

# Radijacione smetnje i njihov uticaj na primenu termovizijskih uređaja

Mr Livada Branko, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Definisana je pojam radijacione smetnje. Izvršena je analiza mogućih uticaja različitih tipova radijacionih smetnji na upotrebu termovizijskih uređaja. Za analizu je korišćen uprošćeni model zasnovan na primeni linearizovanog Plankovog zakona zračenja i uprošćenog modela termovizijskog uređaja. Dati su rezultati analize za termovizijske uređaje sa ručnom i automatskom kontrolom temperaturnog nivoa i temperaturnog prozora.

*Ključne reči:* Optika, optoelektronika, IC tehnika, termovizijski uređaji, radijaciona smetnja, ometanje termovizijskih uređaja.

## Korišćene oznake i simboli

$v_s$	- naponski inkrement za jedan nivo sivog u termovizijskoj slici,
$N, N_s$	- broj nivoa sivog u termovizijskoj slici,
$L_{eB0}$	- ekvivalentna vrednost radijanse za nivo belog u slici,
$L_{ec0}$	- ekvivalentna vrednost radijanse za nivo crnog u slici,
$M$	- prenosna funkcija termovizijskog uređaja,
$L_e^{ACT}(x, y)$	- prostorna raspodela radijanse apsolutno crnog tela,
$T(x, y)$	- prostorna raspodela temperature,
$\varepsilon, \varepsilon(x, y), \varepsilon(\lambda, T)$	- emisivnost, prostorna raspodela emisivnosti, zavisnost emisivnosti od talasne dužine i temperature
$\Delta L_e(x, y)$	- prostorna promena radijanse u odnosu na referentni nivo $L_e^R$ (temperaturni nivo-sjajnost),
$\Delta \varepsilon(x, y)$	- prostorna raspodela razlika u emisivnosti objekata u sceni,
$\Delta T(x, y)$	- prostorna raspodela razlika temperature u sceni,
$K_T$	- konstanta proporcionalnosti promene radijanse u funkciji promene temperature,
$K_\varepsilon$	- konstanta proporcionalnosti promene radijanse u funkciji promene emisivnosti,
$C1, C2$	- radijacione konstante,
$M_{e\lambda}(\lambda, T_{ACT})$	- spektralna eksitansa apsolutno crnog tela,
$T_{ACT}$	- temperatura apsolutno crnog tela (ACT),
$\lambda$	- talasna dužina zračenja,
$\lambda_0, \lambda_{0L}, \lambda_{0M}$	- centralna talasna dužina opsega,
$a, a_L, a_M$	- konstanta linearnosti,

$\tau, \tau_s$	- transmisija, transmisija smetnje,
$H, H_s, h$	- visina, visina smetnje,
$W, W_s, w$	- širina, širina smetnje i
$MRT(f^{**})$	- minimalno razloživa temperaturna razlika za zadatu prostornu učestanost.

## Uvod

TERMovIZIJSKI uređaji imaju veoma široke primene u civilstvu u istraživanjima, industriji i medicini (nedestruktivno ispitivanje materijala i struktura, vizuelizacija raspodela temperatura i dr.). Najšira i najznačajnija primena termovizijskih uređaja je, ipak, u vojsci. Noću i u uslovima otežane vidljivosti mogućnosti čula vida su znatno smanjene, pa se takvi uslovi smatraju veoma složenim za ljudske aktivnosti [1]. Na primer:

- otežano je izviđanje, osmatranje i otkrivanje objekata;
- otežano je praćenje pokreta;
- otežana je orijentacija, kretanje i manevar i
- veća je verovatnoća iznenađenja.

Nabrojane teškoće su bile osnovna pokretačka snaga za širu primenu termovizijskih uređaja u vojsci, kao i za motivisanje razvoja ove nove tehnologije.

Termovizijski uređaji formiraju vidljivu sliku na osnovu razlika u radijansi scene koje su posledica razlika u temperaturi ili razlika u emisivnosti objekata u sceni. Za svoj rad termovizijski uređaji najčešće koriste jedan od dva spektralna opsega (M: 3-5 $\mu$ m ili L:8-12 $\mu$ m). Značajnu ulogu u procesu transformacije raspodele radijanse u vidljivu sliku (formiranje termovizijske slike) imaju pojave koje se dešavaju u prostoru između scene i termovizijskog uređaja.

U svim primenama termovizijskih uređaja, kod kojih je važna tačnost određivanja prostorne raspodele temperatura u sceni, bitno je poznavanje uticaja medijuma, koji se nalazi između scene i uređaja, na formiranje i karakteristike

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

termovizijske slike scene.

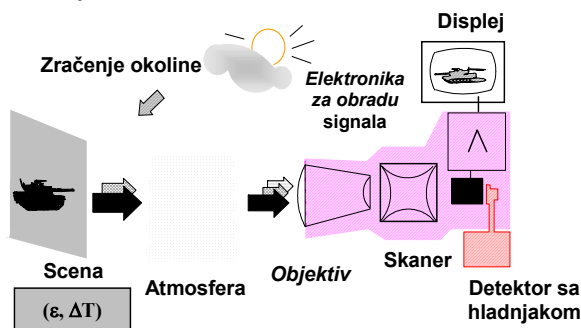
U primenama termovizijskih uređaja za prepoznavanje detalja u sceni na osnovu analize termovizijske slike, važno je utvrditi uslove primenljivosti termovizijskih uređaja za zadati nivo percepcije vizuelne informacije.

Detaljna analiza procesa formiranja termovizijske slike je kompleksna, zbog delovanja velikog broja faktora i složenosti modeliranja ključnih faktora (scena, medijum, uređaj). U ovom radu je zbog toga formulisan uprošćen model kojim kvalitativno se mogu proceniti uticaji i uslovi delovanja degradirajućih procesa na formiranje termovizijske slike. U literaturi je delovanje prirodnih fenomena u atmosferi obrađeno sa fenomenološkog gledišta, ali bez detaljnije analize uticaja na procenu operativnih karakteristika termovizijskih uređaja. Uticaj veštački generisanih sistema nije šire tretiran u otvorenoj literaturi. U ovom radu je data analiza delovanja degradacionih uticaja, na osnovu uprošćenih modela scene, smetnje i termovizijskog uređaja, koja omogućava kvalitativnu procenu efekata delovanja odabranih uticaja.

### Funkcionisanje termovizijskih uređaja

Sva tela sa temperaturom višom od apsolutne nule ( $0K \approx -273^\circ C$ ) zrače elektromagnetsku energiju. Ukupna energija i spektralna raspodela energije koju tela zrače u okolinu zavisi od temperature i emisivnosti (vrste materijala). Tela u čovekovo okolini najveći deo energije zrače u infracrvenom delu spektra (talasne dužine od  $0.78-1000 \mu m$ ).

Sopstveno zračenje tela, zajedno sa reflektovanim zračenjem drugih prirodnih izvora zračenja, čini tzv. **IC signaturu scene**. Izračena IC energija se prostire kroz atmosferu i sadrži informaciju o osobinama scene izraženom kroz tzv. "toplotni kontrast". Termovizijski uređaj omogućava vizuelizaciju "toplotnog kontrasta" zahvaljujući mogućnosti detektora da razlike u snazi (fluksu) primljenog zračenja pretvori u električni signal, koji se na odgovarajući način može prikazati tako da se srazmerno "toplotnom kontrastu" generiše kontrast vidljive slike (termovizijska slika). Sl.1 je prikazana opšta blok-šema funkcionisanja termovizijskih uređaja [2-5]. Specifičnosti i način formiranja termovizijske slike mnogo zavise od karakteristika zračenja elemenata scene koji učestvuju u formiranju slike.



Slika 1. Opšta blok-šema funkcionisanja termovizijskih uređaja

Termovizijska slika se stvara na osnovu razlika u radijansi scene koje su relativno male u odnosu na srednju radijansu scene (energetski kontrast za temperaturnu razliku od  $1K$  je  $\approx 0.02$ ).

Da bi se formirao video signal srazmeran razlikama u radijansi scene, mora se na odgovarajući način potisnuti deo zračenja scene (jednosmerna komponenta signala detektora)

da bi se istakle razlike u radijansi scene (naizmenična komponenta signala detektora). Suštinska razlika između termovizijskih uređaja različitih proizvođača i različitog koncepta je u primenjenoj tehnici potiskivanja jednosmerne komponente (tzv. temperaturno referenciranje).

Elektronski podsklopovi termovizijskih uređaja obavljaju dve osnovne funkcije [2]:

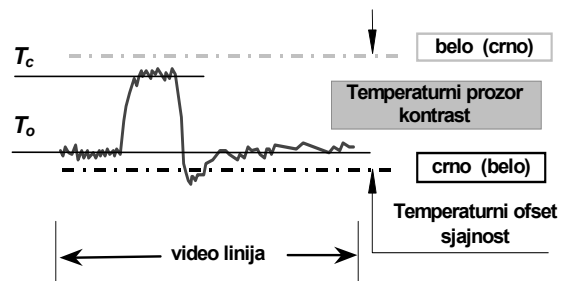
1. **Obradu signala** - kondicioniranje (pretpojačavači, pojačavači) i obradu signala detektorskih elemenata (transformacija signala po amplitudi i vremenskom formatu) u oblik pogodan za vizuelno prikazivanje na odabranom displeju i
2. **Obradu informacija** koje su sadržane u formatiranom signalu u cilju poboljšanja kvaliteta slike ili automatske selekcije informacija od značaja za odabrani način prikazivanja ili upotrebe (automatsko prepoznavanje i praćenje).

U elektronskoj obradi električnog signala sa detektora i formiranju video signala (sl.2) termovizijskog uređaja bitna su dva osnovna procesa kontrole signala koji definišu izgled termovizijske slike:

1. definiše se **temperaturni nivo - pojačanje** (sjajnost), odnosno nivo referentnog jednosmernog signala koji se oduzima od detektorskog signala radi lakšeg uočavanja malih razlika kontrasta u sceni (potiskivanje pozadine) i
2. definiše se **temperaturni prozor - kontrast**, odnosno opseg vrednosti naponskog signala po jednom nivou sivog, koji displej može prikazati.

Ove kontrolne parametre najčešće definiše operator pomoću spoljašnjih kontrolnih potencijometara ali se mogu po zadatom algoritmu i automatski podešavati.

Pri izdvajanju i obrazovanju video signala uspostavlja se temperaturni nivo - ofset, tako da je naponski nivo srazmeran radijansi scene  $L_{eC0}$  koja odgovara nivou crnog (belog) u slici, i temperaturni prozor koji definiše naponski nivo signala koji odgovara nivou belog (crnog) u slici i srazmeran je ekvivalentnoj radijansi scene  $L_{eB0}$ , ukoliko je režim prikazivanja slike *toplo - belo i hladno - crno*.



Slika 2. Izgled video signala detektora termovizijskog uređaja i kontrolni parametri za termovizijsku sliku

Kada se vidljiva slika prikazuje na ekranu sa  $N$  nivou sivog, tada je naponska razlika u video signalu, koja odgovara jednom nivou sivog, data sledećim izrazom:

$$v_s = M \cdot \frac{L_{eB0} - L_{eC0}}{N} \quad (1)$$

gde je  $M$  prenosna funkcija termovizijskog sistema koja uključuje i integralnu odzivnost detektora u zadatom (korišćenom) spektralnom opsegu rada termovizijskog uređaja. U odnosu na način uspostavljanja kontrolnih napona (temperaturni nivo - ofset i temperaturni prozor - proces referenciranja) termovizijski uređaji se mogu svrstati u dve

osnovne grupe:

- A) **Uređaji sa ručnom kontrolom pojačanja i kontrasta** su takve strukture da korišćenjem spoljašnjih kontrola (temperaturni nivo - pojačanje i temperaturni prozor - kontrast) operator podešava uređaj za optimalni prijem termovizijske slike i u toku upotrebe najčešće ne vrši dodatna podešavanja. Ovakav režim rada je karakterističan za laboratorijske (merne) uređaje i za neke tipove nišansko-osmatračkih uređaja starije generacije.
- B) **Uređaji sa automatskom regulacijom pojačanja i kontrasta** kod kojih se u toku rada vrši automatska regulacija pojačanja (ARP), tj. automatsko podešavanje temperaturnog nivoa - ofseta i temperaturnog prozora, u saglasnosti sa strukturom raspodele radjanse u sceni u okviru jedne linije ili scene u celini.

Automatska regulacija temperaturnog ofseta se realizuje korišćenjem više različitih tehnika, od kojih su najvažnije:

- Sprezanje detektora i pojačavača preko sklopa koji propušta samo naizmeničnu (promenljivu) komponentu signala (filtriranje sa zadatom vremenskom konstantom)
- Sprezanje detektora i pojačavača preko sklopa koji odseca definisani jednosmerni nivo i filtrira preostali (promenljivi) signal.
- Automatsko praćenje srednje temperature okoline i odsecanje jednosmernog nivoa srazmerno temperaturi okoline.
- Automatsko odsecanje jednosmerne komponente srazmerno signalu od izvora sa kontrolisanom temperaturom.
- Automatsko praćenje srednje radjanse scene i odsecanje jednosmerne komponente srazmerno srednjoj radjansi scene.
- Kombinovana kontrola referentnog napona temperaturnog ofseta.

Temperaturni prozor se automatski podešava u odnosu na maksimalnu vrednost preostalog promenljivog signala. Pri podešavanju temperaturnog prozora, mogu se uvesti različiti algoritmi za eliminaciju nepoželjnih snažnih tačkastih izvora zračenja. Izbor algoritma za podešavanje temperaturnog prozora zavisi od primene termovizijskog uređaja i strukture očekivane IC scene. Algoritmi automatskog podešavanja su obično tehnološka tajna proizvođača. Mogućnosti digitalizacije signala i kapacitet podsklopova za memorisanje i obradu digitalizovanog signala omogućavaju primenu mnogo fleksibilnijih algoritama za automatsku regulaciju referentnih nivoa.

Znači, elektronika objedinjuje odabrani oblik pretraživanja prostora (skaniranje) i način prikazivanja "toplotne slike" uz mogućnost ugrađivanja algoritama za optimizaciju slike i poboljšanje kvaliteta slike, kao i algoritama za zaštitu od ometanja.

### Struktura IC scene

IC slika objekata u sceni je posledica razlika u emisivnosti objekata u sceni i stepena zagrejanosti (temperature) objekata u sceni, tako da je prostorna raspodela radjanse  $L_e(x,y)$  u sceni za spektralni opseg osetljivosti termovizijskog uređaja [7-9]:

$$L_e(x,y) = \varepsilon(x,y) \cdot L_e^{ACT}(T(x,y)) \quad (2)$$

gde su:  $L_e^{ACT}(x,y)$  radjansa apsolutno crnog tela sa prostornom raspodelom temperature  $T(x,y)$ , a  $\varepsilon(x,y)$  je prostorna raspodela emisivnosti u sceni.

Razlika u radjansi scene, koja učestvuje u formiranju

video signala, je [7,8]:

$$\Delta L_e(x,y) = L_e(x,y) - L_e^R \approx \Delta \varepsilon(x,y) \cdot K_\varepsilon + \Delta T(x,y) \cdot K_T \quad (3)$$

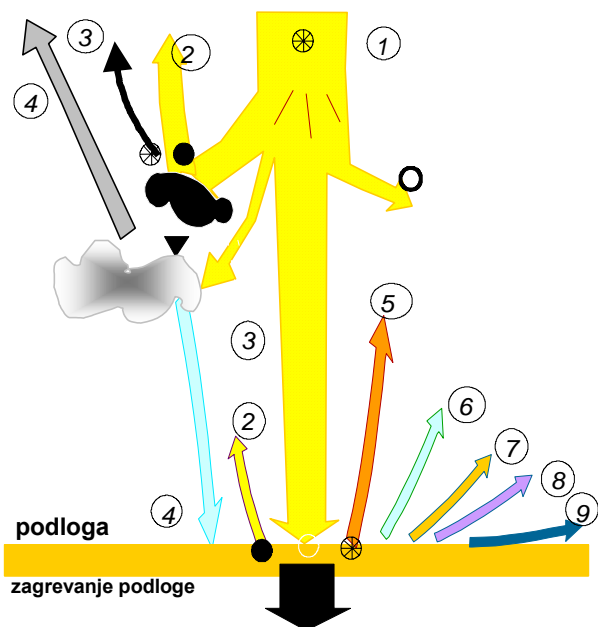
gde su:

- $\Delta L_e(x,y)$  - prostorna promena radjanse u odnosu na referentni nivo  $L_e^R$  (temperaturni nivo - pojačanje),
- $\Delta \varepsilon(x,y)$  - prostorna raspodela razlika u emisivnosti objekata u sceni,
- $\Delta T(x,y)$  - prostorna raspodela razlika temperature u sceni,
- $K_T$  - konstanta proporcionalnosti promene radjanse u funkciji promene temperature i
- $K_\varepsilon$  - konstanta proporcionalnosti promene radjanse u funkciji promene emisivnosti.

Kako je promena radjanse u sceni posledica promene emisivnosti i promene temperature u sceni, veoma je teško izvesti ukupno ujednačavanje radjanse u sceni primenom samo jednog procesa (ujednačavanje temperature ili ujednačavanje emisivnosti) tako da, bez obzira na proces koji je primenjen, neka informacija o strukturi scene uvek ostaje. Promene emisivnosti u sceni zavise, pre svega, od vrste materijala u sceni i vremenski su nepromenljive.

Promene temperature u sceni zavise od dnevnih (u toku dana i noći) i sezonskih uslova zagrevanja (hlađenja) objekata u sceni, kao i od uslova eksploatacije objekata (toplotno agilni izvori zračenja).

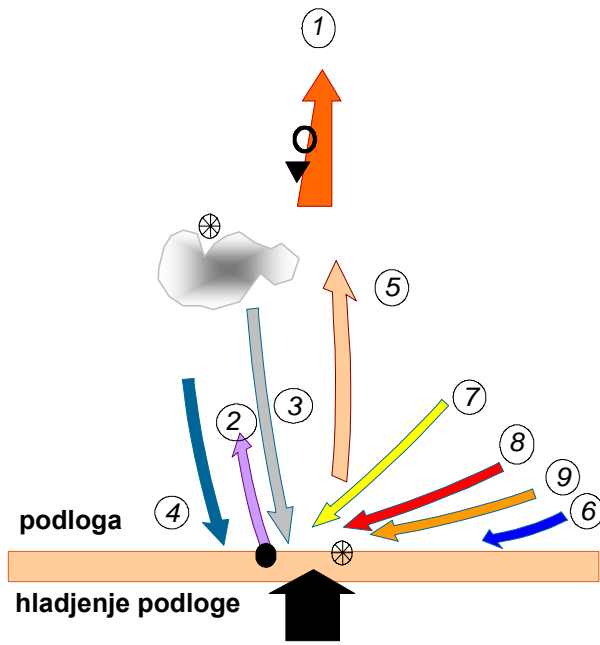
Procesi prenosa toplote i zračenja u toku dana, tj. pri dejstvu zračenja Sunca prikazani su na sl.3, a procesi prenosa toplote i zračenja u toku noći, tj. u odsustvu zračenja Sunca prikazani su na sl.4. Proces formiranja termovizijske slike danju i noću se razlikuju, ali se termovizijski uređaji mogu koristiti i danju i noću.



Slika 3. Osnovni procesi i elementi energetskog (toplotnog) bilansa u toku dana [6]

PROCESI ●- refleksija, ○- apsorpcija, ▼- rasejanje, ⊗- sopstveno zračenje

KOMPONENTE: 1- zračenje Sunca, 2- reflektovano zračenje, 3- sopstveno zračenje oblaka, 4- rasejano zračenje neba, 5- sopstveno zračenje podloge, 6- isparavanje, 7- konvekcija, 8- radijativna pseudo-kondukcija, 9- kondukcija



Slika 4. Osnovni procesi i elementi energetskog (toplotnog) bilansa u toku noći [6]

PROCESI ●- refleksija, ○- apsorpcija, ▼- rasejanje, ⊗- sopstveno zračenje

KOMPONENTE: 1- efektivno zračenje površine, 2- reflektovano zračenje neba, 3- sopstveno zračenje oblaka, 4- zračenje neba, 5- sopstveno zračenje podloge, 6- kondenzacija, 7- konvekcija, 8- radijativna pseudo-kondukcija, 9- kondukcija

Kako je odziv detektora u termovizijskim uređajima srazmeran ukupnoj snazi zračenja koja pada na detektor, a ona srazmerna radijansi elemenata scene čije zračenje detektor prima tokom procesa skaniranja, za analizu uticaja promene emisivnosti i promene temperature u sceni potrebno je poznavanje relativnog doprinosa promene temperature i emisivnosti ukupnoj promeni radijanse u posmatranom području. Promena radijanse u spektralnom opsegu osetljivosti termovizijskog uređaja se izražava kroz ekvivalentnu promenu temperature preko koje se definišu i mere osnovni parametri kvaliteta termovizijskih uređaja (MRT, MDTD, NETD), pa je poželjno da se i promena emisivnosti u sceni izrazi kroz efektivnu promenu temperature. Detaljna analiza je moguća uz odgovarajuće modeliranje i numeričko izračunavanje [7], što je veoma obiman posao. Kvalitativna procena uticaja emisivnosti se može dobiti kroz nešto manje tačan, ali mnogo jednostavniji i očigledniji način, zasnovan na primeni postupka razvoja u Tejlorov red i linearizacije Plankove formule za radijansu apsolutno crnog tela (ACT) [11,12].

Eksitansa apsolutno crnog tela izražena preko Plankovog zakona zračenja, koji izražava spektralnu raspodelu eksitanse zračenja ACT na temperaturi  $T_{ACT}$  [K], data je jednačinom:

$$M_{e\lambda}(\lambda, T_{ACT}) = C1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left( \exp \frac{C2}{\lambda T_{ACT}} - 1 \right)^{-1}, \left[ \frac{W}{cm^2 mm} \right] \quad (4)$$

gde je  $C1 = 2\pi hc^2 = (3.741832 \pm 0.000020)10^{-16} Wm^2 = (3.741832 \pm 0.000020)10^{12} Wcm^2 = (3.741832 \pm 0.000020)10^4 \frac{Wmm^4}{cm^2}$  i  $C2 = \frac{hc}{k} = (1.438786 \pm$

$0.000045)10^{-2} mK = (1.438786 \pm 0.000045) cmK = (1.438786 \pm 0.000045)10^4 \mu mK$ , radijacione konstante.

Korišćenjem Plankovog zakona, jednačina (4), može se izraziti i radijansa ACT tako što se jednačina za eksitansu podeli sa brojem  $\pi$ , pošto je ACT Lamberovski izvor zračenja.

Zbog toga se, u praksi, često sreće izraz za radijansu ACT, koji ima oblik osnovne Plankove formule, pri čemu radijaciona konstanta  $C1'$  ima vrednost:

$$C1' \equiv (C1/\pi) = 1.1909 \cdot 10^4 \frac{Wmm^4}{cm^2 srad}$$

Realna tela zrače kao siva tela čija je radijansa vezana sa radijansom ACT preko relacije:

$$L_{e\lambda} = \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{e\lambda}^{ACT}(\lambda, T) \quad (5)$$

Ukupna radijansa realnih objekata u spektralnom opsegu osetljivosti  $(\lambda_1, \lambda_2)$  oko centralne talasne dužine  $\lambda_0$ , data je jednačinom:

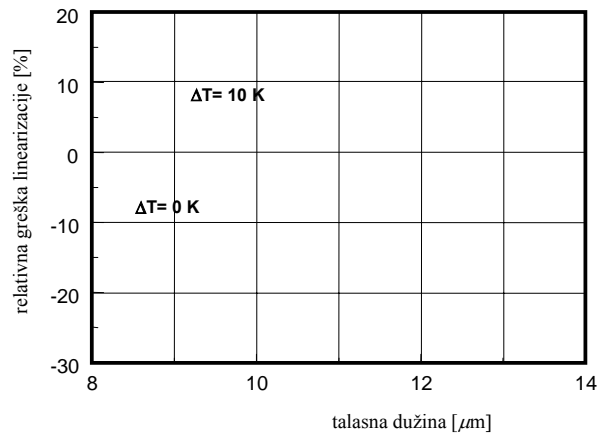
$$L_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{e\lambda}^{ACT}(\lambda, T) d\lambda \quad (6)$$

#### Linearizacija Plankovog zakona

Ako se Plankov zakon zračenja razvije u Tejlorov red u okolini ravnotežne temperature scene  $T_0$  i centralne talasne dužine opsega osetljivosti termovizijskog uređaja  $\lambda_0$  uz zadržavanje samo prva dva člana reda ( linearizacija Plankovog zakona zračenja) radijansa se može izraziti preko promene temperature u odnosu na ravnotežnu:

$$L_e(\lambda_0, T_0 + \Delta T) \approx L_e(\lambda_0, T_0) \cdot \left( 1 + \frac{C2}{\lambda_0 T_0^2} \Delta T \right) \quad (7)$$

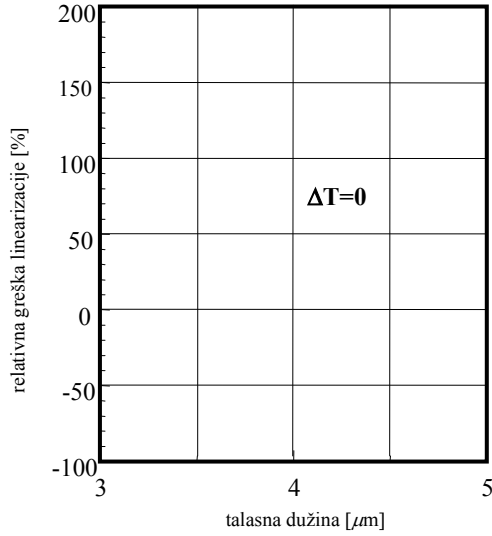
Greška linearizacije spektralne radijanse zračenja ACT, koja se definiše u odnosu na tačnu vrednost (Plankov zakon zračenja), prikazana je na sl.5 za spektralni opseg osetljivosti termovizijskih uređaja L:8-14  $\mu m$ , i očigledno je da ne prelazi 10 %.



Slika 5. Relativna greška linearizacije Plankovog zakona za spektralno područje L:8-14  $\mu m$

Greška linearizacije spektralne radijanse, koja se definiše u odnosu na tačnu vrednost (Plankov zakon zračenja), prikazana je na sl.6 za spektralni opseg osetljivosti termovizijskih uređaja M:3-5  $\mu m$  i očigledno je da je ova relativna greška neprihvatljivo velika.

Slika 6. Relativna greška linearizacije Plankovog zakona za spektralno

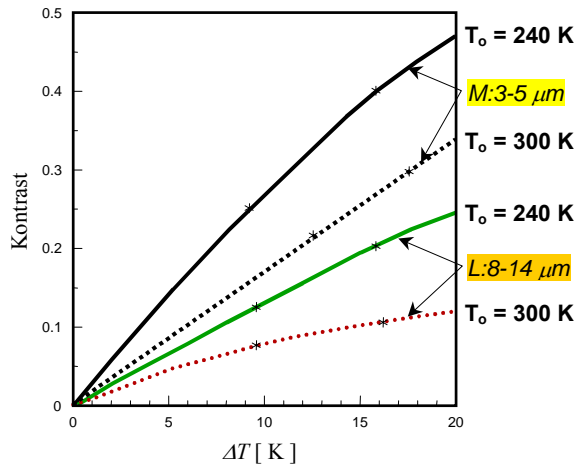


područje M: 3-5  $\mu\text{m}$

Kako su termovizijski uređaji osetljivi na zračenje iz celog opsega, saglasno jednačini (6), i kako su relativne greške linearizacije i pozitivne i negativne, to je ukupna greška pri primeni linearizacije na odziv termovizijskog uređaja mnogo manja nego greška linearizacije Plankovog zakona zračenja (manja od 20%), tako da se i u ovom slučaju može primeniti za procenu efekata dejstva radijacionih smetnji. Video signal termovizijskog uređaja srazmeran je radijacionom kontrastu u sceni koji se može definisati preko izraza:

$$\text{Kontrast} = \frac{L_e^C(T_0 + \Delta T) - L_e^P(T_0)}{L_e^C(T_0 + \Delta T) + L_e^P(T_0)} \quad (8)$$

Radijacioni kontrast izračunat u funkciji promene temperature cilja ( $T_c$ ) u odnosu na pozadinu ( $T_p$ ) za dve različite temperature pozadine u odnosu na integralne radijanse u spektralnom opsegu 3-5  $\mu\text{m}$  i 8-14  $\mu\text{m}$ , koje su računane po Plankovom zakonu zračenja, skoro je linearna funkcija promene temperature, što se vidi iz rezultata proračuna prikazanih na sl.7.

Slika 7. Kontrast ukupne (integralne) radijanse za spektralne opsege M: 3-5  $\mu\text{m}$  i L: 8-14  $\mu\text{m}$ 

Ako se radijacioni kontrast izračuna korišćenjem linearizovanog izraza za Plankov zakon zračenja (7), dobija se:

$$\text{Kontrast} = \frac{\frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} \cdot \Delta T}{2 + \frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} \cdot \Delta T} \quad (9)$$

Jednačina (9) je skoro linearna funkcija za male temperaturne razlike, jer je:

$$a_M = \frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} = 0.0483 \text{K}^{-1}$$

za spektralni opseg M:  $\lambda_0 = 4 \mu\text{m}$  i  $T_0 = 273 \text{K}$  i

$$a_L = \frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} = 0.0176 \text{K}^{-1}$$

za spektralni opseg L:  $\lambda_0 = 11 \mu\text{m}$  i  $T_0 = 273 \text{K}$ .

To praktično znači, da se za računanje integralne radijanse cilja i pozadine može koristiti linearna aproksimacija Plankovog zakona zračenja u obliku:

$$L_e(T_0 + \Delta T) \approx K(T_0) \cdot (1 + a \cdot \Delta T) \quad (10)$$

gde konstante  $K$  i  $a$  zavise od referentne temperature i spektralnog opsega rada termovizijskog uređaja, pri čemu je:

$$\begin{aligned} \mathbf{M:} \quad & K = K_M(T_0) = L_{e\lambda}(\lambda_{0M}, T_0) \cdot \Delta\lambda_M \quad \text{za } \Delta\lambda_M = 2 \mu\text{m} \text{ i} \\ & a = a_M(T_0) = \frac{C_2}{\lambda_{0M} T_0^2} \quad \lambda_{0M} = 4 \mu\text{m} \\ \mathbf{L:} \quad & K = K_L(T_0) = L_{e\lambda}(\lambda_{0L}, T_0) \cdot \Delta\lambda_L \quad \text{za } \Delta\lambda_L = 6 \mu\text{m} \text{ i} \\ & a = a_L(T_0) = \frac{C_2}{\lambda_{0L} T_0^2} \quad \lambda_{0L} = 11 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Ovako linearizovani oblik Plankove jednačine će se koristiti u procenama uticaja emisivnosti na izgled termovizijske slike i u svim analizama uticaja smetnji na rad termovizijskih uređaja.

#### Značaj emisivnosti za formiranje IC slike

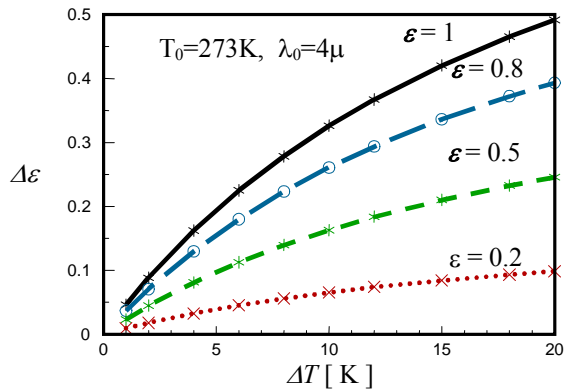
Polazeći od (3) i linearizovanog Plankovog zračenja (7), ukupna promena radijanse u sceni se može izraziti:

$$\begin{aligned} \Delta L_e = L_e(\lambda_0, T_0) \cdot \left( 1 + \frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} \cdot \Delta T \right) \cdot \\ \cdot \Delta\varepsilon + \varepsilon \cdot L_e(\lambda_0, T_0) \cdot \frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} \cdot \Delta T \end{aligned} \quad (11)$$

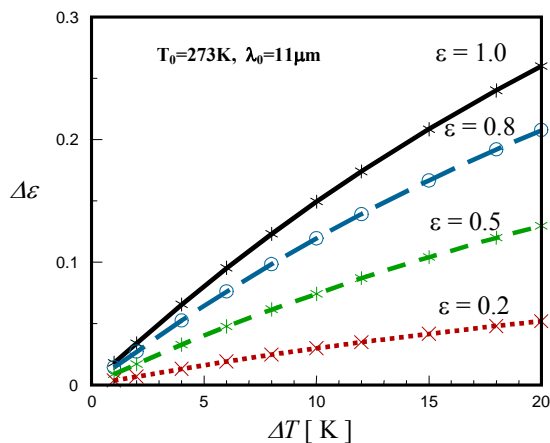
Prvi sabirak na desnoj strani jednakosti (11) reprezentuje doprinos promene emisivnosti, a drugi član reprezentuje doprinos promene temperature ukupnoj promeni radijanse u sceni. Izjednačavanjem ova dva člana dobija se relacija koja daje vezu između promene ekvivalentne temperature u sceni kao posledice promene emisivnosti:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon \cdot \frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} \cdot \Delta T}{1 + \frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} \cdot \Delta T} \quad (12)$$

Korišćenjem (12) može se nacrtati familija krivih prikazanih na sl.8 za srednjetalasni spektralni opseg rada termovizijskih uređaja (M: 3-5  $\mu\text{m}$ ), i na sl.9 za dugotalasni spektralni opseg rada termovizijskih uređaja (L: 8-14  $\mu\text{m}$ ), a koje povezuju energetske ekvivalentne promene temperature i emisivnosti za različite nivoe srednje emisivnosti u sceni.



Slika 8. Veza energetske ekvivalentne promene emisivnosti i temperature za srednjetalasni spektralni opseg rada termovizijskih uređaja (M: 3-5 μm,  $T_0=293\text{K}$ ,  $\lambda_0=4\ \mu\text{m}$ )



Slika 9. Veza energetske ekvivalentne promene emisivnosti i temperature za dugotalasni spektralni opseg rada termovizijskih uređaja (M: 8-14 μm,  $T_0=293\text{K}$ ,  $\lambda_0=11\ \mu\text{m}$ )

Praktična primena (12), za scenu sa srednjom emisivnošću 0.8 i srednjom temperaturom 273K, pokazuje da je promena emisivnosti od 0,01 (jedan procenat) energetske ekvivalentna promeni temperature od 0,95K za dugotalasni spektralni opseg rada, odnosno promeni temperature 0,51K za srednjetalasni spektralni opseg rada termovizijskih uređaja.

#### Značaj emisivnosti za interpretaciju IC slike

Kako su procesi prenosa toplote kondukcijom i konvekcijom relativno spori procesi, može se smatrati da je površina Zemlje u termalnoj ravnoteži, osim u okolini toplotno aktivnih objekata ili u okolini prostora koji jako apsorbuje zračenje Sunca. Za procenu mogućnosti pojave lokalnih neravnomernosti temperature na površini Zemlje u toku dana, značajno je poznavati emisivnost (apsorpciju) materijala objekata koji formiraju IC scenu u vidljivom i bliskom IC delu spektra.

Prostorna raspodela emisivnosti u sceni ima važnu ulogu i uticaj na formiranje fine strukture slike [11]. U slučaju da postoje veoma velike razlike u emisivnosti materijala u sceni, očekuje se veliki kontrast u termovizijskoj slici.

Reflektivnost objekata u IC sceni, koja zavisi od emisivnosti, mora se razmatrati uvek kada je u sceni prisutno snažno zračenje spoljašnjih izvora ili Sunca.

Zračenje okoline dolazi od svih objekata u okolini IC scene. Objekti se međusobno razlikuju po obliku, rastojanju, dimenzijama, orijentaciji i temperaturi.

nju, dimenzijama, orijentaciji i temperaturi. Nemoguće je izolovati samo posmatrani objekat i detektovati samo njegovo zračenje. Zbog toga je neophodna dopunska interpretacija slike da bi se izdvojile informacije karakteristične za posmatrani objekat.

U procesu interpretacije termovizijske slike moraju se razmotriti svi efekti koji utiču na formiranje termovizijske slike: transmisija atmosfere, emitivnost površina objekata u IC sceni, reflektovano zračenje Sunca, oblaka i neba i dr.

Poznavanja emisivnosti objekata u IC sceni koristi se u različitim segmentima formiranja i interpretacije termovizijske slike:

#### Izbor tehnika za automatsko poboljšanje kvaliteta slike

Poznavanje strukture scene omogućava lakši izbor tehnika za automatsko poboljšanje kvaliteta slike i uslova za detekciju prisustva kritičnih pojava i objekata u posmatranoj sceni. Prvi i osnovni korak je izbor tehnika referenciranja u obradi video signala u skladu sa namenom uređaja. Drugi korak je izbor tehnika prostornog, frekventnog i vremenskog filtriranja video signala radi isticanja poželjnih detalja i prigušenja uticaja nepoželjnih efekata pri formiranju slike. Treći korak je isticanje onih karakteristika poželjnog objekta koje omogućavaju lakšu detekciju i prepoznavanje objekta. Pri tehničkoj realizaciji koriste se tehnike digitalne obrade slike, ali izbor tehnika koje će se primeniti mora biti usklađen sa osnovnom namenom uređaja i karakteristikama očekivane IC scene.

Formiranje i korišćenje baza znanja (slika) Pri formiranju baza slika koje će se u procesu obrade informacija iz termovizijske slike koristiti, bilo kao referentne slike radi lakšeg uočavanja promena u sceni usled dejstva aktivnosti koja se prati korišćenjem termovizijske slike, bilo kao etaloni za prepoznavanje detalja scene, mora se voditi računa i o uticaju koeficijenta emisivnosti karakterističnih materijala koji su prisutni u sceni.

Dinamičko ažuriranje baza znanja Informacija o vrsti materijala prisutnih u IC sceni može znatno olakšati analizu procesa koji se prate uz korišćenje termovizijske slike. Fuzijom vidljive (TV slike) i termovizijske slike omogućava se lakše razdvajanje uticaja razlika u temperaturi i razlika u emisivnosti u ukupnoj termovizijskoj slici. Međutim, zbog najčešće velike razlike u emisivnosti u vidljivom i IC području, za veliki broj materijala je nemoguće direktno korišćenje informacija o reflektivnosti materijala u vidljivom području (kontrast vidljive slike) za određivanje emisivnosti u IC delu spektra (kontrast termovizijske slike). Vidljiva slika scene može da posluži za prepoznavanje vrste materijala i ta se informacija, preko pomoćne tabele emisivnosti materijala, može uključiti u obradu termovizijske slike

#### Radijacione smetnje

Pojmom radijaciona smetnja obuhvaćen je svaki prirodni ili veštački generisan sistem koji se unosi u vidno polje termovizijskog uređaja i doprinosi promeni izgleda prostorne raspodele radijanse scene (signature), tj. dovodi do degeneracije izvorne signature posmatrane scene (zamućenje) ili gubitka termovizijske slike.

Po načinu nastanka veštačke radijacione termovizijske smetnje mogu biti vrlo različite i mogu se grupisati u nekoliko tipova [12]:

- dimovi (aerosoli) koji se razvijaju između posmatrane IC scene i termovizijskog senzora;
- prevlake koje se nanose na površinu objekata scene i doprinose izmeni njihove emisivnosti i temperature;

- **prekrivke** koje se postavljaju preko objekata scene ili između objekata scene i termovizijskog senzora i doprinose prikriivanju čitavog objekta ili njegovih karakterističnih delova;
- **klateri** (veštački izvori zračenja) koji bitno doprinose izmeni strukture scene (pothlađivanje ili pregrevanje) i utiču na izmenu uslova formiranja termovizijske slike;
- **makete** veštački objekti koji sadrže u sebi agregate koji omogućavaju imitiranje signature realnih objekata i time unose lažne informacije u termovizijsku sliku.

Prema osnovnim efektima koji se koriste za izmenu (degradaciju) signature scene a time i termovizijske slike, radijacione smetnje se dele na dve grupe:

- **oslabljivači zračenja** elemenata scene ili scene u celini
- **nepoželjni (veštački) izvori zračenja** koji se mogu pojaviti u sceni.

Osnovni fizički procesi koji se mogu koristiti pri formiranju radijacionih smetnji su:

- **emisija** (sopstveno zračenje),
- **apsorpcija** (slabljenje zračenja usled apsorpcije),
- **rasejanje** (slabljenje zračenja usled rasejanja),
- **refleksija** (refleksija zračenja spoljašnjih izvora) i
- **kondukcija** (toplotna izolacija).

Mogući uticaji osnovnih fizičkih procesa na izmenu signature scene (degradaciju termovizijske slike) za određene tipove radijacionih smetnji su prikazani u tabeli 1.

**Tabela 1.** Uticaj primena osnovnih fizičkih procesa za izmenu termovizijske slike kod različitih tipova radijacionih smetnji

Tipovi radijacionih smetnji		Osnovni fizički procesi				
		emisija	apsorpcija	rasejanje	refleksija	izolacija
DIMOVI AEROSOLI)	Slabljenje		DA!	DA!		
	Izvor	DA!			DA!	
PREVLAKE	Slabljenje		DA!		DA!	
	Izvor	DA!				
PREKRIVKE	Slabljenje		DA!			DA!
	Izvor	DA!			DA!	
KLATER	Slabljenje					
	Izvor	DA!			DA!	
MAKETE	Slabljenje					
	Izvor	DA!			DA!	

DA! - primarni efekat      DA! - sekundarni efekat

Efikasnost degradacionih uticaja različitih procesa primenjenih u toku generisanja smetnji, zavisi od načina i vremena primene kao i od svojstava termovizijskog uređaja koji se ometa. Pregled nekih od degradacionih uticaja i osnovnih procesa koji do njih dovode je prikazan u tabeli 2.

**Tabela 2.** Osnovni degradacioni uticaji i procesi koji do njih dovode

Degradacioni uticaji	Procesi; dejstva i postupci
Smanjenje transmisije	prašina, dim, dimna zavesa, prekrivanje
Smanjenje kontrasta scene	ujednačavanje emisivnosti, ujednačavanje temperature
Degradacija ukupne radijance scene	rasejanje na aerosolima: - prirodni (magla, kiša), - veštački (dimovi)
Lažni ciljevi (izmena signature)	- refleksije prirodnih izvora - veštački izvori (makete, klateri)
Prekid transmisije	prašina, dim, magla, oblaci prekrivke, prevlake

Mogućnosti primene veštačkih radijacionih smetnji za ometanje termovizijskih uređaja su relativno ograničene. Mogu se naglasiti specifičnosti taktičke primene i karakteristika različitih radijacionih smetnji prema sledećem:

#### Dimovi (aerosoli)

Dim se obično formira tokom burnog i egzotermnog procesa sagorevanja specifičnih goriva (pirotehničke smeše, nafta, mineralna ulja i druge materije) i procesa mešanja produkata sagorevanja sa atmosferom. Egzotermni proces omogućava zadimljavanje željenog prostora, tj. širenje produkata sagorevanja u atmosferu. Tokom mešanja produkata sagorevanja sa atmosferom, odvijaju se fizičko-hemijski procesi koji omogućavaju formiranje relativno stabilnog aerosola. Trajanje i stabilnost stvorenog aerosola zavisi od stanja u atmosferi (vlažnost) i postojanja vetra.

Dim sačinjavaju gasoviti produkti sagorevanja i čestice (tečne i čvrste) koje su formirane tokom sagorevanja i mešanja produkata sagorevanja sa atmosferom. Shodno tome, osnovni parametri razvijenog dima su koncentracija čestica (masena, broj čestica) i dimenzije čestica (raspodela po dimenzijama, dominantni prečnik). Oba parametra utiču i na stabilnost i koeficijent slabljenja dima. Na dimenzije čestica u dimu najviše utiču karakteristike procesa kondenzacije, koagulacije i disperzije, koji se odvijaju tokom mešanja dima s atmosferom.

Stabilnost dima najviše zavisi od načina kretanja čestica unutar dima. Ako su čestice sitnije ( $D \leq 0.3 \mu\text{m}$ ), dominira Braunovsko kretanje koje omogućava veću stabilnost dima. Ako su čestice krupnije ( $D \leq 0.1 \mu\text{m}$ ), dominira kretanje pod uticajem Zemljine teže koje utiče na smanjenje koncentracije kroz proces ukupnjavanja i taloženja čestica. Visoka koncentracija čestica ( $c_m > 0.1 \text{ g/m}^3$  ili  $c_m > 10^6$  čestica/m<sup>3</sup>) pospešuje proces koagulacije, tako da su dimovi sa visokom koncentracijom čestica nestabilni. Stabilnost dimova sa krupnim česticama je veliki problem pri razvoju maskirnih dimova u oblasti primene termovizijskih uređaja i sistema.

Koeficijent slabljenja dima usled rasejanja zračenja najviše zavisi od vrste (materijal - indeks prelamanja, dominantni prečnik) i koncentracije čestica. Slabljenje zračenja usled rasejanja je direktno srazmerno koncentraciji čestica i najveće je ako je dominantni prečnik čestica istog reda veličine kao i talasna dužina zračenja (Mieova teorija rasejanja). Da bi se postiglo veliko slabljenje dima u spektralnom području osetljivosti termovizijskih uređaja, mora se realizovati dim sa relativno krupnim česticama.

Pored slabljenja, saglasno tabeli 1, dim svojom povećanom temperaturom deluje kao radijaciona smetnja.

Kao pokazatelje maskirne sposobnosti dima prati se više parametara [10]:

- **Koeficijent slabljenja (transmisije)** dima koji se dobije iz odnosa signala odabranog detektora za poznati izvor zračenja pri definisanim geometrijskim odnosima u uslovima kada dim ne postoji i kada je dim razvijen. Ovo je dosta objektivna pokazatelj, ali se u praksi teško koristi zbog nepredvidljivosti prostorne raspodele dima u realnim uslovima.

- **Moć zamućenja** koji je dobra mera za maskirnu efikasnost dima u uslovima primene uređaja sa formiranjem slike.

Dim se razvija između posmatranog objekta i uređaja za formiranje slike i povećava mu se koncentracija sve dok se slika objekta ne izgubi. Potrebna količina dima je mera moći zamućenja dima za zadati uređaj za formiranje slike.

Drugi, složeniji, način definisanja sposobnosti zamućenja je praćenjem promene kontrasta test slike u funkciji koncentracije dima. Ovom vrstom merenja se istovremeno može odrediti i integralna transmisija dima i moć zamućenja.

- **Vreme razvoja dima** je vreme potrebno da se dim formira.
- **Vreme trajanja dima** je vreme u kome dim zadržava potrebnu maskirnu efikasnost.
- **Efikasnost razvoja dima** je mera sposobnosti dimne materija da stvori odgovarajuću zapreminu dima sa definisanim vrednošću maskirne sposobnosti. Izražava se u jedinici zapremine dima ( $m^3$ ) po jedinici mase dimne materije (g).

Delovanje dima se inicira razvijanjem *dimne zavese* u prostoru između scene i termovizijskog uređaja. Osnovna teškoća pri upotrebi dimne zavese je određivanje pravca i vremena upotrebe termovizijskih sistema, što je zbog pasivnog rada termovizijskih sistema jako otežano.

### Prevlake

Prevlake se koriste za privremenu ili trajnu ("maskirno bojenje") izmenu osobina (refleksija, emisivnost) površine objekta koja omogućava "stapanje" objekta sa okolinom, a time i otežavanje prepoznavanja objekta. Znači, prevlake se mogu koristiti za lokalizovane izmene ukupne signature objekata.

Prevlake imaju veću mogućnost primene u vidljivom i bliskom IC delu spektra. U dalekom IC delu spektra (termovizija) prevlake imaju mnogo manju mogućnost primene zbog veoma velikih razlika u emisivnosti materijala u okolini i velikog uticaja razlika u emisivnosti na formiranje i izgled termovizijske slike. Da bi se prevlaka mogla koristiti za IC maskiranje, pored emisivnosti materijala prevlake, transmisija materijala prevlake u odgovarajućem spektralnom području mora biti mala.

Korišćenje prevlaka u termovizijskom spektralnom opsegu je najefikasnije ako je privremeno i ako je moguće korišćenje prevlaka i na drugim delovima posmatrane IC scene. Trajne prevlake za IC maskiranje u termovizijskom području su, praktično, upotrebljive samo ukoliko imaju i zadovoljavajuća termoizolaciona svojstva, tako da omogućavaju privremeno prigušenje zračenja toplotno aktivnih objekata.

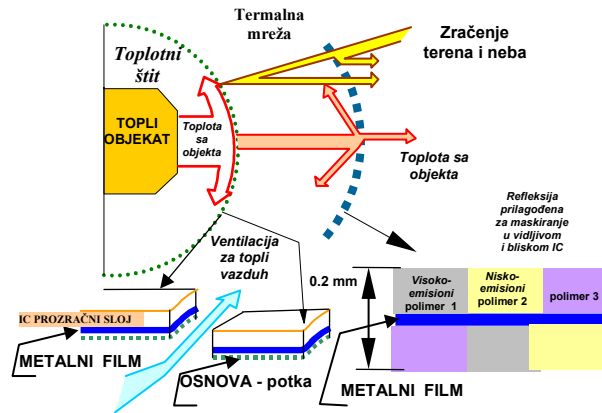
### Prekrivke

Prekrivke u vidljivom i bliskom IC delu spektra služe za ujednačavanje refleksije sa objektima okoline i skrivanje objekata od osmatranja. Koriste se različite maskirne mreže i druga formacijska i neformacijska sredstva.

U termovizijskom spektralnom opsegu prekrivke se mogu koristiti za prikriivanje ciljeva ujednačavanjem emisivnosti sa okolinom, pri čemu transmisija prekrivke za IC zračenje mora biti mala. Veoma je teško napraviti sistem univerzalnih formacijskih prekrivki zbog velikog uticaja razlika u emisivnosti na formiranje i izgled termovizijske slike. Najbolji efekti u korišćenju prekrivki za IC maskiranje se mogu postići ako se pored skrivanja cilja, prekrivke koriste i za generisanje lažnih ciljeva.

Ako su prekrivke napravljene kao dobre *termoizolacione* strukture i kao kvalitetne *radijacione prepreke*, mogu se koristiti za kratkotrajno lokalno prikriivanje zagrejanih delova objekata. Da bi se to ostvarilo, proces kondukcije toplote sa zagrejanih delova cilja mora biti znatno redukovan.

Tipična struktura termovizijske zaštitne prekrivke je prikazana na sl.10. Ova prekrivka se sastoji od dva sloja: **unutrašnjeg** koji treba da obezbedi refleksiju toplotnog zračenja toplotog objekta ka objektu i **spoljašnjeg** koji obezbeduje dobro maskiranje u vidljivom i bliskom IC delu spektra i sloj polimernog materijala sa niskom i visokom emisivnošću koje su raspoređene slično kao svetle i tamne mrlje na vizuelnim maskirnim šarama i čija je funkcija da razbiju IC signaturu objekta.



Slika 10. Tipična primena i struktura termovizijskih maskirnih prekrivki

### Klateri

Klateri su lokalizovani izvori IC zračenja (topli ili hladni) sa velikom razlikom radijanse u odnosu na okolinu, a mogu da se koriste za deformaciju IC scene ili degradaciju termovizijske slike.

Efekat deformacije IC scene se manifestuje kroz unošenje slika mogućih lažnih ciljeva u posmatranu scenu. Ovaj efekat je jače izražen kod IC sistema sa slabijim mogućnostima prepoznavanja ciljeva.

Degradacija termovizijske slike u termovizijskim uređajima sa automatskom regulacijom sjajnosti i kontrasta se postiže preko uticaja radijanse klatera na automatsko određivanje temperaturnog nivoa i temperaturnog prozora u termovizijskom uređaju.

### Makete

Maketa je kopija stvarnog cilja koja se koristi za imitaciju realnih ciljeva, što se postiže oblikom makete i ugrađenim agregatima za imitiranje signature cilja u svim spektralnim opsezima od interesa. Makete služe za unošenje lažnih informacija u IC scenu. Izrađuju se od različitih materijala (drvo, guma, plastika i dr.). Efikasnost primene maketa za unošenje lažnih informacija o sadržaju scene bitno zavisi od udaljenosti termovizijskog uređaja od scene i prostorne rezolucije termovizijskog uređaja.

### Analiza uticaja radijacionih smetnji

Pri analizi kritičnih zahteva za karakteristike radijacionih smetnji polazi se od tri grupe početnih pretpostavki i uprošćenja vezanih za strukturu IC scene, karakteristike radijacionih smetnji i karakteristika termovizijskog uređaja.

### Uprošćena IC scena

Struktura uprošćene IC scene je prikazana na sl.11. Sastoji se od uniformne pozadine i objekta posmatranja (cilja). Izobzirom da se razlike u emisivnosti materijala u sceni mogu izraziti preko efektivne razlike temperatura, smatra se



da su emisivnosti pozadine  $\varepsilon_p$  i cilja  $\varepsilon_c$  jednake i da iznose 1 ( $\varepsilon_p = \varepsilon_c = 1$ ). Efektivne temperature pozadine  $T_p$  i cilja  $T_c$  su srazmerne ukupnoj radijansi i imaju homogenu raspodelu unutar oblasti pozadine i cilja. Dimenzije pozadine ( $W, H$ ) odgovaraju ukupnom vidnom polju termovizijskog uređaja.

Osnova za formiranje termovizijskog video signala (slike) je razlika efektivnih temperatura pozadine i cilja ( $\Delta T = T_c - T_p$ ). Temperatura pozadine je osnovna referentna temperatura za izražavanje radijativnog kontrasta. Za izražavanje radijance elemenata scene i smetnje koristi se linearna aproksimacija Plankovog zakona zračenja.

### Termovizijski uređaj

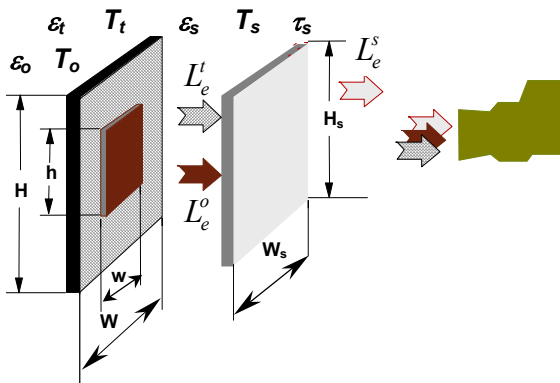
Razmatra se termovizijski uređaj kod koga je temperaturni nivo (ofset) podešen tako da odgovara granici crnog na ekranu, a temperaturni prozor obuhvata sve nivoe sivog i završava se na granici belog u termovizijskoj slici (režim toplo-belo). Vidljiva slika na ekranu je podeljena na  $N_s$  nivoe sivog tako da je naponska razlika  $v_s$  u video signalu, koja odgovara jednom nivou sivog u skladu sa jednačinom (1) gde su  $L_{eB0}$  i  $L_{eC0}$  ekvivalentne vrednosti radijance u sceni koje odgovaraju granicama belog i crnog u slici respektivno, a definišu se na različit način kod različitih termovizijskih uređaja.

Režim rada termovizijskog uređaja, tj. način definisanja temperaturnog nivoa i temperaturnog prozora bitno utiče i na mogućnost ometanja termovizijskih uređaja. Zbog toga se posebno analiziraju uslovi ometanja dve osnovne klase termovizijskih uređaja:

- termovizijskih uređaja sa ručnom kontrolom pojačanja i kontrasta i
- termovizijskih uređaja sa automatskom kontrolom pojačanja i kontrasta.

### Radijaciona smetnja

Radijaciona smetnja se opisuje preko vrednosti efektivne temperature smetnje i koeficijenta transmisije zračenja ( $T_s, \tau_s$ ), pri čemu su razlike u emisivnosti smetnje uključene u efektivnu temperaturu, tako da se smatra da je emisivnost radijacione smetnje jednaka jedinici.

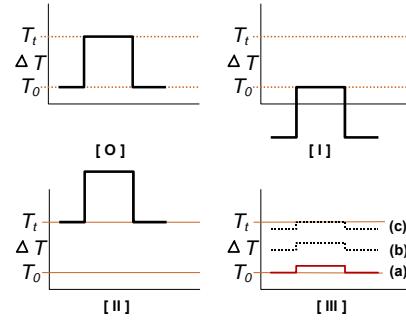


Slika 11. Uprošćena IC scena u prisustvu radijacione smetnje

Uticao radijacionih smetnji na termovizijske uređaje sa ručnim podešavanjem slike

Polazeći od uprosćene scene i IC smetnje, koje su prikazane na sl.11, može se analizirati nekoliko različitih slučajeva ometanja termovizijskog uređaja sa ručnom kontrolom pojačanja i kontrasta [13] pri čemu su pojačanje i kontrast podešeni za maksimalni kontrast tako da je

podešeni za maksimalni kontrast tako da je polazni video signal kao na sl.12 (0).



Slika 12. Video signal termovizijskog uređaja sa ručnom kontrolom režima rada u prisustvu cilja i radijacione smetnje u IC sceni (0) početni video signal (pozadina + cilj); (I) potiskivanje u crno (slabopropusna radijaciona smetnja u sceni); (II) zasićenje ("topla" radijaciona smetnja), (III) potiskivanje ispod nivoa sivog (slabopropusna radijaciona smetnja iznad cilja)

I POTISKIVANJE U POZADINU (CRNO) - Slabotransparentna radijaciona smetnja sa temperaturom okoline ili nižom, koja prekriva celu IC scenu ( $H_s \approx H, W_s \approx W, T_s \leq T_o, \varepsilon_s \approx \varepsilon_p \approx \varepsilon_c \approx 1, \tau_s < 1$ )

Zbog slabljenja zračenja pri prostiranju kroz radijacionu smetnju, radijansa cilja i okoline se smanjuje i zbog toga se video signal pomera ispod nivoa crnog u slici.

Termovizijska slika cilja se gubi kada se radijansa oslabljenog zračenja cilja izjednači sa radijansom okoline kojom je definisan nivo crnog u početnoj slici, tako da je video signal potpuno potisnut u oblast crnog (sl.12 (I)).

Polazeći od toga da je  $L_o \propto T_o$  i  $L_c \propto T_c$  kao i da je karakteristična temperaturna razlika cilja  $\Delta T_c = T_c - T_o$  i koristeći linearizovan izraz za Plankov zakon zračenja (10), dobija se da je radijansa cilja pre unošenja radijacione smetnje:

$$L(T_c) = L(T_o) \cdot (1 + a \Delta T_c) \quad (13)$$

Posle unošenja radijacione smetnje, radijansa cilja je:

$$L^s(T_c) = \tau \cdot L(T_o) \cdot (1 + a \Delta T_c) \quad (14)$$

Uslov za potiskivanja video signala u oblast crnog u termovizijskoj slici je:

$$L^s(T_c) \leq L(T_o) \quad (15)$$

Uz korišćenje jednačina (13 i 14) dobija se uslov za kritičnu vrednost transmisivnosti radijacione smetnje:

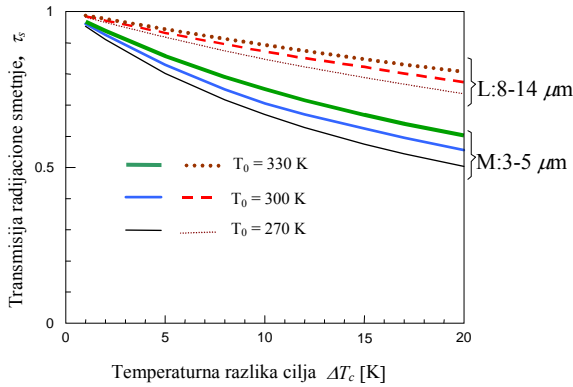
$$\tau \leq \frac{1}{1 + a \Delta T_c} = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{\lambda_0 T_0^2} \cdot \Delta T_c} \quad (16)$$

Familija krivih, koja daje kritične vrednosti transmisije radijacione prepreke u funkciji temperaturne razlike cilja za različite vrednosti temperature okoline i za karakteristične spektralne opsege rada termovizijskih uređaja (M i L), prikazana je na sl.13.

Na sl.13 praktično je prikazano da je relativno lakše ometati termovizijske uređaje koji rade u L opsegu (8.0-14.0  $\mu\text{m}$ ) primenom radijacione smetnje sa slabljenjem radi potiskivanja zračenja cilja i stapanja sa pozadinom.

Ovaj metod primene radijacione smetnje se najlakše realizuje razvijanjem dimne zavese (aerosola) između IC scene i termovizijskog uređaja. Iako je u L opsegu potrebno realizovati manji pad transmisije nego u M opsegu, za

zovati manji pad transmisije nego u M opsegu, za uspešnu primenu radijacione smetnje mnogo teže je realizovati stabilan aerosol, koji efikasno slabi zračenje u L opsegu, tako da se u praksi mogućnost primene ove tehnike ometanja za oba opsega svodi na isto.



**Slika 13.** Granična vrednost transmisije radijacione smetnje zavisno od temperature razlike cilja za različite temperature pozadine i različite spektralne opsege rada termovizijskih uređaja

Treba istaći da su rezultati ove analize samo orijentacioni i kvalitativni, jer je primenjen krajnje uploćen model. Ključiti da se ometanje termovizijskih uređaja sa ručnom kontrolom pojačanja i kontrasta, primenom radijacione smetnje sa slabljenjem i relativno niskom temperaturom, može realizovati uz relativno veliku transmisiju radijacione smetnje (> 50 %).

**II POTISKIVANJE U ZASIĆENJE (BELO)** "Topla" radijaciona smetnja sa slabljenjem, koja prekriva celu IC scenu ( $H_s \approx H$ ,  $W_s \approx W$ ,  $T_s \geq T_o$ ,  $\varepsilon_s \approx \varepsilon_p \approx \varepsilon_c \approx 1$ ,  $\tau_s < 1$ ) Unošenjem "tople" radijacione smetnje između IC scene i termovizijskog uređaja podiže se radijansa okoline tako da se video signal potiskuje u zasićenje (oblast belog u slici).

Ako se temperatura radijacione smetnje izrazi preko ekvivalentne temperature razlike u odnosu na temperaturu okoline ( $\Delta T_s$ ), radijansa radijacione smetnje je:

$$L^s(T_s) = L(T_o) \cdot (1 + a\Delta T_s) \quad (17)$$

Kritična temperaturna razlika za radijacionu smetnju se može dobiti iz uslova da je zbirna radijansa oslabljenog zračenja okoline i zračenja smetnje veća ili jednaka ekvivalentnoj radijansi nivoa belog u slici (radijansa cilja), odnosno:

$$L(T_o) \cdot (1 + a\Delta T_s) + \tau_s \cdot L(T_o) \geq L(T_o) \cdot (1 + a\Delta T_c) \quad (18)$$

Sređivanjem (18), dobija se uslov za kritičnu temperaturnu razliku radijacione smetnje:

$$\Delta T_s \geq \Delta T_c - \frac{\lambda_0 T_o^2}{C^2} \cdot \tau_s \quad (19)$$

Familije krivih za granične vrednosti temperature razlike "tople" radijacione smetnje zavisno od transmisije radijacione smetnje za različite temperature razlike cilja pri različitim vrednostima temperature pozadine u dva različita spektralna opsega (M i L) rada termovizijskih uređaja, date su na sl.14.

Negativne vrednosti temperature razlike smetnje pokazuju da se i sa relativno malom energijom razvijenom pri formiranju radijacione smetnje, termovizijski uređaj može dovesti u zasićenje pri relativno visokim vrednostima transmisije smetnje, ako je emisivnost smetnje visoka.

smisije smetnje, ako je emisivnost smetnje visoka. Međutim, pri relativno velikoj transmisiji smetnje, emisivnost smetnje nije jednaka jedinici. Iz jednačine ukupnog bilansa energije:

$$\tau_s + \varepsilon_s + \rho_s = 1 \quad (20)$$

a za slučaj da su refleksijski gubici uključeni u transmisiju, sledi:

$$\varepsilon_s \approx 1 - \tau_s \quad (21)$$

Sada jednačina (18) ima drugačiji oblik:

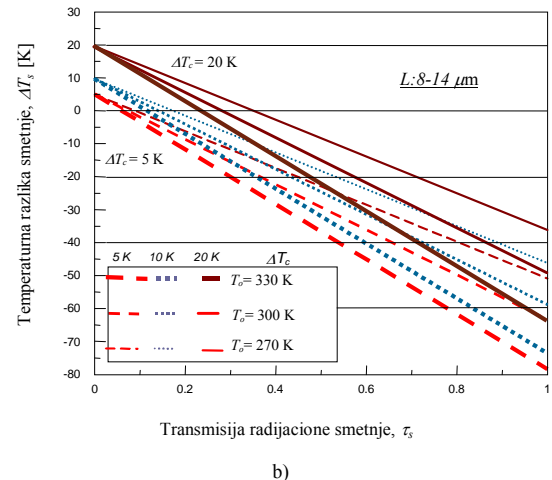
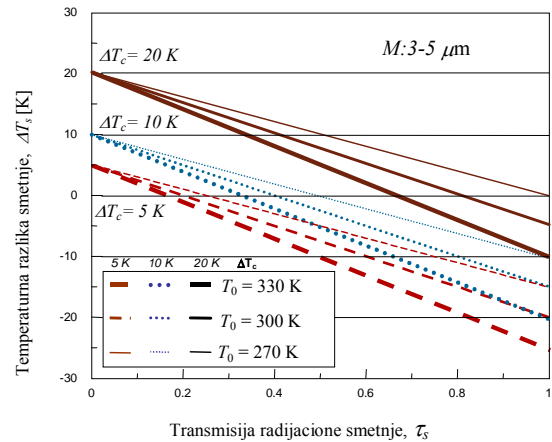
$$\varepsilon_s \cdot L(T_o) \cdot (1 + a\Delta T_s) + \tau_s \cdot L(T_o) \geq L(T_o) \cdot (1 + a\Delta T_c) \quad (22)$$

Sređivanjem (22) dobije se drugačiji izraz za kritičnu temperaturnu razliku smetnje:

$$\Delta T_s \geq \frac{\Delta T_c}{\varepsilon_s} \approx \frac{\Delta T_c}{1 - \tau_s} \quad (23)$$

Izraz (23) pokazuje da je za zasićenje termovizijskog uređaja u slučaju realne radijacione smetnje potrebno da temperaturna razlika smetnje bude jednaka ili veća od temperaturne razlike cilja.

Ometanje termovizijskog uređaja, uz korišćenje "toplih" niskoemisionih (visokotransmissionih) smetnji sa dovođenjem termovizijskog uređaja u zasićenje, moguće je samo korišćenjem radijacione smetnje sa veoma visokom temperaturnom razlikom.



**Slika 14.** Granična vrednost temperature razlike radijacione smetnje zavisno od transmisije radijacione smetnje za različite temperature razlike cilja pri različitim temperaturama pozadine i za različite spektralne opsege rada termovizijskih uređaja: (a) M opseg i (b) L opseg.

III POTISKIVANJE SIGNALA CILJA u nivo sivog - Radijaciona smetnja sa slabljenjem, koja prekriva deo IC scene (CILJ) ( $H_s \approx h$ ,  $W_s \approx w$ ,  $T_s \geq T_o$ ,  $\varepsilon_s \approx \varepsilon_p \approx \varepsilon_c \approx 1$ ,  $\tau_s < 1$ )

Cilj primene lokalizovane radijacione smetnje između cilja i termovizijskog uređaja je potiskivanje amplitude video signala cilja na nivo koji je manji od jednog nivoa sivog. Ekvivalentna razlika radijanse jednog nivoa sivog je u razmatranom slučaju vrednosti parametara rada termovizijskog uređaja:

$$\Delta L_s = \frac{L_o(1 + a\Delta T_c) - L_o}{N_s} = \frac{L_o a \Delta T_c}{N_s} \quad (24)$$

Ako radijaciona smetnja samo slabi zračenje cilja (niskotemperaturni oslabljivač - slučaj (a) na sl. 12 (III)), uslov za transmisiju smetnje je:

$$\tau_s \leq \frac{1 + a \frac{\Delta T_c}{N_s}}{1 + a \Delta T_c} \quad (25)$$

Izraz (25) je veoma sličan (16), što je i logično s obzirom da su i uslovi za ometanje slični.

Pored slabljenja zračenja cilja, potiskivanje signala cilja u jedan nivo sivog se može postići uz istovremeno podizanje nivoa zračenja okoline ( (b) i (c) na sl. 12 (III)), pri čemu je najbolji slučaj (c). U tom slučaju je uslov za transmisiju i temperaturu radijacione smetnje:

$$\tau_s \leq \frac{1 + a \frac{\Delta T_c}{N_s}}{1 + a \Delta T_c} \text{ i } \Delta T_s \approx \Delta T_c \quad (26)$$

Najteže je smanjivati nivo zračenja cilja sa visokom temperaturnom razlikom za koju je  $\alpha \Delta T_c > 1$ . Tada se dobija uslov za transmisiju radijacione smetnje u najboljem slučaju:

$$\tau_s \leq \frac{1}{N_s} \quad (27)$$

Kada termovizijski sistem nije optimiziran, tada se efekat ometanja može postići i sa manjim vrednostima transmisije dima.

Analizirani slučajevi daju samo kvalitativnu sliku mogućnosti ometanja i daju vrednosti za temperaturu i transmisiju radijacione smetnje u najlošijim uslovima za koje je moguće izvesti odgovarajuće aproksimacije. Kako je nemoguće uračunati sve prisutne efekte na jednoznačan način, realni efekti primene radijacionih smetnji se mogu utvrditi samo eksperimentalno.

Lokalnom primenom radijacionih smetnji se najmanje može uticati na prikriivanje cilja, jer je radijacioni kontrast u sceni osnovni izvor informacije, a programirana primena radijacionih smetnji (usklađena sa osobinama zračenja okoline) nije moguća.

*Uticao radijacionih smetnji na termovizijske uređaje sa automatskim podešavanjem slike*

Automatska regulacija pojačanja i kontrasta podrazumeva automatsko referenciranje signala (definisanje temperaturnog ofseta - nivoa crnog (belog) u slici i nivoa osvetljaja displeja, i automatsko definisanje temperaturnog prozora -- kontrast, odnosno pojačanja filtriranog video signala. Automatska regulacija parametara rada termovizijskog uređaja je samo jedna od komponenata automatske obrade signala termovizijskih uređaja. U savremenim termovizijskim uređajima primenjuje se

uređajima primenjuje se adaptivno procesiranje, koje treba da omogući nekoliko poboljšanja u obradi video signala:

- kompenzaciju prigušenja signala filterskoj sprezi pri višestrukome skaniranju,
- naglašavanje malih i slabih ciljeva u susedstvu velikih i snažnih izvora zračenja,
- podešavanje srednjeg nivoa video signala na srednji nivo sjaja monitora i
- podešavanje amplitude filtriranog video signala na ceo raspon nivoa sivog na monitoru.

Primenom adaptivne obrade signala omogućava se neprekidnost optimalnih uslova režima rada termovizijskog uređaja.

Kako realni ciljevi zauzimaju relativno mali deo vidnog polja, to se termovizijski uređaji sa automatskim podešavanjem ofseta ponašaju slično kao i uređaji sa ručnom regulacijom ofseta, tj. cilj ne utiče bitno na određivanje temperaturnog ofseta. Ofset je prvenstveno vezan za uslove zračenja okoline, odnosno prilagođava se okolini. Zbog toga se pri ometanju termovizijskih uređaja ne mogu primeniti tehnike potiskivanja video signala izvan temperaturnog prozora (potiskivanje ispod nivoa zračenja okoline ili zasićenje termovizijskog uređaja).

Automatskom regulacijom pojačanja elektronskog lanca se praktično reguliše širina temperaturnog prozora prema amplitudi video signala - kontrast termovizijske slike. Zbog toga se termovizijski uređaji sa automatskom regulacijom kontrasta mogu ometati samo na dva načina: (a) potiskivanjem signala zračenja cilja ispod ekvivalentnog nivoa šuma (MRT) i (b) fiksiranjem temperaturnog prozora unošenjem snažnih izvora zračenja (klateri) u vidno polje termovizijskog uređaja.

(A) POTISKIVANJE SIGNALA CILJA Radijaciona smetnja sa slabljenjem, koja prekriva deo IC scene - cilj ili celu scenu ( $H_s \approx h$ ,  $W_s \approx w$  ili  $H_s \approx H$ ,  $W_s \approx W$ )

Uslov za vrednost transmitivnosti radijacione smetnje koja se primenjuje lokalno ( iznad cilja) se može dobiti iz jednačine približnog bilansa radijanse cilja u prisustvu smetnje:

$$\begin{aligned} \tau_s \cdot \tau_a \cdot L(T_o) \cdot (1 + a \Delta T_s) - \tau_a \cdot L(T_o) &= \\ = \tau_a L(T_o) \cdot (1 + a \cdot MRT(f_c^*)) - \tau_a \cdot L(T_o) & \end{aligned} \quad (28)$$

odnosno,

$$\tau_s = \frac{1 + a \cdot MRT(f_c^*)}{1 + a \Delta T_c} \quad (29)$$

U slučaju da je slabljenje veće od ove vrednosti, dobija se negativni kontrast, pa se oblast primene radijacione smetnje ističe u slici tako da se dobija demaskirajući efekat.

Kada je radijaciona smetnja takva da njena temperatura i emisivnost ne remete bilans radijanse i kada se razvija preko cele scene tako da deluje samo preko smanjenja transmisije, tada se potiskivanje slike cilja može postići u slučaju:

$$\tau_s \leq \frac{1}{\tau_a} \cdot \frac{MRT(f_c^*)}{\Delta T_c} \quad (30)$$

tj. efektivna temperaturna razlika cilja se svode na vrednost manju od realne MRT ( $\frac{MRT(f_c^*)}{\tau_a}$ ).

(B) PORTISKIVANJE SIGNALA CILJA **ispod nivo sivog** Snažni izvori u IC sceni – KLATERI ( $H_s \approx h$ ,  $W_s \approx w$  ili  $H_s \approx H$ ,  $W_s \approx W$ )

Primenom snažnih izvora u vidnom polju proširuje se temperaturni prozor ili je temperaturni nivo viši (nivo referenciranja).

U slučaju kada je referenciranje termovizijskog uređaja nezavisno od srednje radijanse u sceni, klater deluje samo na proširenje temperaturnog prozora, pa je neophodna takva efektivna temperaturna razlika klatera da temperaturna razlika cilja bude manja od efektivne temperaturne razlike jednog nivoa sivog, odnosno:

$$\Delta T_s \geq N_s \cdot \Delta T_c \quad (31)$$

Većina savremenih termovizijskih uređaja ima mogućnost adaptivne obrade signala (prostorno filtriranje slike). Takođe, pored postizanja odgovarajuće temperature klatera, mora da se postigne i zadovoljavajuća površina klatera, tj. klater treba da ima površinu približnu površini cilja, pošto se filtriranjem mogu potisnuti snažni tačkasti izvori. U slučaju da je referenciranje termovizijskog uređaja vezano za srednju radijansu u sceni, primenom klatera može se povećati temperaturni nivo referenciranja za temperaturnu razliku cilja čime se postiže potiskivanje signala cilja u pozadinu. U tom slučaju, temperaturna razlika i površina smetnje moraju zadovoljiti uslov:

$$\Delta T_s \cdot \frac{w_s \cdot h_s}{W \cdot H} \geq \Delta T_c - MRT(f_c^*) \quad (32)$$

Može se zaključiti da je relativno teško ometati termovizijske uređaje sa automatskom regulacijom pojačanja i kontrasta, pri čemu se može formulisati nekoliko osnovnih pravila:

- Samo bitne izmene signature cele scene mogu doprineti smanjenju mogućnosti detekcije cilja.
- Primena radijacione smetnje mora biti prilagođena signaturi scene i signaturi cilja (objekta) koji se štiti.
- Kada se primenjuju radijacione smetnje sa smanjenom transmisijom, njihova transmisija mora biti relativno niska, a površina koju smetnja pokriva mora biti relativno velika.
- Primena klatera može biti efikasna samo kada je površina klatera reda veličine cilja, a temperaturna razlika bar za red veličine veća od temperaturne razlike cilja.
- Najveća efikasnost radijacionih smetnji mora biti eksperimentalno proverena sa sličnom klasom termovizijskih uređaja, da bi se radijaciona smetnja mogla primeniti sa punim poverenjem.

### Zaključak

Prikazane su osnove funkcionisanja termovizijskih uređaja i osnovni izvori za formiranje IC signature scene, u cilju formulisanja uprošćenog modela IC scene i termovizijskih uređaja. Izvršeni su linearizacija Plankovog zakona zračenja i procena greške. Greška linearizacije je prihvatljiva za potrebe formiranja uprošćenih modela scene i smetnje. Primenom linearizovanog Plankovog zakona zračenja formirani su modeli IC signature scene i radijacione smetnje za različite slučajeve odnosa zračenja scene i uticaje radijacionih smetnji radi analize uticaja smetnje na formiranje termovizijske slike.

Prikazani su osnovni procesi kroz koje radijaciona smetnja može da utiče na izmenu sadržaja termovizijske slike. Opisani su različiti tipovi prirodnih i veštačkih radijacionih smetnji. Polazeći od uopštenih parametara

smetnji. Polazeći od uopštenih parametara smetnje (dimenzije, temperatura, transmisija i emisivnost), analizirani su uticaji radijacionih smetnji za različite tipove termovizijskih uređaja i različite osobine radijacionih smetnji. Analizirani slučajevi daju samo kvalitativnu sliku mogućnosti ometanja. Iako je analiza uprošćena i kvalitativna, primena uprošćenog modela je veoma korisna, jer su dobijeni rezultati u obliku analitičkih izraza koji su pogodni za procenu značaja delovanja izabranih efekata i graničnih mogućnosti delovanja odabrane radijacione smetnje. Kako je teško uračunati sve efekte na jednoznačan način, realni efekti odabranih radijacionih smetnji se moraju utvrđivati eksperimentalno.

Rezultati analize pokazuju:

- (1) U slučaju termovizijskih uređaja sa ručnom kontrolom pojačanja i kontrasta moguće je ometanje termovizijskih uređaja, pri čemu uticaj karakteristika radijacionih smetnji može biti različit:
  - Slabotransmisionne smetnje mogu dovesti do degradacije termovizijske slike. Uticaj je više izražen na termovizijske uređaje koji rade u L opsegu. Relativno mali pad transmisije dovodi do degradacije i/ili gubitka termovizijske slike posmatranog objekta.
  - "Tople" radijacione smetnje degradiraju termovizijsku sliku samo ako je temperaturna razlika smetnje veća nego temperaturna razlika cilja. Ukoliko je smetnja visoko- -transmisionna, temperaturna razlika smetnje treba da bude višestruko veća od temperaturne razlike cilja da bi došlo do gubitka termovizijske slike cilja.
  - Prostorno lokalizovano dejstvo radijacionih smetnji ne može dovesti do potpunog gubitka informacije o cilju, jer je radijacioni kontrast u sceni osnovni izvor informacija, a lokalizovana smetnja (na oblast cilja) se teško može istovremeno uskladiti i sa okolinom i sa karakteristikama cilja.
- (2) U slučaju primene termovizijskih uređaja sa automatskom regulacijom pojačanja i kontrasta, otežani su uslovi za ometanje zbog adaptibilnosti uređaja sadržaju IC zračenja scena, ali je ometanjem moguće prigušiti informaciju o cilju na nekoliko različitih načina:
  - Slabotransmisionne smetnje mogu dovesti do degradacije termovizijske slike, a potrebna vrednost transmisije zavisi od kvaliteta termovizijskog uređaja izraženog preko MRT.
  - Prisustvo snažnih izvora zračenja u sceni može da utiče na proces automatskog referenciranja. Ukupan uticaj zavisi kako od temperaturne razlike i dimenzija izvora, tako i od primenjenog algoritma referenciranja kod uređaja koji se ometa.
  - Primenom maketa koje dobro imitiraju signaturu cilja se prikriva informacija o pravom cilju uvođenjem u scenu lažnih ciljeva. Zahtevi za kvalitet makete (podešenost IC signature) zavise od kvaliteta uređaja koji se ometa kao i od očekivane udaljenosti između cilja i termovizijskog uređaja (uticaj prostorne rezolucije uređaja).

Termovizijski uređaji su, u dosadašnjoj praksi, pokazali dobru efikasnost i nalaze se u širokoj upotrebi. Rezultati ove analize pokazuju da su osetljivi na prisustvo radijacionih smetnji koje se mogu efikasno koristiti za ometanje rada termovizijskih uređaja. Ukupna degradacija termovizijske slike u prisustvu radijacionih smetnji bitno zavisi od karakteristika smetnje (temperaturna razlika, dimenzije,

transmisija, emisija), ali i od tipa korišćenog termovizijskog uređaja.

Planiranje primena tehnika za primenu radijacionih smetnji za ometanje termovizijskih uređaja mnogo zavisi od poznavanja strukture IC signature scene, kao i od poznavanja karakteristika uređaja koji se ometaju. Termovizijske uređaje sa automatskom regulacijom pojačanja i kontrasta je teže ometati. Za razliku od tehnika maskiranja u vidljivoj oblasti koje su zasnovane na prilagođenju koeficijenta refleksije sredstva za maskiranje ili smanjenju transmisije vidljivog zračenja, tehnike maskiranja protiv termovizijskih uređaja su znatno složenije i teže ih je tehnički realizovati, pošto je potrebno primeniti mere koje utiču na ukupnu signaturu scene, koju sačinjava složen skup različitih izvora zračenja.

Simultanom primenom više različitih smetnji u celoj sceni, može se znatno povećati efikasnost ometanja ali tada taktika primene mora biti prilagođena strukturi IC signature scene i karakteristikama uređaja koji se ometaju. Pri planiranju mera IC maskiranja mogu se primenjivati različiti teorijski modeli za procenu efikasnosti, ali operativna primena može uslediti tek posle eksperimentalnih provera.

S obzirom na značaj, mogućnosti i rasprostranjenost upotrebe termovizijskih uređaja neophodno je preduzimanje mera zaštite i IC maskiranja. Treba imati u vidu da je maskiranje protiv termovizijskih uređaja znatno složenije nego maskiranje u vidljivoj oblasti, i da se zahteva mnogo bolje poznavanje same strukture IC signature scene i karakteristika termovizijskih uređaja. Zbog toga je i obuka za IC maskiranje mnogo složenija.

## Literatura

- [1] LIVADA,B., BABIĆ,V.Noćne optoelektronske sprave sa pojačavačima slike. *Vojnotehnički glasnik*, 1992, no.1, p.18-35.
- [2] LLOYD,J.M. *Thermal imaging systems*. Plenum Press, New York, 1975.
- [3] RATCHES,J.A., LAWSON,R.W. et all. *Night vision laboratory static performance for thermal viewing systems*.1975, NTIS AD-A011 212, (U.S. Army Electronics Command, Night Vision Laboratory).
- [4] GOODELL,B.J., HARVEY,G.I. et all. *The fundamentals of thermal imaging Systems*. 1979, NTIS AD-A073763, (Naval Research Laboratory).
- [5] GAUSSORGES,G. *La thermographie infrarouge: Principes - Technologie – Applications*. (1984), Technique et Documentation, Paris (prevod na ruski (1988) Mir, Moskva).
- [6] LIVADA,B. Karakteristike termovizijskih uređaja. *Naučnotehnički pregled*, 1998, vol.XLVIII, no.4, p.86-94.
- [7] WOLFE,W.L. Differences in radiance: relative effects of temperature changes and emissivity changes. *Applied Optics*, 1975, vol.14, no.8, p.1937-1939.
- [8] WOLFE,W.L., ZISSIS,G.J (ed.). *The Infrared Handbook*.. Office of Naval Reseach, Department of Navy, Washington, 1978.
- [9] WOLFE,W.L. (ed.). *The Handbook of Military Infrared Technology*. Office of Naval Reseach, Department of Navy, Washington, 1965.
- [10] HOLST,G.C. *Infrared transmission through screening smokes: Experimental considerations*. NTIS AD A 086773.
- [11] LIVADA,B. The role of emissivity in the interpretation of thermal images. *MIOPEL 93 2nd Serbian conference on microelectronics and optoelectronics*, Niš - Serbia 26.-28. october 1993.
- [12] LIVADA,B. Protivelektronska borba u oblasti primene optoelektronskih uređaja i sistema. *Vojnotehnički glasnik*, 1995, no.4, p.498-519.
- [13] LIVADA,B. Analiza uticaja radijacionih smetnji na primenu termovizijskih uređaja. *XL konferencija ETRAN-a*, Budva 04.-07. jun 1996.

Rad primljen: 18.11.1999.god.