je ključni material silicij, pogosto pa srečamo tudi safir, seveda za manjše optične elemente.

Lastnosti materialov so natančno predpisane in izpolnjevati jih morajo zelo strogo. Tako kot iz navadnega okenskega stekla ne moremo narediti niti očal, kaj šele dobrega fotografskega objektiv, tudi običajen germanij ni uporaben za izdelavo IR-optike. Temu primerna je tudi njegova cena. Za ilustracijo povejmo, da 1 kg optično kvalitetnega germanija stane okrog 1200 USD. Za srednje veliko termovizijsko napravo se ga porabi okrog 3 kg. Zahtevna obdelava in kontrola kvalitete optičnih elementov pa doda še svoje, tako da je proizvodna cena IR-teleskopa s povečavo med x10 in x12 ter s premerom vhodne odprtine 140 mm reda 10.000 USD.

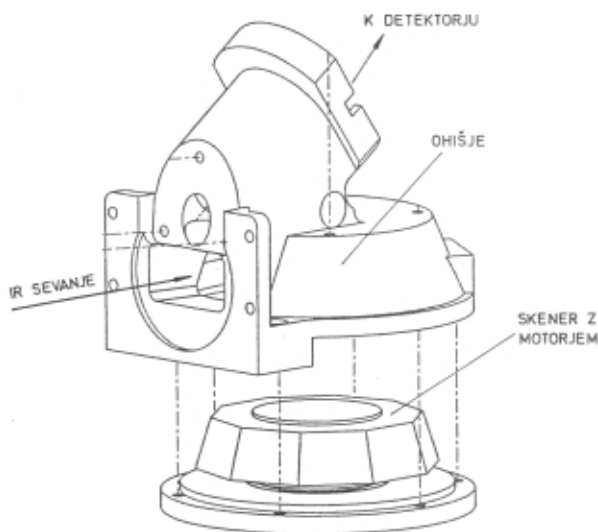
**Skener** z vrtečimi in nihajočimi zrcali premika sliko preko detektorja. Razlog za to je prav preprost. Če si želimo sliko s 100.000 slikovnimi elementi, kar je za termovizijo že kar dobro, potem bi moral imeti detektor tudi 100.000 senzorskih elementov, za vsako točko slike svojega. Današnji fotoniski IR-detektorji, občutljivi za spekter od 8 do 14 mikrometrov, pa imajo le od enega do nekaj sto elementov, torej je treba sliko premikati. Hitrost premikanja je tolikšna, da slika zadovoljuje televizijske standarde. Primer za ilustracijo: v angleški visokokvalitetni (vojaški) napravi se motorček, na katerem je nameščena poligonska prizma s šestimi zrcali za

premikanje slike v horizontalni smeri, zavrti 19500-krat v minuti. Nihajoče zrcalo, ki premika sliko po vertikalni smeri, pa zaniha 50-krat v sekundi. IR-detektor ima 8 senzorskih elementov, slika pa zadovoljuje evropske televizijske standarde.

Termovizijska naprava PTC-10, ki jo izdeluje slovensko podjetje Fotona, ima en sam, dokaj domiselno oblikovan, skenirni element, ki premika sliko istočasno v obeh smereh. Zavrti se 1500-krat v minuti, zapiše pa 25 slik v sekundi.



Slika 3. Shema skenerskega modula angleške termovizijske naprave



Slika 4. Shema skenerskega modula Fotonine termovizijske naprave PTC-10

**Detektor** je srce termovizijske naprave, saj IR-sevanje scene, ki ga vanj usmerjata optika in skener, pretvarja v električne signale. Njemu je podrejena celotna zasnova naprave. Določa, kakšna bo optika, kako bo konstruiran skener, kaj bo počela elektronika, kakšna bo občutljivost in, ne nazadnje, kolikšna bo cena. Detektor je namreč najdražji element. Cene se trenutno sučejo od nekaj tisoč do nekaj deset tisoč USD, odvisno od kvalitete in števila senzorskih mest.

Današnji fotoniski IR-detektorji za spekter od 8 do 14 mikrometrov se morajo hladiti na temperaturo vsaj 80K (-193°C). Tehnike hlajenja so različne, najpreprostejša

je uporaba tekočega dušika, ki ima vrelišče pri 77K (-196°C). Ta način hlajenja se uporablja le pri cenejših civilnih napravah, za vojaške pa je neuporaben, in zato so se že v pionirskih časih termovizije zagrizeno lotili tega problema. Tako je nastala močna tehniška panoža, ki se ukvarja z razvojem in izdelavo miniaturnih hladilnih strojev za doseganje nizkih temperatur pod 80K.

Hladilnike, ki jih najpogosteje najdemo v sodobnih termovizijskih napravah, razvrstimo v dve skupini:

1. Joule-Thomsonovi hladilniki
2. Stirlingovi hladilniki.

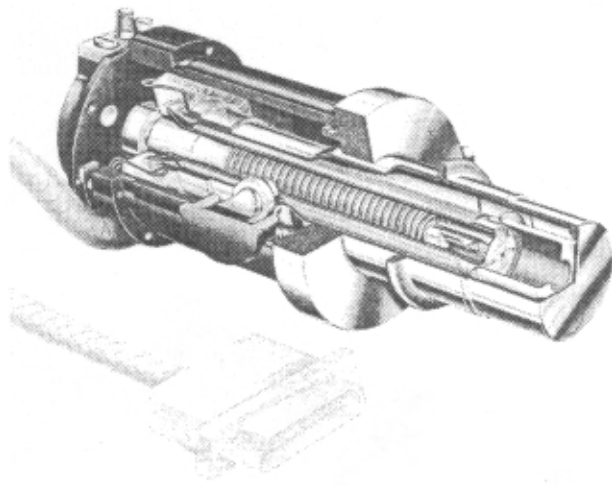
Joule-Thomsonovi minihladilniki utekočinjajo zrak, lahko pa tudi kak drug plin, ki se pretaka skozi in je običajno shranjen v malih jeklenkah pod zelo visokim tlakom reda velikosti 32000 kPa. Zrak, shranjen v jeklenki s prostornino 0,6 litra in tlakom 32000 kPa, zadošča za 4,5 ure neprekinjenega hlajenja pri zunanji temperaturi 20°C.

Neprijetna podrobnost pri Joule-Thomsonovih hladilnikih pa je, da mora biti delovni plin izredno čist in suh, sicer se hladilnik zamaši in zamrzne. Za polnjenje jeklenke tako potrebujemo dokaj drage visokotlačne kompresorje in zelo dobre filtre.

Ta način hlajenja se upravlja predvsem pri majhnih prenosnih napravah, kjer morata biti poraba električne energije in masa čim manjši.

Stirlingovi hladilniki so sestavljeni, preprosto povedano, iz majhnega električnega kompresorja in z njim povezanega hladnega prsta, ki se namesti v Dewarjevo posodo detektorja. Njihova trajnost je nekaj tisoč ur, odpadejo pa vse logistične težave, povezane s pridobivanjem, shranjevanjem in distribuiranjem čistega zraka.

Stirlingovi hladilniki so večji in težji od Joule-Thomsonovih, energijsko še precej požrešni, tako da se uporabljajo v napravah, ki so vgrajene v različna vozila.



Slika 5. Prerez sodobnega IR-detektorja za spekter 8 - 13 mikrometrov z vgrajenim Joule-Thomsonovim hladilnikom (GEC Infrared, Anglija).

**Elektronika** opravlja kup nalog. Poganja in nadzira motorje skenerja, ojačuje mikrovoltne signale detektor-

jev in jih obdeluje ter predeluje s prijemi, ki so zelo podobni onim v televizijski tehniki. Odpravlja in popravlja razne hibe v termični sliki. Opozori operaterja, če se ji zazdi, da je v sceni kaj zanimivega ali celo nevarnega, pa še kaj bi se našlo.

**Prikazovalniki** termovizijske slike so pri napravah I. generacije iz svetlečih diod - LED, ki sevajo rdečo ali zeleno svetlobo, operater pa opazuje sliko skozi optiko okularja. Dinamika in kvaliteta slike prikazovalnikov LED pa ni tako dobra, kot jo daje katodna elektronka, in to je eden od razlogov za njeno uporabo v prikazovalnikih naprav II. generacije, seveda pa svoj delež prispeva tudi vse tesnejše povezovanje termovizije in računalnika.

Razvoj IR-področja, tako materialov, komponent, naprav kot idej, gre seveda naprej. Napoved bodočnosti lahko strnemo v nekaj naslednjih stavkih.

- IR-optika. Prevladuje mnenje, da je dosegla stopnjo, ko ne predstavlja več omejitvenega faktorja za izboljšavo lastnosti termovizijskih in drugih IR-naprav.
- IR-detektorji in mehanski skenerji. Tu se bodo zgodile največje spremembe, saj so detektorji in mehanski skenerji najšibkejši člen v verigi. V naslednjih letih se bo kvaliteta mozaičnih detektorjev, ki so danes na stopnji prototipov, zelo izboljšala in število senzorskih elementov se bo povečalo od nekaj tisoč na nekaj sto tisoč. Skeniranje bo elektronsko, tako da bodo odpadli optomehanski skenerji. Hladilniki bodo praktično enaki, le Stirlingovim obetajo 30-odstotno "shujšanje".
- Elektronika. Mikroročunalniki in digitalna obdelava signalov ter slike bodo precej prispevali k izboljšanju občutljivosti ter interpretaciji termične slike. Naprave bodo manjše, lažje, boljše in menda tudi cenejše. Vsaj za civilne so takšne napovedi.

Termovizijskih naprav je danes na tržišču veliko. Ameriki, Angliji in Franciji, ki so bile še pred 10 leti edine proizvajalke vojaških naprav, so se pridružile Italija, Švedska, Nizozemska, Nemčija, Izrael, Kanada, Južnoafriška republika, Kitajska in tudi Slovenija. O stanju v bivši Sovjetski zvezi na področju termovizije pa ni prav zanesljivih podatkov.

### 5 NETD in MRTD

Termovizijske kamere so specificirane z množico podatkov. Našteto le najpomembnejše:

- spektralno območje delovanja (3-5  $\mu\text{m}$  ali 8-14  $\mu\text{m}$ )
- IR-detektor (tip, geometrija in število elementov, način hlajenja)
- celotno zorno polje (izraženo v kotnih stopinjah za hor. in vert. smer)
- slikovna frekvenca
- število IR-vrstic v sliki (ali število slikovnih elementov)
- geometrijska ločljivost (trenutno zorno polje detektorskega elementa)
- temperaturna ločljivost

Najpomembnejši podatek je temperaturna ločljivost, ki se podaja z dvema parametroma, in sicer:



- ekvivalentna šumna temperaturna razlika, za katero se je udomačil angleški izraz NETD-Noise Equivalent Temperature Difference (v najnovejšem času se uporablja samo NET)
- minimalna ločljiva temperaturna razlika (MRTD-Minimum Resolvable Temperature Difference).

NETD, ki je objektivni parameter, je določen predvsem z geometrijo in detektivnostjo detektorja ter z velikostjo optike. Izraz zanj izpeljemo preko odvoda enačbe 1 po temperaturi in z izrazom za odzivnost IR-detektorja. Za ilustracijo zapišimo končni izraz, ki je zelo pomemben za projektante termovizijskih naprav:

$$NETD = \frac{\pi \sqrt{abB}}{\alpha \beta A_0 \int_0^{\infty} \frac{\partial W_{\lambda}}{\partial T} D^*(\lambda) \tau_0(\lambda)} \quad (9)$$

- a,b linearni dimenziji detektorskih elementov (navadno od 25 do 70  $\mu\text{m}$ )
- B frekvenčna širina (navadno od 20 kHz do 500 kHz)
- $\alpha, \beta$  trenutno zorno polje detektorskega elementa (navadno reda 0,1 do 1,0 miliradiana)
- $A_0$  površina vhodne odprtine optike
- $D^*(\lambda)$  specifična detektivnost IR-detektorskih elementov (reda  $2 \cdot 10^{10} \text{ cm} \sqrt{\text{Hz W}^{-1}}$ )

$\frac{\partial W_{\lambda}}{\partial T}$  odvod enačbe 1 po temperaturi

$\tau_0(\lambda)$  prepustnost optike

MRTD je še pomembnejša karakteristika, saj združuje prostorsko in temperaturno ločljivost naprave ter opazovalca, ki s svojimi očmi in možgani (sistem za procesiranje slike) ocenjuje kvaliteto in uporabnost termične slike. Ne bi se spuščali v podrobnosti, temveč spet le za ilustracijo zapišimo končno, za konstruktorje najpomembnejšo, formulo:

$$MRTD = \frac{6NETD \sqrt{\beta \alpha}}{\sqrt{T_e \dot{F} \pi}} \frac{f_T}{MTF_s} \quad (10)$$

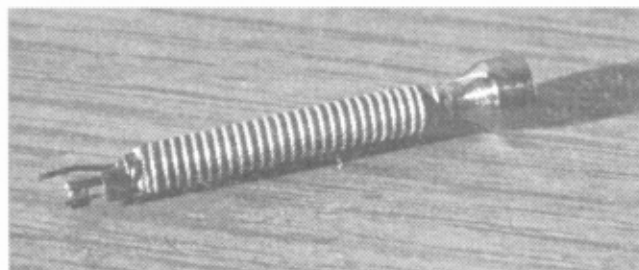
- NETD ekvivalentna šumna temperatura
- $\alpha, \beta$  trenutno zorno polje detektorskega elementa
- $f_T$  prostorska frekvenca opazovanega objekta (linijski pari na miliradian)
- $T_e$  integracijski čas očesa (reda 0.2 s)
- F slikovna frekvenca (navadno 25 Hz za evropske naprave)
- $MTF_s$  modulacijska prenosna funkcija celotnega sistema, vključno z opazovalcem

Iz enačbe 10 sledi več zanimivih spoznanj:

- za objekte z nizko prostorsko frekvenco (to so ali dovolj veliki ali pa dovolj blizu, da je njihova slika na monitorju naprave velika) je MRTD majhna. V praksi je to nekaj stotink stopinje in dovolj za uporabno kvaliteto slike.
- višja slikovna frekvenca ugodno vpliva na MRTD
- MTF celotnega sistema mora biti čim večja, seveda pa je teoretično lahko kvečjemu 1 (100%)
- za opazovanje ali merjenje oddaljenih objektov morata biti  $\alpha$  in  $\beta$  majhni, to pa pomeni optiko z veliko vhodno odprtino in dolgo goriščno; optika s premerom vhodne odprtine 300 mm in z goriščno 600 mm ni nič posebnega.

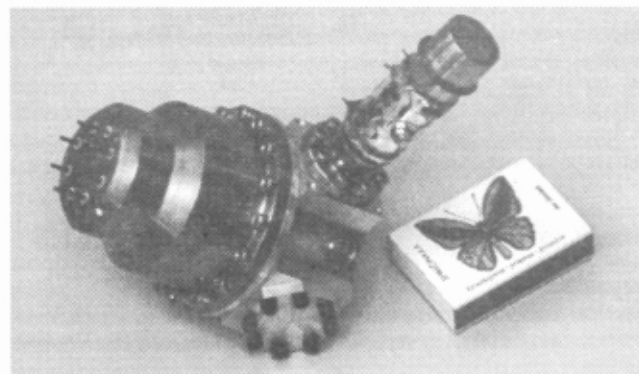
## 6 Termovizijski dosežki slovenske industrije

Slovensko podjetje Fotona d.d. (prej Iskra Elektrooptika) se že od leta 1965 načrtno ukvarja z raziskavami, razvojem, proizvodnjo in trženjem elektrooptičnih naprav in sistemov za vojaško ter civilno rabo.



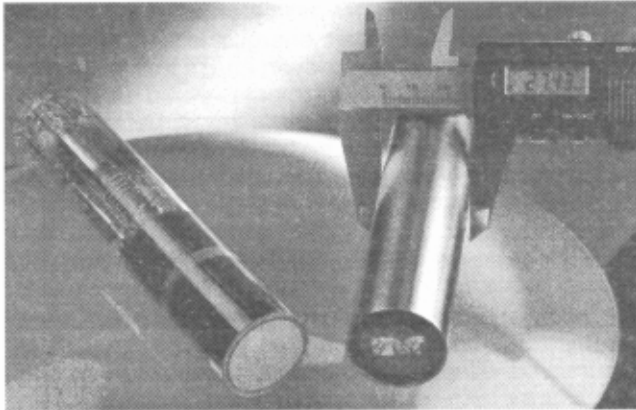
Slika 6. Joule-Thomsonov hladilnik (Cryoref d.o.o., Slovenija)

Prve korake v infrardečo tehniko je Elektrooptika naredila leta 1978, v letu 1981 pa so se začele resnejše raziskave na polju termovizije. Možnosti za sodelovanje s tujino so bile takrat zelo omejene, saj je bila resna termovizija obravnavana kot vojaška skrivnost. Dostopa do ključnih komponent ustreznе kvalitete, kot so IR-detektor s hladilnikom, katodna elektronika, motorčki za skener in visokotlačne jeklenke, takrat nismo imeli. Tako se je iz nuje rodilo sodelovanje med Elektrooptiko, Inštitutom za elektroniko in vakuumsko tehniko iz Ljubljane in firmo CRYOREF d.o.o. iz Škofje Loke ter nekaterimi Iskrinimi podjetji. Želja je bila, da razvijemo čimveč nedostopnih komponent. Po letih trdega razi-



Slika 7. Stirlingov hladilnik, z vgrajenim IR-detektorjem (IDCA-Integrated Cooler Detector Assembly, prototip, Cryoref d.o.o., Slovenija)

skovalno-razvojnega dela se danes v Cryorefu lahko pohvalijo s serijo različnih tipov Joule-Thomsonovih in Stirlingovih hladilnikov. Razvili so tudi visokotlačno jeklenko s prostornino 0,6 litra in pripadajoči ventil. IEVT pa se je uvrstil med maloštevilno družbo svetovnih proizvajalcev miniaturnih katodnih elektronk, ki izpolnjuje strogo vojaške zahteve /3/.



Slika 8. Miniaturni katodni elektronki (IEVT, Slovenija)

Elektrooptika je v letih 1981 do 1984 razvila nekaj laboratorijskih modelov termovizijskih naprav z enoelementnim detektorjem. Njihova največja vrednost je bila, da so se tako preskusile ideje, izpopolnjevalo znanje in uvajale nekatere nove tehnologije, predvsem za obdelavo in kontrolo IR-optike.

V začetku leta 1985 se je pričelo resno delo na razvoju majhne, prenosne vojaške naprave, ki je bila namenjena protioklepni enotam. Razvoj se je končal leta 1989. V letu 1990 so bila opravljena številna terenska testiranja, od določanja razdalj, ko se prepoznajo različna vojaška vozila, do vodenja protioklepni raket

na razdaljah do 3000 m. Vsi testi so dali odlične rezultate.

V slovenski osvobodilni vojni so bili vsi delujoči prototipi in modeli na terenu, nekaj jih je razjasnjevalo noč celo do sredine oktobra 1991.

Velja omeniti, da je Elektrooptika razvila tudi civilno termovizijsko kamero, imenovano TOPSCAN 808, in jo prodala v štiri države.

Kakšni so načrti za prihodnost? Inštitut za elektroniko in vakuumsko tehniko, CRYOREF d.o.o. in Fotona tesno sodelujejo pri raziskavah in razvoju nove generacije IR-detektorja, ki je integriran direktno s hladnim prstom miniaturnega Stirlingovega hladilnika. Uspešno razvit modul obeta zamenjavo Joule-Thomsonovih hladilnikov tudi v prenosnih napravah.

### 7 Sklep

Termovizijske naprave postajajo nepogrešljiva in že kar standardna oprema v armadah po svetu, ne le v zahodnih deželah.

Na civilnem področju pa, v povezavi z računalniško tehniko in tehnologijo obdelave in prikazovanja podatkov, postajajo termovizijske naprave zelo močno orodje pri razvoju novih izdelkov, nadzoru proizvodnih procesov in kontroli kvalitete, in to ne le tam, kjer gre za termične pojave, temveč precej širše.

### 8 Literatura

- /1/ J.M.Lloyd: Thermal Imaging Systems, 1975 Plenum Press, New York
- /2/ Stephen B. Campana, Editor: Passive Electro-Optical Systems (The Infrared&Electrooptical Systems Handbook, Copublished by Infrared Information Analysis Center and SPIE Optical Engineering Press, Washington 1993)
- /3/ V. Nemanič, Vakuumist, 25 (1991) 4-5

## OBVESTILO

### 3. slovenska konferenca o materialih in tehnologijah, Portorož, 4-6 okt. 1995

Posvetovanje organizirajo: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Kemijski inštitut, Inštitut "Jožef Stefan", Slovensko društvo za materiale, Slovensko kemijsko društvo: sekciji za polimere in keramiko in Društvo za vakuumsko tehniko Slovenije.

Posvetovanje je namenjeno predstavitvi temeljnih in aplikativnih raziskovalnih ter razvojnih dosežkov s področja tehnologije in uporabe materialov. Obravnavana bodo naslednja področja:

- sinteza sodobnih kovinskih, keramičnih in kompozitnih materialov
- razvoj modernih proizvodnih tehnologij
- matematično modeliranje in računalniška simulacija procesov in tehnologij
- korozija in propad gradiv
- termična obdelava
- karakterizacija materialov

- vakuumsko tehnika in tehnologije
- tanke plasti in površine
- tribologija
- varstvo okolja.

V posebni sekciji bodo lahko razstavljalci predstavili najnovejše proizvode in opremo. Organizirana bo tudi razstava opreme in proizvodov s področja materialov.

Delovna jezika bosta slovenski in angleški. Zadnji rok za oddajo povzetkov je 30 marec 1995. Pošljite jih na naslov:

#### Organizacijski odbor Portorož 95

Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, pp 431, 61001 Ljubljana,

kjer dobite tudi dodatne informacije (tel. 061 1251 161, fax: 061 213 780, e-mail: monika.jenkoguest.arnes.si)