Dr Žarko Barbarić,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

UPROŠĆENI MATEMATIČKI MODEL ZA FORMIRANJE SLIKE TERENA OPTOELEKTRONSKIM SENZORIMA

UDC: 621.397.331.2:681.586.73:623.642

Rezime:

Modeliran je proces formiranja slike terena optoelektronskim senzorima radi analize i razumevanja uticaja parametara terena, atmosfere i senzora. Matematički model za opisivanje procesa formiranja slike terena optoelektronskim senzorima veoma je složen, pa se u literaturi javljaju namenski modeli sa određenim uprošćavanjem. U radu su izložene teoretske osnove za razumevanje procesa formiranja slike terena, uprošćen matematički model i primer primene modela za generisanje termalne slike na računaru, formirane skeniranjem kvaziprirodnog terena.

Ključne reči: slike terena, matematički model, generisanje termalne slike.

SIMPLIFIED MATHEMATICAL MODEL FOR TERRAIN IMAGE FORMING BY OPTOELECTRONIC SENSORS

Summary:

The process of terrain image forming by optoelectronic sensors is modelled for the sake of analysis and better understanding of the effects of terrain, atmosphere and sensor parameters. The mathematical model for the description of the terrain image forming process by optoelectronic sensors is a very complex one, so that some simplified models can be found in the literature for this purpose. The paper presents theoretical foundations for understanding terrain image forming as well as the simplified mathematical model and an example of the model application for the computer generation of thermal imagery formed by scanning a quasi-real terrain.

Key words: terrain image, mathematical model, thermal imagery generation.

Uvod

Slika terena je vizuelni kontrast, koji je posledica razlike refleksivnosti, emisivnosti i temperature posmatranog objekta i pozadine. Drugim rečima, slika predstavlja raspodelu gustine snage ozračenja i zračenja na sceni koja se transformiše optičkim sistemom i pretvara na detektoru senzora u video signal slike.

Formiranje slike terena zasniva se na složenim procesima razmene elektromagnetske energije u delu elektro-

magnetskog spektra između terena (objekti i pozadina), atmosfere i optoelektronskih delova senzora (optika i detektor) u prisustvu zračenja Sunca i neba i pri raznim ambijentnim uslovima (vetar, vlažnost, prašina, dim i dr.). Zračenje terena zavisi od sastava i vrste objekta, temperature objekta i pozadine, razmene toplote između objekta i okoline, zračenja Sunca i neba i vremenskih uslova. Pri prostiranju zračenja kroz atmosferu slabljenje elektromagnetskih talasa je selektivno, jer, u opštem slučaju, zavisi od talasne du-

žine zračenja i sastava atmosfere. Prijemna optika senzora prikuplja elektromagnetsku energiju i usmerava je na detektor na kome se vrši konverzija u video signal. Dalja obrada video signala zavisi od namene senzora i načina prikazivanja informacije o objektima.

Elektromagnetsko zračenje Sunca u bliskom ultravioletnom delu spektra (0,3 do 0,4 μm), vidljivom delu spektra (0,4 do 0,7 μm) i delu bliskom infracrvenom spektru (0,7 do 0,9 μm) koristi se za formiranje slike prirodnih terena, jer je reflektovano zračenje Sunca dominantno u ovim spektralnim područjima. U dalekom delu infracrvenog spektra (8 do 14 μm) zračenje prirodnih terena često se naziva termalno zračenje, pa se formirane infracrvene slike nazivaju termalne slike. Razlog za to je dominantno termalno zračenje prirodnih terena u dalekom infracrvenom spektralnom području (6 do 15 μm). U spektralnom području od 8 do 15 μm , gde je i atmosferski prozor, može se zanemariti uticaj zračenja Sunca osim spekularne refleksije. U spektralnom području od 3 do 5 μm obe komponente zračenja, reflektovano zračenje Sunca i emitovano zračenje terena, značajne su za formiranje infracrvene termalne slike. Spektralno područje od 0,76 do 3 μm je reflektivno blisko infracrveno područje, jer je dominantno zračenje Sunca reflektovano od terena [1].

Za razumevanje procesa i ispitivanje uticaja pojedinih parametara razvijaju se matematički modeli za simulaciju procesa formiranja i generisanje slike pomoću računara.

Uprošćeni matematički model za formiranje slike terena

Uprošćeni matematički model za formiranje slike terena zasniva se na modelu koji je razvijen za generisanje i analizu infracrvene termalne slike formirane linijskim skeniranjem terena

iz vazduha, u talasnom području od 8 do 14 μm [2]. Uprošćeni matematički model (blok-shema na slici 1) sličan je objavljenim modelima [1—4].

Sl. 1 — Uprošćeni model za formiranje slike terena

Model objašnjava formiranje tačke na slici, koja predstavlja sopstveno i reflektovano zračenje rezolucione ćelije terena, transmitansu i zračenje atmosfere između rezolucione ćelije i prijemne optike, optičke efekte preslikavanja terena, konverziju incidentne snage zračenja u napon na izlazu detektora i konverziju napona u nivo signala na elektronskom prikazivaču.

Rezoluciona ćelija je projektovana površina na terenu koja se vidi pod trenutnim prostornim vidnim uglom senzora Ω i visine leta H . Sa slike se vidi da je površina rezolucione ćelije najmanja u nadiru ($A=H^2\Omega$) i da raste sa uglom kosog snimanja ili skeniranja ($A(\Theta)=A\sec^3\Theta$). Na slici 2 šematski su prikazane i spektralne radijance terena $L_{\lambda 1}$ i $L_{\lambda 2}$ i spektralna radijansa atmosfere $L_{\lambda 3}$.

Površina rezolucione ćelije zavisi od trenutnog prostornog vidnog ugla senzora Ω i visine leta H . Sa slike se vidi da je površina rezolucione ćelije najmanja u nadiru ($A=H^2\Omega$) i da raste sa uglom kosog snimanja ili skeniranja ($A(\Theta)=A\sec^3\Theta$). Na slici 2 šematski su prikazane i spektralne radijance terena $L_{\lambda 1}$ i $L_{\lambda 2}$ i spektralna radijansa atmosfere $L_{\lambda 3}$.

Ukupna ekvivalentna radijansa elementarne površine rezolucione ćelije, odnosno gustina snage zračenja po jediničnom prostornom uglu zavisi od emitovane radijance sa i reflektovane

iradijancije od elementarne površine rezolucione ćelije i radijancije elementarne zapremine atmosfere između rezolucione ćelije i prijemne optike. Ekvivalentna spektralna radijansa na ulazu u prijemnu optiku, sa slike 2, može se odrediti iz izraza:

$$L_{\lambda e} = \tau_{\lambda}(L_{\lambda 1} + L_{\lambda 2}) + L_{\lambda 3} \quad (1)$$

gde je:

τ_{λ} — spektralna transmitivnost atmosfere, a spektralne radijancije su:

$L_{\lambda 1}$ — komponenta emitovana sa elementarne površine rezolucione ćelije

$L_{\lambda 2}$ — komponenta reflektovane iradijancije od elementarne površine rezolucione ćelije

$L_{\lambda 3}$ — komponenta zračenja atmosfere između elementarne površine rezolucione ćelije i prijemne optike.

Ukupna primljena snaga u jediničnom opsegu talasnih dužina Φ_{λ} , koju prima detektor sa rezolucione ćelije i atmosfere između rezolucione ćelije i prijemne optike je:

$$\Phi_{\lambda} = A_0 k_0 \int_{\Omega} L_{\lambda e} d\Omega \quad (2)$$

gde je:

Ω — prostorni vidni ugao senzora,

A_0 — efektivna površina prijemne optike,

k_0 — gubici prijemne optike.

Napon na izlazu detektora zavisi od incidentne spektralne snage, spektralnog koeficijenta konverzije i graničnih talasnih dužina detektora:

$$V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} R_{\lambda} d\lambda \quad (3)$$

gde je:

R_{λ} — spektralni faktor konverzije detektora.

Nivo sivog tačke (piksela), koji predstavlja rezolucionu ćeliju na slici, proporcionalan je naponu:

$$I = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{\lambda} R_{\lambda} d\lambda + I_{\text{offs}} \quad (4)$$

gde je:

K — pojačanje,

I_{offs} — referentni nivo sivog sistema za prikazivanje.

Sl. 2 — Rezoluciona ćelija na terenu

Relacija (4) dovodi u vezu sopstveno i reflektovano zračenje rezolucione ćelije i zračenje atmosfere između rezolucione ćelije i prijemne optike u određenom području talasnih dužina i nivo sivog tačke koja predstavlja površinu rezolucione ćelije na slici.

TEREN

Teren je deo površine Zemlje koji emituje i reflektuje elektromagnetsko zračenje. Za razliku od terena, pojam scena koristi se za razumevanje uslova pri kojem se formira slika. Za senzore scena predstavlja, prostorno ili vremenski, teren sa izvorima i atmosferom kroz koju senzor prima zračenje. Za objekat na terenu često se koristi pojam cilj, a teren se naziva pozadina objekta i sami objekti (ciljevi).

Teren je, s aspekta zračenja, moguće opisati temperaturom, emisivnošću i reflektivnošću, kao što je prikazano na blok-šemi modela (slika 1).

Promena temperature na terenu, u opštem slučaju, zavisi od koordinata i vremena $T(x,y,t)$. Temperatura terena nekoliko centimetara ispod površine je T_0 , a $T(x,y)$ je površinska promena temperature elementarne površine u datom vremenskom trenutku. Prema rezultatima istraživanja [5], vremenska konstanta temperature elementarne površine je oko 1000 s, te se može uzeti da je promena temperature u vremenu formiranja slike jednaka nuli. Temperatura terena je statistička slučajna veličina, čija vrednost, na elementarnoj površini fluktuiira od tačke do tačke oko srednje vrednosti. Raspodela gustine verovatnoće temperature elementarne površine menja se po Gausovom zakonu [5]. Postoji zavisnost promene temperature između tačaka rezolucioni ćelija na terenu, koja se može odrediti na osnovu korelacione dužine temperature terena. Rezultati istraživanja [6] pokazuju da se korelaciona dužina temperature menja sa aktivnošću Sunca i odnosom korelacionih dužina termalne konduktivnosti i apsorptivnosti terena.

Spektralna emisivnost $\varepsilon_\lambda(x,y)$ jeste slučajna promenljiva od tačke do tačke na površini rezolucione ćelije u jednom vremenskom trenutku. Pored toga, emisivnost se menja i sa uglom posmatranja. Za prirodne terene uzima se da su sivi difuzioni izvori oni čija se ukupna emisivnost menja od 0,90 do 0,96 [7], što zavisi od sastava terena i vegetacije. U modelima se, najčešće, uzima da je srednja vrednost emisivnosti konstantna ili se smatra da zavisi od ugla posmatranja [4, 7].

Spektralna radijansa $L_{\lambda 1}$, u relaciji (1), određuje se na osnovu temperature i spektralne emisivnosti površine rezolucione ćelije na osnovu dobro poznatog modifikovanog Plankovog zakona [8].

Spektralna reflektivnost $\rho_\lambda(x,y)$ se, takođe, statistički menja od tačke do tačke na površini rezolucione ćelije. Reflektivnost elementarne površine je mnogo teže opisati nego emisivnost, jer zavisi od uglova između incidentnog i reflektovanog zračenja prema normali elementarne površine rezolucione ćelije.

Spektralna radijansa reflektovanog zračenja od elementarne površine rezolucione ćelije sastoji se od dve komponente: jedna je posledica reflektovanog Sunčevog zračenja, a druga reflektovanog zračenja neba. Spektralna radijansa reflektovanog Sunčevog zračenja od elementarne površine rezolucione ćelije određuje se (na osnovu spektralne bidirekcione i direkcione difuzne reflektivnosti) iz sledeće relacije [1]:

$$L_{\lambda RS} = \rho_\lambda(\Theta_s, \Phi_s, \Theta, \Phi) E_{\lambda s} \cos \Theta_s = \frac{1}{\pi} \rho_\lambda(\Theta_s, \Phi_s) E_{\lambda s} \cos \Theta_s \quad (5)$$

gde je:

- $L_{\lambda RS}$ — spektralna radijansa refleksije Sunčevog zračenja,
- $E_{\lambda s}$ — iradijansa Sunčevog zračenja na elementarnoj površini,
- Θ_s — ugao između normale elementarne površine i položaja Sunca.

Spektralna iradijansa $E_{\lambda s}$, u relaciji (5), određuje se iz spektralne radijanse Sunca za ekvivalentnu temperaturu od 5770 K ili iz empirijskih rezultata [9]. Ukupna iradijansa Sunca [9] na površini Zemlje (na nivou mora pri vedrom nebu) u toku dana iznosi 865 Wm^{-2} ; 640 Wm^{-2} i 100 Wm^{-2} za uglove 0° ; 60° i 85° u odnosu na zenit, respektivno.

Poznato je da spektralna radijansa neba zavisi od ugla posmatranja; najmanja je u zenitu i raste sa uglom prema normali na elementarnu površinu. Spektralna radijansa zračenja neba reflektovanog od elementarne površine određuje se iz relacije [1]:

$$L_{\lambda RN} = 2 \rho_{\lambda} L_{\lambda N}(\Theta_N = 0^\circ) = \rho_{\lambda} L_{\lambda N}(\Theta_N = 60^\circ) \quad (6)$$

Spektralna radijansa, u relaciji (6), određena je prema incidentnom uglu normalnom na površinu rezolucione ćelije i uglu od 60° . Spektralna radijansa neba $L_{\lambda N}$ određuje se na više načina. U literaturi se, najčešće, koriste empirijska formula Idso-Jaksona [9] i Sandersova poluempirijska aproksimacija [4].

Ukupna spektralna radijansa reflektovanih zračenja Sunca i neba od elementarne površine rezolucione ćelije $L_{\lambda 2}$ iz relacije (1) jednaka je zbiru spektralnih radijansi, datih relacijama (5) i (6):

$$L_{\lambda 2} = L_{\lambda RN} + L_{\lambda RS} \quad (7)$$

Senzori laserskog izviđanja istovremeno su izvori i detektori laserskog zračenja. U ovom slučaju, spektralna radijansa terena iz relacije (1) ima i treću dominantnu komponentu $L_{\lambda RL}$, koja predstavlja reflektovanu iradijansu lasera od površine terena. Lasersko zračenje ima vrlo uzan spektar, pa se radi o zračenju na jednoj talasnoj dužini. Radijansa reflektovane iradijanse terena od laserskog zračenja, pod pretpostavkom da teren difuzno reflektuje lasersko zračenje, iznosi:

$$L_{\lambda RL} = P_L \tau \rho \cos \Theta_L / (\pi A_s) \quad (8)$$

gde je:

- P_L — snaga zračenja laserskog predajnika,
- τ — transmitivnost atmosfere na određenoj talasnoj dužini,
- Θ_L — ugao ose snopa laserskog zračenja prema normali rezolucione ćelije,
- ρ — refleksivnost površine terena obasjane laserskim snopom,
- A_s — površina snopa na terenu ($A_s = \lambda R / \pi w$, gde je w minimalna širina snopa u izvoru, a R — rastojanje od izvora laserskog zračenja do površine rezolucione ćelije na terenu).

ATMOSFERA

Atmosfera zbog sopstvene temperature emituje zračenje, a elektromagnetska energija je pri prostiranju kroz atmosferu izložena slabljenju usled rasejavanja i apsorpcije. Sopstveno zračenje atmosfere opisuje se spektralnom radijansom, a propustljivost spektralnom transmitivnošću. Rasejavanje je posledica refleksije i refrakcije elektromagnetskog talasa od čestica vodene pare, prašine ili dimova. Komponenta rasejavanja zračenja neba i Sunca dolazi na prijemnu optiku direktno kroz atmosferu ili refleksijom od površine terena. Apsorpcija ima za posledicu slabljenje elektromagnetske energije i sopstveno zračenje usled zagrevanja atmosfere. Sa stanovišta daljinskog osmatranja, rasejavanje uzrokuje delimično usmeravanje zračenja izvan vidnog polja senzora, što menja nivo zračenja koje prima senzor. Teorijski, rasejavanje ima tri komponente u zavisnosti od odnosa između talasne dužine zračenja i dimenzija čestica koje prouzrokuju rasejavanje.

Apsorpcija u atmosferi dominantnija je od rasejavanja, posebno u dalekom infracrvenom delu spektra. Efekat apsorpcije izražen je zbog prisustva vodene pare, ugljen-dioksida, ozona i industrijske prašine. Slabljenje e-

elektromagnetske energije pri prostiranju kroz atmosferu je selektivno po talasnim dužinama [10, 11]. Vodena para slabi elektromagnetska zračenja na talasnim dužinama od 0,72 do 38 μm , a izrazit je apsorber za talasne dužine 1,5; 2,7 i od 4,5 do 6,5 μm . Ugljen-dioksid slabi elektromagnetska zračenja na talasnim dužinama od 0,72 do 16 μm , a dominantno apsorbuje na talasnim dužinama 2,7; 4,3 i 15 μm . Ozon je izrazit apsorber na talasnoj dužini 9,2 μm , a utiče na slabljenje u opsegu talasnih dužina od 8 do 14 μm . Pošto atmosfera selektivno slabi zračenje postoje opsezi talasnih dužina za koje je spektralna transmitivnost veća od 70% i manja od 25%. Opseg talasnih dužina u kojima je spektralna transmitivnost veća od 70% naziva se atmosferski prozor.

Spektralna transmitivnost i radijansa atmosfere su vremenski i prostorno statističke veličine. Najpoznatiji model atmosferske transmitivnosti i radijanse objavio je Knežis sa grupom saradnika pod nazivom LOWTRAN-6 [12]. Ovaj model atmosfere omogućava izračunavanje transmitivnosti i radijanse atmosfere pojedinačno i zajedno, kao i rasejavanje od Sunca i Meseca za različite geometrije i dužine puta od izvora do senzora. Pošto je ovaj model kompleksan i nedostupan mnogim korisnicima, koriste se aproksimacije za određivanje spektralne transmitivnosti i radijanse atmosfere.

Poznato je da se snaga zračenja u jediničnom opsegu talasnih dužina po prolasku kroz atmosferu debljine x i spektralnog koeficijenta slabljenja σ_λ može odrediti iz relacije [10]:

$$\Phi_\lambda = \Phi_{0\lambda} \exp(-\sigma_\lambda x) \quad (9)$$

Spektralna transmitivnost atmosfere τ_λ je odnos snaga (u jediničnom opsegu talasnih dužina) na izlazu i ulazu atmosferskog sloja debljine x i iznosi:

$$\tau_\lambda = \exp(-\sigma_\lambda x) \quad (10)$$

Ako se usvoji srednja vrednost spektralnog koeficijenta podužnog slabljenja atmosfere za stvarnu visinu leta H , tada je spektralna transmitivnost atmosfere pri linijskom skeniranju ili kosom kadrovskom snimanju [2]:

$$\tau_\lambda = \bar{\tau}_\lambda^{\sec(\theta)} \quad (11)$$

gde je $\bar{\tau}_\lambda$ srednja vrednost spektralne transmitivnosti za visinu H i ugao kosog snimanja ili skeniranja $\Theta=0$.

Ovako definisana spektralna transmitivnost atmosfere omogućava relativnu analizu slabljenja zračenja terena, pri prostiranju kroz atmosferu, u odnosu na slabljenje zračenja površine rezolucione ćelije u nadiru. Pošto je srednja vrednost transmitivnosti atmosfere manja od jedan, iz relacije (11) vidi se da spektralna transmitivnost opada sa povećavanjem ugla skeniranja, odnosno sa povećanjem ugla pod kojim se vrši koso snimanje.

Spektralna radijansa atmosfere u konusu prostornog ugla senzora je statistička veličina koju je veoma teško odrediti. Jedna aproksimativna relacija za spektralnu radijansu atmosfere [2] iznosi:

$$L_{\lambda 3} = (1 - \tau_\lambda) L_{\lambda BB}(\bar{T}_a) \quad (12)$$

gde je:

$\tau_\lambda = \tau_{\lambda i}^n$ — spektralna transmitivnost homogene atmosfere sa n slojeva,

$L_{\lambda BB}(\bar{T}_a)$ — spektralna radijansa crnog tela temperature $\bar{T}_a$,

$\bar{T}_a$ — srednja vrednost temperature prvog sloja atmosfere iznad rezolucione ćelije.

Relacija (12) izvedena je pod pretpostavkama da je reflektivnost atmosfere zanemarljivo mala, da je promena temperature sa visinom mala u odnosu na srednju vrednost temperature atmosfere i da je atmosfera homogena. Iz relacije se vidi da spektralna radijansa atmosfere zavisi od spektralne

transmitivnosti atmosfere i spektralne radijanse ekvivalentnog crnog tela temperature $\bar{T}_a$. U slučaju da je atmosfera idealno prozirna ($\tau_\lambda = 1$), radijansa atmosfere postaje jednaka nuli. Pošto je transmitivnost atmosfere manja od jedan, a i činjenica je da se smanjuje sa povećavanjem ugla kosog snimanja ili ugla skeniranja, spektralna radijansa atmosfere se povećava sa povećanjem ugla skeniranja, pri konstantnoj visini leta H i konstantnoj srednjoj vrednosti temperature vazduha $\bar{T}_a$ neposredno iznad površine terena.

PRESLIKAVANJE RAVNI TERENA U RAVAN SLIKE

Optomehaničko linijsko skeniranje

Senzori slike na bazi skeniranja formiraju sliku na dva načina: optomehaničkim skeniranjem ravni terena i skeniranjem ravni slike. Optomehaničko skeniranje scene ima određene prednosti, ali i nedostatke u odnosu na skeniranje ravni slike.

Senzori slike sa skeniranjem ravni slike primaju zračenje optičkim teleskopom iz relativno širokog vidnog polja (10° do 30°). Ravan slike objekta skenira se sekundarnom optikom i usmerava na detektor, koji ima jedan ili više elemenata. Kod ovih senzora javljaju se problemi u projektovanju i izradi sekundarne optike koja omogućava formiranje kvalitetne slike, odnosno transformaciju širokog trenutnog vidnog ugla prijemne optike u vrlo uzak trenutni vidni ugao detektora. Postoje različiti oblici skeniranja, kao što su: spiralno, kružno, sinusoidalno, pravolinijsko i dr. [13]. Oblik skeniranja zavisi od tipa detektora, ukupnog vidnog polja, zahtevane rezolucije, fizičkih ograničenja u pogledu rotacije, dimenzija i dr.

Za izviđanje iz vazdušnog prostora i mapiranje terena najčešće se koriste optomehanički linijski skeneri. Kreta-

njem platforme (vazduhoplova), koja nosi senzor, formiraju se sukcesivne linije skeniranja. Ako brzina vazduhoplova nije prilagođena brzini skeniranja, dolazi do višestrukog skeniranja iste površine ili do neskeniranja dela površine terena. Prva pojava izaziva dodatnu redundansu, a druga gubitak informacije na slici. Dodatna redundansa na slikama može se iskoristiti u obradi signala za prenos ili povećanje odnosa signal-šum na slikama, kao, na primer, kod kružnog skeniranja. Na slici 3 prikazan je princip linijskog optomehaničkog skeniranja terena. Letelica na visini H leti brzinom v i nosi skener koji ima ravanske trenutne vidne uglove α_0 i β_0 , ($\alpha_0 = \beta_0$), reda mrad.

Trenutni vidni uglovi određuju površinu rezolucione ćelije, koja se pomena duž ose skeniranja i za ugao skeniranja $|\Theta| = \Theta_{\max}$ formira prebrisanu traku na površini terena. Tako, linija na slici odgovara prebrisanom površini na terenu, a tačka (piksel) na liniji po-

Sl. 3 — Princip linijskog skeniranja terena

vršini rezolucione ćelije. Sa slike 3 vidi se da se površina rezolucione ćelije menja sa uglom skeniranja.

Na slici 3 šematski je prikazana jedna traka na terenu sa dve pravougaone rezolucione ćelije: rezoluciona ćelija u nadiru površine $4a_0b_0$ i rezoluciona ćelija, za ugao Θ i koso rastojanje R od prijemne optike, površine $4ab$. Sa slike se vidi da su širina i dužina rezolucione ćelije u nadiru jednake ($2a_0 = 2b_0$), jer je, po pravilu, $\alpha_0 = \beta_0$.

Promene dimenzija rezolucione ćelije sa uglom skeniranja, sa slike 3, date su izrazima [2]:

$$\begin{aligned} 2a &\approx H\alpha_0 \sec\Theta = 2a_0 \sec\Theta \\ 2b &= \beta_0 H \sec^2\Theta = 2b_0 \sec^2\Theta \end{aligned} \quad (13)$$

Optomehanički skener preslikava tačke sa rezolucione ćelije na terenu (x,y) u tačku na slici (X,Θ) . Iz geometrije na slici 3 transformacija koordinata data je izrazima [2]:

$$\begin{aligned} x &= X + (Htg\alpha_0/\cos\Theta) \approx X + H\alpha_0 \sec\Theta \\ y &= Htg(\Theta + \beta_0) \approx Htg\Theta + H\beta_0 \sec^2\Theta \end{aligned} \quad (14)$$

Iz izraza (14) vidi se da preslikavanje ravni objekta (x,y) u ravan slike (X,Θ) nije linearno. Ravan slike je zamišljena ravan sa osama (X,Θ) koje formiraju pravac leta i ugao skeniranja. Zbog povećanja površine rezolucione ćelije sa uglom skeniranja dolazi do smanjenja fizičkih dimenzija objekata na slici, a zbog nelinearnog preslikavanja po zakonu $\arctan(y/H)$ do deformacije objekata i smanjenja prostorne rezolucije sa povećanjem ugla skeniranja [2].

U ovom modelu ne razmatraju se uticaji neravnina na terenu, zakrivljenost Zemlje i promene parametara leta vazduhoplova (Ojlerovi uglovi).

Neskanirajući senzori

Ovi senzori rade na principu preslikavanja ravni terena u ravan detektora nepokretnim optičkim sistemom. Dakle, optika istovremeno preslikava

teren ograničen vidnim poljem na film ili fotodetektor senzora. Mehanizam preslikavanja šematski je prikazan na slici 4.

Sl. 4 — Preslikavanje površine terena na površinu filma ili detektora

Sa slike 4 vidi se da se površina terena širine X_0 i dužine Y_0 preslikava na površinu filma ili detektora širine ξ_0 i dužine η_0 . Iz geometrijske optike je poznato da je:

$$(X_0 Y_0) / (\xi_0 \eta_0) = H^2 / F^2 \quad (15)$$

gde je:

H — visina leta,

F — efektivna fokusna dužina optike.

Relacija (18) pokazuje da se površina na terenu, koja se preslikava, povećava sa kvadratom visine leta (visine snimanja), ako je fokusna dužina kon-

stantna. Dakle, sa povećanjem visine leta smanjuje se dimenzija objekta i prostorna rezolucija na slici. Da bi se ovi nedostaci ublažili koriste se optički sistemi sa promenljivom fokusnom dužinom.

Kada se radi o kosom snimanju javljaju se efekti preslikavanja koji su već objašnjeni. Razlika je u tome što se kod ovih senzora kompletna slika formira za jedan ugao, a kod senzora sa optomehaničkim skeniranjem ugao se menja od tačke do tačke na liniji slike.

DETEKTORI

Detekcija zračenja prikupljenog prijemnom optikom senzora vrši se pomoću filma ili fotodetektora. Osetljivost pri detekciji, u oba slučaja, zavisi od talasne dužine incidentnog zračenja.

Efektivna vrednost napona V na izlazu detektora proporcionalna je efektivnoj vrednosti incidentne snage na osetljivoj površini detektora i faktoru konverzije detektora. Ukupan napon na izlazu detektora sastoji se od korisnog signala i šuma:

$$V = \int_{\lambda} \Phi_{\lambda} \mathcal{R}_{\lambda} d\lambda = V_s + V_n \quad (16)$$

gde je:

Φ_{λ} — spektralna incidentna snaga zračenja,

$\mathcal{R}_{\lambda}$ — spektralna osetljivost detektora.

Efektivna vrednost napona V_s odgovara efektivnoj incidentnoj snazi zračenja, a efektivna vrednost napona šuma V_n je sopstveni šum detektora kada ne postoji incidentno zračenje.

Odnos signal-šum na izlazu detektora, prema [9], iznosi:

$$\frac{S}{N} = \frac{V_s}{V_n} = \frac{\Phi}{NEP} \quad (17)$$

gde je:

NEP — ekvivalentna snaga šuma.

Treba napomenuti da su u relaciji (17) dati odnosi optičkih snaga, a napon na izlazu detektora proporcionalan je optičkoj snazi, dok je električna snaga na jediničnom otporniku proporcionalna srednjekvadratnoj vrednosti napona. Ako se uvede smena $D_{\lambda} = 1/NEP_{\lambda}$ i $D^*_{\lambda} = D_{\lambda} (A_d B)^{0.5}$ prethodna relacija može se napisati u integralnom obliku:

$$\frac{S}{N} = \frac{\int_{\lambda} \Phi_{\lambda} D^*_{\lambda} d\lambda}{(A_d B)^{1/2}} \quad (18)$$

gde je:

A_d — osetljiva površina detektora,

B — potrebni frekvencijski opseg signala na izlazu detektora,

D^*_{λ} — specifična spektralna detektabilnost fotodetektora.

Površina detektora A_d , prostorni vidni ugao senzora Ω i efektivna fokusna dužina optike (F) povezani su relacijom $\Omega = A_d/F^2$, a potreban frekvencijski opseg signala određuje se na osnovu vremena zadržavanja detektora na rezolucionalnoj ćeliji.

Sređivanjem relacije (18), i pod pretpostavkom da je izvršena integracija u talasnom području od λ_1 do λ_2 , odnos signal-šum za optoelektronske senzore je:

$$\frac{S}{N} = \frac{k_0 A_0 L_e \Omega D^*}{(A_d B)^{1/2}} \quad (19)$$

gde je ekvivalentna radijansa $L_e = \tau(L_1 + L_2) + L_3$, a incidentna snaga zračenja na detektoru $\Phi = k_0 A_0 L_e \Omega$.

Za analizu signala slike od interesa je promena odnosa signal-šum na izlazu detektora u funkciji promene pojedinih komponenata ekvivalentne radijanse: sopstvene radijanse L_1 , reflektovane radijanse L_2 , radijanse atmosfere L_3 i transmitivnosti atmosfere τ .

PRIKAZIVANJE SLIKA

Model elektronskog prikazivača sličan je modelu datom u [14]. Nivo sivog piksela na slici određuje se na osnovu relacije:

$$I = KV + I_{\text{offs}} \quad (20)$$

gde je:

V — zbir korisnog signala i šuma na izlazu detektora ($V = V_s + V_n$),

K — pojačanje sistema,

I_{offs} — srednji nivo sivog bez prisustva signala na ulazu elektronskog prikazivača.

Slike terena za vojne potrebe, po pravilu, jesu monohromatske, a vizuelni kontrast je posledica promene nivoa osvetljaja od tačke do tačke na ekranu ili fotografiji. Prema podacima u [15] vizuelni sistem čoveka je adaptibilan na intenzitet svetlosti. Subjektivni osvetljaj je logaritamska funkcija intenziteta svetlosti koju prima oko. Najmanja promena osvetljaja, koju oko može zapaziti, zavisi od apsolutnog osvetljaja. Ovaj odnos je približno konstantan za široki dijapazon osvetljaja, a poznat je kao Veberov zakon. To znači da za veći osvetljaj oko zahteva veći priraštaj osvetljaja. Prag kontrasta zavisi od površine mozaika i vremena posmatranja slike [16]. Pored kontrasta značajna karakteristika oka je moć razlaganja, odnosno moć uočavanja sitnih detalja na slici. Na moć razlaganja, osim kontrasta, utiče dinamika slike i adaptacija oka [16].

Za analizu slika koristi se relativni odnos $\Delta I/I$, gde je I — srednji nivo sivog, a ΔI — razlika nivoa sivog posmatrane tačke u odnosu na srednji nivo sivog. Relativna promena nivoa sivog na slikama može se dovesti u vezu sa relativnom promenom ekvivalentne radijanse terena, usled promene temperature, emisivnosti i refleksivnosti terena. Na primer, relativna promena temperature na terenu $\Delta T/T$ ima za posledicu relativnu promenu radijanse. Pošto relativna promena radijanse do-

vodi do relativne promene napona na izlazu detektora, relativna promena nivoa sivog na termalnoj slici zavisi od relativne promene temperature na terenu.

Primena modela za generisanje slika terena

Jedna od primena datog matematičkog modela za formiranje slike terena optoelektronskim senzorom jeste generisanje slika terena na računaru i analiza uticaja različitih parametara na formiranje slike terena [17].

Postupak za primenu modela sadrži sledeće korake [17]:

a) zada se osnova terena proizvoljnog oblika i podeli na proizvoljan broj elementarnih površina, a svakoj elementarnoj površini dodele se radijanse osnove terena;

b) zada se oblik i dimenzija objekta, podeli se na proizvoljan broj elementarnih površina, a svakoj elementarnoj površini dodele se radijanse objekta;

c) konture objekta postave se na osnovu terena, odredi se ekvivalentna radijansa tako formiranog terena i korelaciono rastojanje ekvivalentne radijanse terena;

d) definišu se parametri atmosfere i računaju transmitivnost i radijansa atmosfere;

e) izabere se optoelektronski senzor, odredi se modulaciona transfer funkcija senzora [17] i zadaju karakteristike detektora;

f) izračuna se napon na izlazu detektora, odnosno nivo sivog na crno-beloj slici terena za svaku rezoluciju ćeliju na terenu.

TERMALNE SLIKE TERENA GENERISANE NA RAČUNARU

Kao primer primene uprošćenog matematičkog modela i računarskog modela [18] na računaru su generisane termalne slike kvaziprirodnog terena.

Izabrano je spektralno područje od 8 do 14 μm , jer se može zanemariti komponenta radijanse terena $L_{\lambda 2}$, koja predstavlja spektralnu radijansu usled refleksije zračenja Sunca i neba od površine terena. Teren je predstavljen kao ravna površina na kojoj su postav-

(a)

(b)

Sl. 5 — Termalne slike terena

a) $\Theta = 0^\circ \pm 2,75^\circ$; b) $\Theta = 70^\circ \pm 2,75^\circ$

ljeni usamljeni objekti. Površina na kojoj su postavljeni objekti (pozadina) kvadratnog je oblika, dimenzija 64x64 rezolucione ćelije senzora u nadiru ($\alpha_0 H = 1 \text{ m}$). Srednja vrednost temperature pozadine je 300 K, a njena standardna devijacija 3K. Objekti su predstavljeni toplim jednakim pločama, dimenzija 12x12 rezolucioni ćelija u nadiru. Srednja vrednost temperature ploča je 310 K, a njena standardna devijacija 1,5 K. Emisivnosti pozadine i ploča su konstantne. Korelaciono rastojanje temperature terena jednako je dužini dve rezolucione ćelije u nadiru.

Na slici 5 prikazane su dve termalne slike terena: u nadiru ili pri vertikalnom snimanju i pod uglom od oko 70° bočno u odnosu na pravac leta [2].

Na slici 5 prikazane su geometrijske deformacije objekata i smanjenje prostorne rezolucije sa povećanjem kosog snimanja ili ugla skeniranja. Na slici 5a jasno se vide fluktuacije temperature na ploči i pozadini a dimenzije ploče su realne. Na slici 5b prikazano je 10 perioda osnovnog terena, jer se vidi 10 toplih ploča. Jasno se vide geometrijska izobličenja ploča, gubitak finih detalja i znatno smanjen kontrast u odnosu na sliku 5a. Do smanjenja samo jedne dimenzije na slici došlo je zbog efekata linijskog skeniranja [2, 17].

Zaključak

Teoretske osnove i uprošćen matematički model za formiranje slike terena optoelektronskim senzorima pokazuju da je proces formiranja slike terena veoma složen i da zavisi od vrste terena, vremenskih i atmosferskih uslova i mogućnosti senzora. Zbog toga se za vojne potrebe istovremeno koriste različiti optoelektronski senzori. Iz prikazanog modela sledi da se optimalne slike terena dobijaju fotografskim i televizijskim kamerama, u toku sunčanog dana i pri dobroj optičkoj vid-

ljivosti, a termovizijskim kamerama u toku noći. Senzori termalne slike imaju prednost pri formiranju slike maskiranih i zadimljenih (za vidljivi opseg) objekata, ali imaju manji kontrast. Laserski senzori formiraju slike sa najboljom prostornom rezolucijom, ali zahtevaju lasersko zračenje, pa se mogu otkriti i ometati.

Primer primene modela pokazuje da je on pogodan za generisanje slika različitih terena, za različite uslove prostiranja u atmosferi i različite vrste senzora, što omogućava analizu uticaja pojedinih parametara na formiranje slike terena optoelektronskim senzorima, a može se dopuniti u zavisnosti od namene.

Literatura:

- [1] Richer, R.: Infrared Simulation Model SEN-SAT-2, DFVLR-FB 87-10, Institut für Optoelektronik, Oberpfaffenhofen, 1987.
- [2] Barbarić, Ž.: Prilog metodama za analizu i obradu signala termalne slike formirane linijskim skeniranjem, Doktorska disertacija, ETF-Beograd, 1991.
- [3] Ben-Yosef, N., Wilner, K., Abitbol, M.: Measurement and modeling of natural desert terrain in the infrared, *Optical Engineering*, Vol. 27, No. 11, 1988.
- [4] Wilf, I., Manor, Y.: Simulation of sea surface images in the infrared, *Applied Optics* Vol. 23, No 18, 15. september 1984., 3174-3180.
- [5] Ben-Yosef, N., Wilner, K., Fuchs, I., Simhony, S., Abitbol, M.: Natural terrain infrared radiance statistics: daily variation, *Optical Society of America*, Vol. 24, No. 23/AP, decembar 1985., 4167-4171.
- [6] Ben-Yosef, N., Wilner, K., Simhony, S., Abitbol, M.: Correlation length of natural terrain infrared images: daily variation, *Applied optics*, Vol. 25, No. 6, 15. mart 1986., 866-869.
- [7] Cogen, J. L.: Remote sensing of surface and near surface temperature from remotely piloted aircraft, *Applied optics*, Vol. 24, No. 7, 1985., 1030-1036.
- [8] Swain, P. H., Davis, S. M.: *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, McGraw-Hill, Inc, 1978.
- [9] Wolfe, W. L., Zissis, G. J.: *The Infrared Handbook*, Washington, Office of Naval Research, Department of the Navy, 1978.
- [10] Gaussorgues, G.: *La thermographie infrarouge*, Paris Codex 08. 1981.
- [11] Hudson, R.: *Infrared System Engineering*, J. Wiley and Sons, New York 1969.
- [12] Kneizys, F. X., Shettle, E. P., Galleri, W. O., Chetwynd, J. H., Abreu, L. W., Selby, J. E. A., Clough, S. A., Fenn, R. W.: *Atmospheric Transmittance/Radiance: Computer Code LOWTRAN 6*, Air Force Geophysics Laboratory, Massachusetts 01731, AFGL-TR-83-0187, februar 1984.
- [13] Johnson, R. B., Wolfe, W. L.: *Selected Papers on Infrared Design*, SPIE, Vol. 513, 1985.
- [14] Nandhakumar, N., Aggarwal, J. K.: *Integrated Analysis of Thermal and Visual Images for Scene Interpretation*, IEEE Transaction of pattern analysis and machine intelligence, Vol. 10, No. 4, July 1988., 469-480.
- [15] Gonzalez, R. C., Wintz, P.: *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Publishing Company, 1977.
- [16] Pratt, W. K.: *Digital Image Processing*, John Wiley and Sons, New York/Chichester/Bristbane/Toronto, 1978.
- [17] Barbarić, Ž., Marinčević, A., Petrović, G., Milovanović, D.: Thermal-image generation by line-scanning technique: a new computer model, *Applied Optics*, Vol. 33, No. 14, May 1994., 2883-2889.
- [18] Marinčević, A., Barbarić, Ž., Petrović, G., Milovanović, D.: Computer generation of thermal images and analysis of line-scanning effects, *Facta Universitatis (Niš), Ser. Elec. Energ.* 7 (1994), 83-90.