Dr Slobodan Bursać,
pukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

IZRAČUNAVANJE EKVIVALENTNE SPEKTRALNE RADIJANSE LETELICE

UDC: 629.7.01:537.872.001.575

Rezime:

U radu je prikazan matematički model za izračunavanje ekvivalentne spektralne radijanse letelice. Letelica predstavlja izuzetno složen izvor infracrvenog zračenja. U svim režimima leta karakteristična je velika koncentracija aktivne snage motora, praćena neprekidnom emisijom IC zračenja. Osim toga, pri letu velikim brzinama, usled aerodinamičkog trenja vazdušne struje, dolazi do znatnog zagrevanja obloge letelice, čije zračenje, takođe, spada u IC područje i bitno utiče na stanje termalne slike. Posebno su razmatrane emitovane i reflektovane spektralne radijanse elementarnih površina letelice.

Ključne reči: infracrveno zračenje letelice, spektralna radijansa, ekvivalentna spektralna radijansa, termalna slika letelice.

CALCULATION OF THE EQUIVALENT SPECTRAL AIRCRAFT RADIANCY

Summary:

A mathematical model for the calculation of the equivalent spectral aircraft radiancy is presented. An aircraft is an extremely complex infrared radiation source. All flight modes are characterized by a high concentration of engine active power followed by constant emission of infrared radiation. Besides, at high speeds, aerodynamic friction provokes significant heating of aircraft covering; its radiation also belongs to infrared area and influences considerably thermal imagery state. Emitted and reflected radiances of primary aircraft surfaces are treated separately.

Key words: aircraft infrared radiation, spectral radiancy, equivalent spectral radiancy, aircraft thermal imagery.

Uvod

Proces formiranja termalne slike letelice veoma je kompleksan zbog razmene toplote između delova letelice, razmene energije između letelice i okoline i uticaja atmosfere na prenos elektromagnetne energije od letelice do detektora [1].

Za sistem praćenja letelica predstavlja pokretni cilj koji se nalazi u

atmosfera i istovremeno predstavlja medijum za prenos energije od letelice do sistema za praćenje.

Na slici 1 prikazana je letelica u letu i procesi koji nastaju pri formiranju termalne slike letelice. To su, pored sopstvenog zračenja letelice, komponente zračenja Sunca, neba i površine Zemlje reflektovane od letelice. U detektor, takođe, dospeva zračenje i drugih objekata. Na primer, zračenje oblaka, koji se nalaze u njegovom vid-

nom polju, sopstveno zračenje atmosfere i zračenja koja se nakon rasejanja na molekulima atmosfere i aerosola usmeravaju ka detektoru. Pri prolasku kroz atmosferu, na svom putu ka detektoru, zračenja slabe, usled apsorpcije i rasejanja u atmosferi. Avion u letu predstavlja složeni izvor zračenja u infracrvenom delu spektra.

U opštem slučaju, infracrveno zračenje (IC zračenje) potiče od dva fizička procesa, i to:

— termalnog zračenja zagrejanih površina i elemenata strukture aviona, koji se može dobro opisati modelom zračenja sivog tela,

— zračenja gasova, koji potiču od vrelih produkata sagorevanja iz reaktivnog motora.

Ovaj proces se ne može kvalitetno opisati jednostavnim matematičkim

modelom. Tako se analize te vrste zračenja, uglavnom, zasnivaju na eksperimentalno dobijenim podacima.

U ovom delu analize posmatra se samo avion kao izvor IC zračenja, kako bi se dobili kvantitativni podaci o temperaturama, talasnim dužinama i izračenoj energiji koja će se kasnije upotrebiti za interpretaciju eksperimentalno dobijenih podataka u uslovima prostiranja kroz atmosferu.

Ekvivalentna spektralna radijansa na mestu letelice

Ako se pretpostavi da ne postoji zračenje Sunca, ekvivalentna spektralna radijansa na mestu letelice je:

$$L_{\lambda}^e = L_{\lambda}^l + L_{\lambda}^g + L_{\lambda}^n \quad (1)$$

Sl. 1 — Parametri koji utiču na formiranje termalnog odraza letelice

gde su:

- L_{λ}^e — ekvivalentna spektralna radijansa na mestu letelice,
- L_{λ}^1 — spektralna radijansa emitovana sa površine letelice,
- L_{λ}^g — spektralna radijansa površine Zemlje reflektovana od površine letelice,
- L_{λ}^n — spektralna radijansa neba reflektovana od površine letelice.

Ekvivalentna spektralna radijansa na udaljenosti R od letelice je:

$$L_{\lambda R}^e = \tau_{\lambda}(R) L_{\lambda}^e + L_{\lambda}^a \quad (2)$$

gde je:

- $\tau_{\lambda}(R)$ — transmitivnost atmosfere u funkciji rastojanja R ,
- L_{λ}^a — spektralna radijansa atmosfere.

Snaga koja pada na površinu prijemne optike u jediničnom opsegu talasnih dužina iznosi [2]:

$$\Phi_{\lambda} = \iint_{A_1 A_2} L_{\lambda R}^e d^2F \quad (3)$$

gde je:

- d^2F — faktor konfiguracije [3]. Faktor konfiguracije između elementarnih površina letelice dA_1 i prijemne optike dA_2 :

$$d^2F = \frac{dA_1 \cos \Theta_1 dA_2 \cos \Theta_2}{R^2} \quad (4)$$

gde je:

- Θ_1 i Θ_2 — uglovi između pravca rastojanja R i normala elementarnih površina dA_1 i dA_2 , respektivno kao što je prikazano na slici 2.

Ako se pretpostavi da se površina prijemne optike ne menja i da je $\Theta_2 = 0$ dobija se iz (3) i (4) izraz:

$$\Phi_{\lambda} = A_0 \int_{A_1} L_{\lambda R}^e \frac{dA_1 \cos \Theta_1}{R^2} \quad (5)$$

gde je:

- A_0 — ukupna površina prijemne optike. U relaciji $\frac{dA_1 \cos \Theta_1}{R^2}$

predstavlja elementarni prostorni ugao pod kojim se vidi elementarna površina dA_1 , pa se izraz iz (5) može napisati u obliku:

$$\Phi_{\lambda} = A_0 \int_{\Omega_D} L_{\lambda R}^e d\Omega, \quad (6)$$

Sl. 2 — Šematski prikaz faktora konfiguracije

gde je:

- Ω_D — prostorni ugao detektora.

Napon na izlazu detektora može se izraziti prema [2]:

$$V = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} \left[A_0 \int_{\Omega_D} L_{\lambda R}^e d\Omega \right] d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda \quad (7)$$

gde je:

- λ_1 — λ_2 — opseg talasnih dužina u kojem radi detektor,
- R_{λ} — spektralna osetljivost detektora.

Spektralna osetljivost detektora definiše se kao [5]:

$$R_{\lambda} = \frac{D_{\lambda}^* V_n}{\sqrt{A_d B}} \quad (8)$$

gde je:

D_{λ}^* — spektralna detektivnost detektora,

V_n — napon šuma detektora,

A_d — efektivna površina detektora,

B — propusni opseg detektora.

Spektralna radijansa letelice

Modeliranje spektralne radijanse letelice u osnovi je modeliranje temperature i emisivnosti površine letelice.

Kako je ranije pokazano, letelica zrači kao složeni izvor, jer zrače aerodinamičke površine, topli delovi motora i mlaz izduvnih gasova. Drugim rečima, radijansa letelice se u svakoj tački može predstaviti kao funkcija emisivnosti i temperature:

$$L_{\lambda i,j}^1 = F(\varepsilon_{i,j}, T_{i,j})$$

gde su:

i, j — koordinate elementarnih površina na letelici.

Ako je letelica sivi difuzni radiator, važi:

$$L_{\lambda i,j}^1 = \frac{\varepsilon_{i,j} C_1'}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_{i,j}}\right) - 1 \right]} \quad (9)$$

gde je:

$$C_1' = C_1 / \pi = 1,19096 \cdot 10^8 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^4 \text{ sr}^{-1},$$

$$C_2 = 1,43881 \cdot 10^4 \text{ K} \cdot \mu\text{m}.$$

Drugim rečima, površina letelice može se podeliti na elementarne površine i svaka definisati srednjom vred-

nosti temperature $T_{i,j}$ i ukupne emisivnosti $\varepsilon_{i,j}$. Poznato je da $\varepsilon_{i,j}$ zavisi od temperature i talasne dužine.

Reflektovane spektralne radijanse

Reflektovane spektralne radijanse L_{λ}^g i L_{λ}^n površine Zemlje i neba, od površine letelice mogu se odrediti na osnovu faktora konfiguracije između površine letelice i površine Zemlje i neba, respektivno.

Spektralna radijansa površine Zemlje, kao difuznog radijatora, data je relacijom:

$$L_{\lambda g} = \frac{C_1'}{\lambda^5} \cdot \frac{\varepsilon_{\lambda g}}{\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_g}\right) - 1 \right]} \quad (10)$$

gde je:

$\varepsilon_{\lambda g}$ — spektralna emisivnost površine Zemlje,

T_g — temperatura površine Zemlje.

U relaciji (10) emisivnost, temperatura, pa i spektralna radijansa jesu funkcije koordinata na Zemlji. Pored toga, to su statičke slučajne veličine, koje zavise od godišnjeg doba, doba dana, sastava tla i vegetacije [6].

Reflektovana spektralna radijansa od površine letelice, koja potiče od površine Zemlje L_{λ}^g data je relacijom [4]:

$$L_{\lambda}^g = \frac{E_{\lambda}^g}{\pi} \cdot \rho_{\lambda} \quad (11)$$

gde je:

E_{λ}^g — spektralna iradijansa na površini letelice, koja potiče od površine Zemlje,

ρ_{λ} — spektralna refleksivnost letelice.

Spektralna iradijansa E_{λ}^g na površini letelice može se odrediti kao:

$$E_{\lambda}^g = \frac{\Phi_{\lambda}^g}{A} \quad (12)$$

gde je:

Φ_{λ}^g — snaga zračenja Zemlje koja pada na površinu letelice,
 A — površina letelice.

Na osnovu relacije (3), (4) i slike 2 određuje se snaga Φ_{λ}^g

Za jednu proizvoljnu elementarnu površinu na letelici $A_{i,j}$, reflektovana spektralna radijansa $L_{\lambda i,j}^g$ dobija se prema izloženom postupku:

$$\Phi_{\lambda i,j}^g = \int_{\Lambda_g} \int_{A_{i,j}} L_{\lambda g} \cdot \tau_{\lambda}(H) \cdot \frac{dA_g \cos \Theta_g dA_{i,j} \cos \Theta_{i,j}}{H^2} \quad (13)$$

gde je:

$\tau_{\lambda}(H)$ — spektralna transmitivnost atmosfere na rastojanju H od površine Zemlje do elementarne površine letelice.

Elementarne površine na letelici su konstantne, pa je spektralna iradijansa na površini $A_{i,j}$ data relacijom:

$$E_{\lambda i,j}^g = \frac{\Phi_{\lambda i,j}^g}{A_{i,j}} = \int_{\Lambda_g} L_{\lambda g} \tau_{\lambda}(H) \cdot \frac{\cos \Theta_g}{H^2} \cdot dA_g \quad (14)$$

Na osnovu relacije (11) dobija se reflektovana spektralna radijansa sa elementarne površine letelice $A_{i,j}$, koja potiče od površine Zemlje.

$$L_{\lambda i,j}^g = \int_{\Lambda_g} L_{\lambda g} \tau_{\lambda}(H) \cdot \rho_{\lambda i,j} \cdot \frac{dA_g \cos \Theta_g}{\pi H^2} \quad (15)$$

Za konstantnu vrednost $L_{\lambda g}$ i za površinu na Zemlji koja se vidi sa elementarne površine letelice $A_{i,j}$ dobija se:

$$L_{\lambda i,j}^g = L_{\lambda g} \cdot \tau_{\lambda}(H) \cdot \rho_{\lambda i,j} \cdot \frac{\Omega_{gi,j}}{\pi} \quad (16)$$

gde je:

$\Omega_{gi,j}$ — prostorni vidni ugao elementarne površine $A_{i,j}$, pod kojim se vidi površina A_g na Zemlji.

Konačni izraz za reflektovanu spektralnu radijansu elementarne površine $A_{i,j}$ je istog oblika kao u literaturi [7] i dat je relacijom:

$$L_{\lambda i,j}^g = L_{\lambda g} \cdot \tau_{\lambda}(H) \cdot (1 - \varepsilon_{\lambda i,j}) \cdot (V_{g-1})_{i,j} \quad (17)$$

gde je:

$(V_{g-1})_{i,j} = \frac{\Omega_{gi,j}}{\pi}$ — faktor koji uzima u obzir šta se vidi sa elementarne površine letelice na površini Zemlje.

U relaciji (17) iskorištena je činjenica da je površina letelice od metala, pa je spektralna refleksivnost elementarne površine $\rho_{\lambda i,j} = 1 - \varepsilon_{\lambda i,j}$.

Analognim postupkom određuje se spektralna radijansa neba reflektovana od površine letelice.

$$L_{\lambda i,j}^g = \frac{C_1'}{\lambda^5} \cdot \frac{\varepsilon_{\lambda n}}{\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_n}\right) - 1 \right]} \cdot \rho_{\lambda i,j} \cdot \tau_{\lambda}(d) \cdot (V_{n-1})_{i,j} \quad (18)$$

gde je:

$\varepsilon_{\lambda n}$ — spektralna emisivnost neba,
 T_n — srednja vrednost temperature neba,

- $\tau_\lambda(d)$ — spektralna transmittivnost u funkciji daljine (d) od neba do letelice,
 $(V_{n-1})_{i,j}$ — faktor koji uzima u obzir odnos elementarne površine letelice i površine neba.

$$(V_{n-1})_{i,j} = \frac{\Omega_{ni,j}}{\pi} \quad (19)$$

gde je:

- $\Omega_{ni,j}$ — prostorni vidni ugao elementarne površine $A_{i,j}$ pod kojim se vidi površina A_n na nebu.

Spektralna radijansa atmosfere

Atmosfera kao prenosni medijum, ekvivalentne spektralne radijanse L_λ^e na mestu letelice, selektivno slabi, odnosno selektivno transmituje zračenje $\tau_\lambda < 1$ i istovremeno zrači L_λ^a . Transmittivnost atmosfere je statička veličina, ali se dosta dobro opisuje deterministički, [9]:

$$\tau_\lambda = 1 - \sigma(\lambda) \cdot R \quad (20)$$

gde je:

- $\sigma(\lambda)$ — ukupno podužno slabljenje u jediničnom opsegu talasnih dužina, zbog apsorpcije i rasejanja zračenja,
 R — rastojanje od letelice do detektora.

Spektralna radijansa atmosfere može se aproksimirati relacijom [8].

$$L_\lambda^a = \frac{(1 - \tau_a) C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_a}\right) - 1 \right]} \quad (21)$$

gde je:

$$1 - \tau_\lambda = \varepsilon_\lambda \text{ za } \rho_\lambda \approx 0,$$

T_a — srednja vrednost temperature vazduha.

Zaključak

Proces formiranja termalne slike letelice u prostoru veoma je komplikovan. Avion u letu predstavlja izuzetno složen izvor zračenja u IC delu spektra.

Termalno zračenje zavisi od tipa letelice, režima rada, parametara leta, tehnologije konstrukcije i vrste materijala. Pored toga, bitan uticaj imaju i ostali parametri dati na slici 1, a posebno je izražen uticaj atmosfere na prostiranje optičkog zračenja.

Letelica je nepravilnog oblika pa se njeni pojedini delovi različito zagrevaju u letu, tako da se pri formiranju termalne slike moralo poći od modela elementarnih površina proizvoljne orijentacije i različitih temperatura ($dA_{i,j}$; $T_{i,j}$), gde su i,j koordinate elementarnih površina na letelici.

Da bi se izračunala elementarna spektralna radijansa na mestu letelice mora se izračunati spektralna radijansa koja potiče sa površine same letelice, spektralna radijansa površine Zemlje reflektovana od površine letelice i spektralna radijansa koja potiče od neba, a reflektuje se od površine letelice. Podatak o ekvivalentnoj spektralnoj radijansi letelice neophodan je da bi se mogla izračunati ukupna iradijansa na mestu detektora termovizijskog sistema.

Literatura:

- [1] Electro-Optical Research Company: Quantification of atmospheric constituents and parameter measurements, Report No EOR-166-75-F prepared for US Army, Night Vision Laboratory, 1975.
- [2] Barbarić, Ž., Marinčić, A., Petrović, G., Milovanović, D.: Thermal-image generation by line-scanning technique: a new computer model, *Applied Optics*, Vol. 33, No 14, 1994.
- [3] Bursać, S.: Analiza primene optoelektronskih sredstava na nišanske uređaje sa posebnim osvrtom na korišćenje termovizijskih sistema, Magistarski rad, ETF Beograd, 1991.
- [4] Gaussorgues, G.: *La thermographie infrarouge*, Prevod sa francuskog na ruski, Mir, Moskva, 1988.
- [5] Hudson, R. D.: *Infrared system engineering*, J Wiley and Sons, New York, 1969.
- [6] Barbarić, Ž.: Prilog metodama za analizu i obradu signala termalne slike formirane linijskim skeniranjem, Doktorska disertacija, ETF Beograd, 1994.
- [7] Davies, P. A. W., Phillips, P. L., Seovle, S. D.: Measurement of aircraft detectability by using simulated infra red (IR) surveillance Equipment, *SPIE Vol. 807, Passive infrared Systems and Tehnology*, pp 73—78, 1987.
- [8] Goedecke, GH, New Mexico State University: The use of simple observables to predict extinction coefficients of atmospheric aerosols, Report prepared for Army Research Office-Durhan, 1975.
- [9] Bursać, S., Sarić, S.: Modernizacija nišanskih sredstava PVO, SSNO, Izveštaj 144—122, Beograd, 1989.
- [10] Bursać, S.: Istraživanje termalnog odraza letelice, Doktorska disertacija, VTA, Beograd, 1995.