

Klasifikacija termalnih infracrvenih snimaka iz zraka

Vrabec, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:519965>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -
Institutional Repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Mislav Vrabec

KLASIFIKACIJA TERMALNIH INFRACRVENIH SNIMAKA IZ ZRAKA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2020.

Zagreb, 25. studenoga 2020.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**
Predmet: **Zrakoplovno izviđanje i nadzor**

DIPLOMSKI ZADATAK br. 6051

Pristupnik: **Mislav Vrabec (0007173967)**
Studij: **Aeronautika**

Zadatak: **Klasifikacija termalnih infracrvenih snimaka iz zraka**

Opis zadatka:

Objasniti svojstva termalnog infracrvenog zračenja, fizikalne zakone te interakciju sa atmosferom i površinama. Definirati karakteristike termalnih infracrvenih snimaka. Analizirati svojstva nadzirane i nenadzirane klasifikacije. Izraditi programski kod za klasifikaciju termalnih infracrvenih snimaka. Analizirati rezultate dobivene primjenom programskog koda i procijeniti točnost klasifikacije.

Zadatak uručen pristupniku: 10. studenoga 2020.
Rok za predaju rada: 25. studenoga 2020.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:

doc. dr. sc. Jurica Ivošević

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

KLASIFIKACIJA TERMALNIH INFRACRVENIH SNIMAKA IZ ZRAKA
AERIAL THERMAL IMAGES CLASSIFICATION

Mentor: doc. dr. sc. Jurica Ivošević

Student: Mislav Vrabec

JMBAG: 0007173967

Zagreb, prosinac 2020.

SAŽETAK

Zadatak ovog diplomskog rada opisati je primjenu Matlabovih alata u svrhu klasifikacije termalne dugovalne snimke. Konačan proizvod koji proizlazi iz klasifikacije, video je koji prikazuje označavanje objekata od interesa (pčela) u pokretu. U prvom dijelu rada dan je uvod u svojstva elektromagnetnog zračenja, elektromagnetnog spektra kao i fizikalnih zakona koje to zračenje prati u interakcijama sa atmosferom i ostalim fizikalnim površinama. Analizirano je infracrveno zračenje i njegovi koncepti. Nakon toga, dane su teorijske osnove digitalne klasifikacije snimaka, nadzirane i nenadzirane klasifikacije. U praktičnom dijelu rada razvijen je programski kod u programskom jeziku Matlab, analizirani su rezultati dobiveni njegovom primjenom te procijenjena točnost klasifikacije termalnih infracrvenih snimaka iz zraka.

KLJUČNE RIJEČI: daljinska istraživanja termalne infracrvene snimke, klasifikacija snimaka, Matlab, pčele

ABSTRACT

The task of this thesis is to describe the application of Matlab tools for the purpose of thermal images classification. The final product resulting from the classification, is a video that shows the labeling of objects of interest (bees) in motion. In the first part of the thesis, an introduction to the properties of electromagnetic radiation is given, as well as the electromagnetic spectrum with the physical laws it abides to in the interactions with the atmosphere and other physical surfaces. Infrared radiation and its concepts are analyzed. After that, the theoretical foundations of digital image classification, as well as supervised and unsupervised classifications are given. In the practical part of the thesis, the program code in the Matlab programming language was developed, the results obtained by its application were analyzed, and the accuracy of classification of aerial thermal infrared images was assessed.

KEY WORDS: remote sensing, thermal infrared images, images classification, Matlab, bees

SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Svojstva elektromagnetskog zračenja	2
2.1. Elektromagnetski spektar	3
2.2. Zakoni zračenja	8
2.2.1. Fotoelektrični efekt.....	9
2.2.2. Kirchhoffov zakon	10
2.2.3. Stefan- Boltzmannov zakon	11
2.2.4. Wienov zakon pomaka.....	12
2.3. Interakcije sa atmosferom.....	13
2.3.1. Raspršenje.....	15
2.3.2. Refrakcija	17
2.3.3. Apsorpcija	18
2.4. Interakcije sa površinama	19
3. Infracrveno zračenje	21
3.1. Koncepti Infracrvenog Zračenja	22
3.2. Toplinski parametri u analizi snimljene scene.....	24
4. Digitalna klasifikacija snimaka	27
4.1. Klase podataka	28
4.2. Nenadzirana klasifikacija	29
4.3. Nadzirana klasifikacija	31
4.3.1. Značajke trening uzoraka.....	32
4.3.2. Metode nadzirane klasifikacije	34
5. Klasifikacija infracrvene snimke.....	40
5.1. Opis rješenja zadatka.....	40
5.2. Točnost klasifikacije.....	44

6. Zaključak	48
Literatura	49
Popis slika	50
Popis tablica	51
Prilog: Matlab kod	52

1. Uvod

Svi objekti na Zemlji imaju temperature veću od 0 K (-273,15 °C) i kao takvi emitiraju termalnu energiju u obliku infracrvenog zračenja. To zračenje moguće je mjeriti i bilježiti korištenjem specijaliziranih senzora, što definira temelje termografije. Budući da je takvo zračenje otpornije na atmosferske uvjete i može se koristiti na scenama sa malo prirodnog svjetla, termografija predstavlja veliki potencijal koji može biti iskorišten u raznim znanstvenim područjima. Zračna termografija danas je sve korišteniji alat u velikom broju praktičnih primjena, od raznih vrsta inspekcija, dijagnostike i kontrole procesa u industriji sve do zadaća potrage ili nadzora. Na kraju, sama neobrađena snimka nije korisna bez kvalitetne slijedne analize i interpretacije, što je i središnja tema ovoga rada. Prije prelaska na klasifikaciju samih termalnih snimaka, u prvih nekoliko poglavlja, bit će predstavljen kratak pregled fundamentalnih zakona i tehnika kako iz područja elektromagnetizma, tako i samih daljinskih istraživanja i interpretacije snimaka.

Cilj istraživanja je analizirati termalnu snimku te odrediti mjerljive fizikalne parametre dobivene na temelju tih snimaka. Pritom, ključno je temeljito razumijevanje svojstava dugovalnog (termalnog) elektromagnetnog zračenja, emisivnosti, apsorpcije, transmisivnosti i reflektivnosti različitih prirodnih materijala. Ovakav pristup daje jedinstveni uvid u scenu, neovisan o dobu dana ili vremenskim uvjetima. Dugovalno (termalno) zračenje po svojim svojstvima puno je drugačije od onog u vizualnom spektru i ako ga se na ispravan način interpretira, može dati višestruko korisne podatke o promatranoj sceni.

Središnji zadatak rada biti će izvršen obradom dugovalnih (termalnih) snimaka koristeći Matlabove alate. Cilj je učitati videosnimke u programsko sučelje i što efektivnije i sa što više automatizma raspoznati objekte od interesa (u našem primjeru pčele) i odvojiti ih od scene praćenjem njihovog „termalnog potpisa“. Rezultati će biti vizualizirani grafički i tablično te ustanovljen potencijalni prostor za napredak na polju, u budućnosti.

2. Svojstva elektromagnetskog zračenja

Na početku bitno je otvoriti obradu ove teme sa fizikalnim principima na kojima se zasniva elektromagnetsko zračenje. Sva tijela, s izuzetkom onih temperature na apsolutnoj nuli, zrače. Ta ista tijela također i reflektiraju zračenje. Ako smo upoznati sa prirodom tog zračenja, emitiranog ili reflektiranog, kao i načina na koje međudjeluje sa Zemljinom atmosferom i drugim objektima, spremni smo valjano interpretirati informacije koje to zračenje prenosi.

Četiri diferencijalne jednačbe koje tvore osnovu elektromagnetske teorije generalno zovemo „Maxwellovim jednačbama“ [3].

U diferencijalnoj formi jednačbe izgledaju ovako:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.1 \text{ a))}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.1 \text{ b))}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1 \text{ c))}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} , \quad (2.1 \text{ d))}$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

E – Vektor električnog polja,

B – Vektor magnetskog polja,

J - Gustoća električne struje (tok električne struje po jedinici površine u jedinici vremena),

ρ – Gustoća električnog naboja (količina električnog naboja po jedinici vremena),

ϵ_0 - Dielektrična konstanta vakuuma (permitivnost),

μ_0 - Permeabilnost vakuuma,

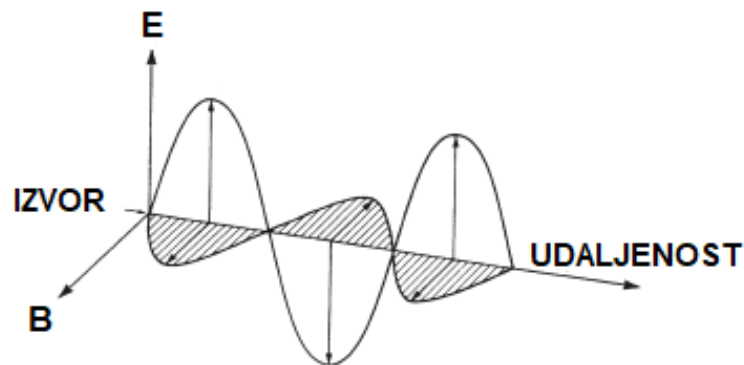
t – vrijeme.

Osnovni principi elektriciteta i magnetizma izneseni su krajem 19. stoljeća od strane škotskog matematičara Jamesa Clerka Maxwella.

Električno i magnetsko polje mogu postojati na mjestima gdje nema električnog naboja. Kada ta polja u nekoj točki u prostoru variraju s vremenom, tada se neka vrsta varijacije mora dogoditi u svakoj drugoj točki u prostoru u nekom drugom vremenu. Posljedično, promjene u poljima šire se kroz prostor. Takvo širenje poremećaja naziva se elektromagnetskim valom [3]. I bit će vizualizirano u nastavku.

2.1. Elektromagnetski spektar

Elektromagnetska energija generirana je iz više različitih mehanizama, od kojih su svi u nekoj mjeri zasnovani na ubrzavanju ili promjeni energije nabijenih čestica (uglavnom elektrona). Ove pojave uključuju radioaktivni raspad tvari, termalno gibanje atoma i molekula (zračenje kontinuiranog „crno-tjelesnog“ spektra), te na kraju gibanje električnog naboja u vodičima (antene) [1],[2].

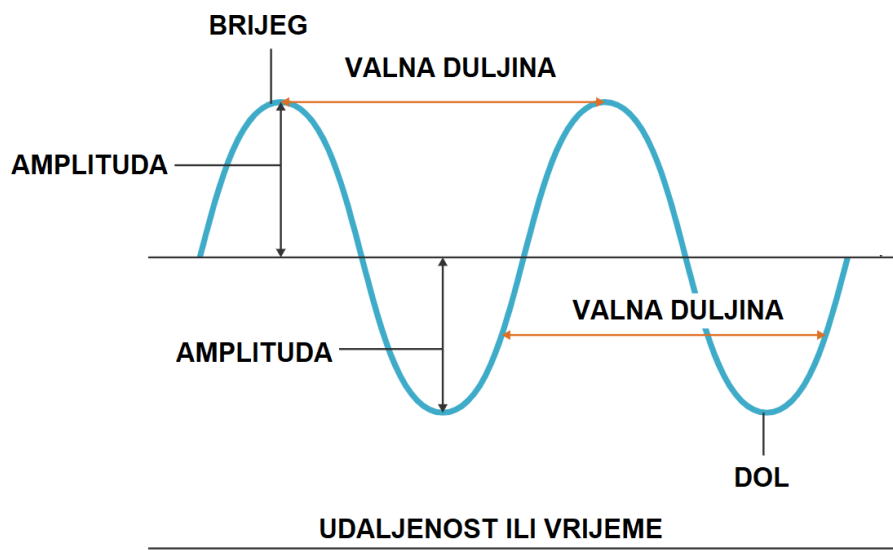


Slika 2.1. Polarizacija u elektromagnetskom valu [1]

Slika 2.1. ilustrira komponente elektromagnetskog vala, električnu (E) i magnetsku (B) [1]. Vidljivo je da je svo elektromagnetsko zračenje energija u širenju i može se smatrati valom. Sastoji se od nedjeljivih oscilirajućih električnog i magnetskog polja. Polja osciliraju tako da su uvijek okomita jedno na drugo, kao i na smjer širenja vala. Brzina

širenja konstantna je u vakuumu i prema Maxwelllovoj teoriji, jednaka je brzini svjetlosti ($c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$) [3].

Ovi valovi su transverzalni, u suprotnosti sa longitudinalnim ili kompresijskim. Orijentacija vektora električnog polja u ravnini okomitoj na smjer širenja vala, definira smjer polarizacije. Ovdje je ilustrirana linearna polarizacija – druge vrste polarizacije su moguće, ali teže za dočarati dvodimenzionalnim prikazom [2].



Slika 2.2. Obilježja elektromagnetskog vala, [4]

Prilikom opisivanja ovakvih valova koristimo nekoliko ključnih obilježja, koja su djelomično ilustrirana Slikom 2.2.

Valna duljina je udaljenost između dva susjedna brijega ili dola, tj. najmanja udaljenost između dvije čestice koje titraju u fazi. Obično se označava grčkim slovom lambda (λ). Jedan puni val ujedno predstavlja i jedan puni titraj čestice, a broj valova koji u sekundi prođu nekim mjestom se naziva frekvencijom tog vala. Spomenuta frekvencija mjeri se u hercima (Hz), jedinicama koje predstavljaju jedan ciklus u jedinici vremena. Amplituda može biti ilustrirana kao visina pojedinog brijega vala, što u prirodi odgovara razini energije ili intenziteta nekog vala. Predstavljena je kao razina energije vala po intervalu valne duljine. Dodatno, spomenuta je i faza vala. Faza je kutna mjera koja pokazuje koliko su pojedina dva brijega nekog vala poravnati. Ako su određena dva brijega poravnati, oni titraju zajedno i kažemo da su „u fazi“ (fazni pomak od 0°).

Ukoliko su, s druge strane, dva vala poravnata tako da se brijegovi jednog poklapaju s dolovima drugog, kažemo da su „izvan faze“ (fazni pomak od 180°) [1].

Kao što je ranije navedeno, brzina širenja elektromagnetske energije jednaka je brzini svjetlosti (c) i konstantna je u vakuumu. Frekvenciju (f) i valnu duljinu (λ) tada povezuje relacija:

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.2)$$

Stoga, obilježja elektromagnetne energije možemo iskazivati koristeći bilo frekvenciju, bilo valnu duljinu. Opređeljenje za jedan ili drugi način varira s obzirom na struku i primjenu. Iako službeni standard ne postoji, uvriježena praksa na polju daljinskih istraživanja je korištenje valne duljine kao mjere podjele elektromagnetskog spektra na interesne dijelove. Najčešće korištene jedinice za tu svrhu su mikrometar, milimetar i metar, kao jedinice duljine. Tablični pregled najčešće korištenih jedinica prikazan je u nastavku.

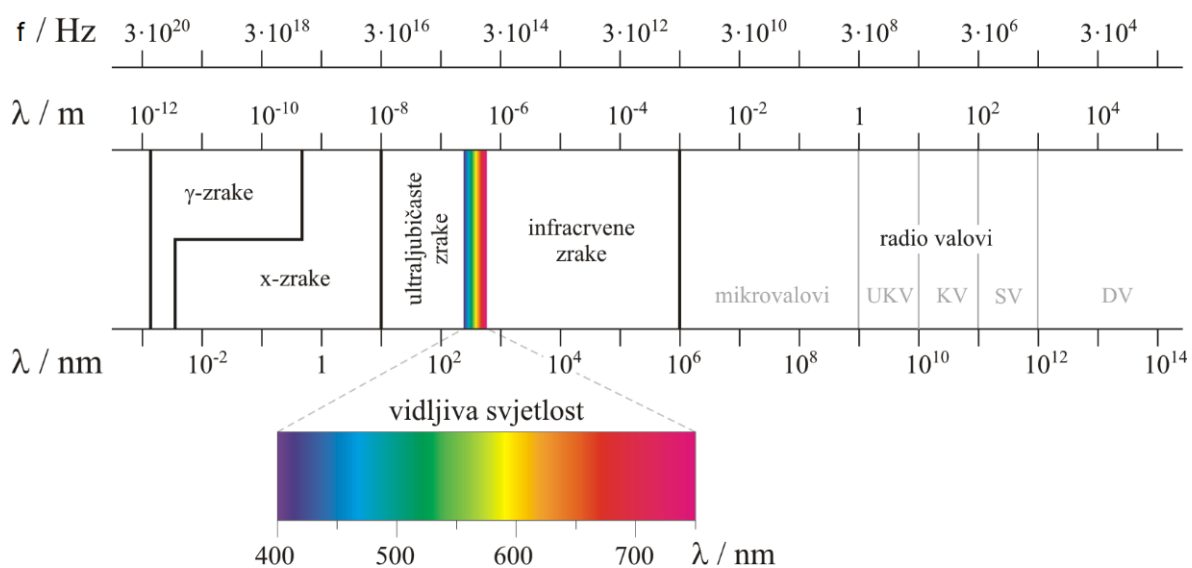
Tablica 2.1 Jedinice duljine na polju daljinskih istraživanja, [1]

Jedinica	Duljina	
Kilometar (km)	1,000 m	
Metar (m)	1,0 m	
Centimetar (cm)	0,01 m	= 10 ⁻² m
Milimetar (mm)	0,001 m	= 10 ⁻³ m
Mikrometar (μm)	0,000001 m	= 10 ⁻⁶ m
Nanometar (nm)		= 10 ⁻⁹ m
Angstrom (Å)		= 10 ⁻¹⁰ m

Tablica 2.2. Jedinice frekvencije na polju daljinskih istraživanja, [1]

Jedinica	Frekvencija	
Herc (Hz)	1	
Kiloherc (kHz)	10 ³	= 1,000
Megaherc (MHz)	10 ⁶	= 1,000,000
Gigaherc (GHz)	10 ⁹	= 1,000,000,000

Sada kada smo definirali mjerene jedinice koje ćemo koristiti, možemo definirati i generalnu podjelu spektra elektromagnetskog zračenja. Granice samog spektra u velikoj mjeri su dogovorene, u punom spektru solarne energije ne postoje stroge granice kako ih se grafički prikazuje. Podjele spektra definirane su radi jednostavnosti i po tradiciji korištenja u raznim znanstvenim disciplinama [1]. Spektar će biti prikazan grafički sa valnom duljinom i frekvencijom zračenja kao funkcijama podjele te kasnije i tablično sa spomenutim generalnim primjenama određenih dijelova spektra u daljinskim istraživanjima.



Slika 2.3. Spektar elektromagnetskog zračenja, izvor: [7]

Tablica 2.3. Područja spektra elektromagnetskog zračenja u daljinskim istraživanjima [3]

Dio Spektra	Valna Duljina	Opće Napomene
Gama Zrake	< 0,03 nm	Upadno zračenje u potpunosti apsorbirano u gornjim slojevima atmosfere i ne koristiti se za daljinska istraživanja.
X – Zrake	0,03 nm - 3,0 nm	U potpunosti apsorbirano u atmosferi i ne koristiti se za daljinska istraživanja.

Ultraljubičasto Zračenje	0,3 nm – 0,4 nm	Apsorbirano u stratosferi, u kombinaciji sa molekulama kisika formira ozon. Ne koristi se za daljinska istraživanja.
Fotografsko UV Područje	0,3 nm – 0,4 nm	Prolazi kroz atmosferu i moguće ga je snimiti, ali izrazito podložno atmosferskom raspršenju.
Vidljivi Dio Spektra	0,4 μm – 0,7 μm	Snima se raznim fotodetektorima. Uključuje i energiju reflektiranu od tla sa maksimalnom valnom duljinom od 0,5 μm .
Infracrveno Zračenje	0,7 μm – 1,0 μm	Interakcija sa tvarima varira sa valnom duljinom. „Atmosferski prozori“ su nejednoliki i odvojeni.
Reflektirano Infracrveno Zračenje	0,7 μm – 3,0 μm	Reflektirano solarno zračenje koje sadrži informacije o termalnim svojstvima materijala. Pojas od 0,7-0,9 μm moguće je snimiti i nazivamo ga fotografskim infracrvenim pojasom.
Termalno Infracrveno Zračenje	3,0 μm – 5,0 μm	Potrebno obratiti pozornost na „atmosferske prozore“ (Tablica 2.4.). Zračenje može penetrirati kroz oblake, maglu i kišu. Snimke mogu biti izvedene u aktivnom i pasivnom modalitetu.
Radarsko Zračenje	0,1 cm – 30 cm	Aktivna vrsta mikrovalnih daljinskih istraživanja. Radarske snimke.
Radio Valovi	> 30 cm	Valovi najduže valne duljine u elektromagnetskom spektru. Neki dugovalni radari također djeluju u ovom dijelu spektra.

2.2. Zakoni zračenja

Kretanje elektromagnetske energije kroz atmosferu prati određenje fizikalne zakone. Isaac Newton još je početkom 18. stoljeća uočio dualnu prirodu svjetlosti, i samim time, svih vrsta elektromagnetskog zračenja, gdje ona istovremeno pokazuje svojstva diskretne i kontinuirane pojave. Newton je tvrdio da je svjetlost struja sitnih čestica koje koje putuju pravim linijama. Ova teorija konzistentna je sa modernijim učenjima Maxa Plancka (1858.-1947.) i Alberta Einsteina (1879. – 1955.). Planck je otkrio da se elektromagnetska energija prenosi u diskretnim jedinicama koje je nazvao kvantima, ili fotonima. Veličina svake pojedine jedinice direktno je proporcionalna frekvenciji njenog zračenja. Planck je definirao i konstantu (h) kojom povezuje frekvenciju gibanja (f) sa izračenom energijom (Q) [1]. ;

$$Q = hf \quad (2.3)$$

U nastavku, potrebno je definirati nekoliko pojmova bitnih za opisivanje elektromagnetskih pojava.

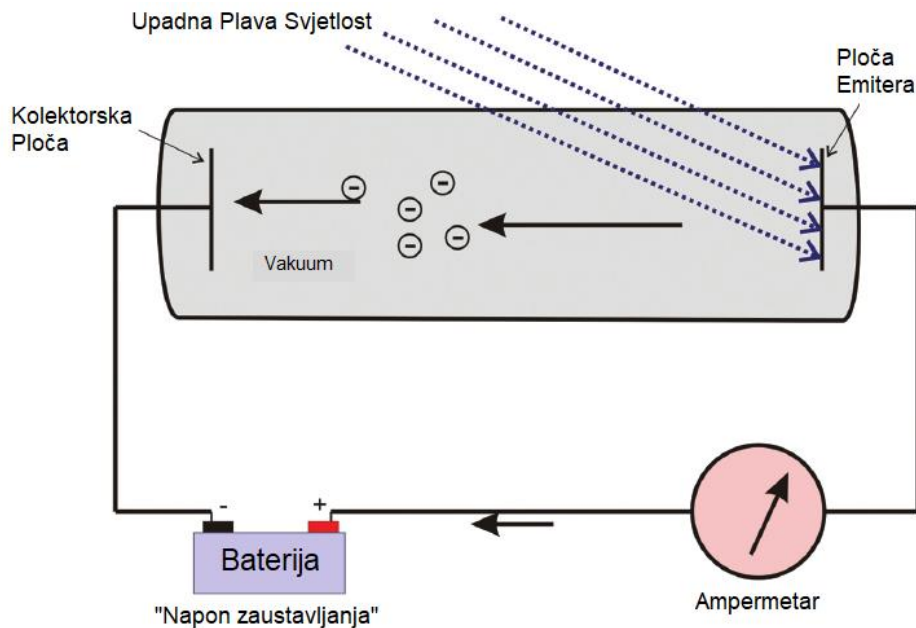
Tempo kojim fotoni „udaraju“ o površinu ili drugim riječima, energija dovedena površini u jedinici vremena, naziva se tok elektromagnetnog zračenja (en. Radiant flux). Mjerimo ga u vatima (W), a označavamo sa ϕ_e .

Također je potrebno specificirati površinsku jedinicu, radijanciju, koju definiramo kao tok elektromagnetskog zračenja po jedinici površine. Uobičajeno se mjeri u vatima po metru kvadratnom (Wm^{-2}), a označava kao E_e .

Dok radijancija mjeri količinu zračenja koje je dovedeno površini, pojam egzitancije označava tempo kojim je elektromagnetsko zračenje emitirano ili izračeno iz određene površine. Mjeri se također u vatima po metru kvadratnom (Wm^{-2}), a označava kao M_e [1].

2.2.1. Fotoelektrični efekt

Fizikalna pojava uslijed koje dolazi do emisije električnog naboja (elektrona) iz površine određenih metala, kada su izloženi diskretnim jedinicama energije (fotonima ili kvantima) [1]. Prvi ga je primjetio Heinrich Rudolf Hertz 1887. godine, ali ne i objasnio. Radi se o konceptu koji je do početka 20. stoljeća bio zagonetka u fizici, te je Albertu Einsteinu donio osvajanje Nobelove Nagrade 1921. godine [2].



Slika 2.4. Shema uređaja za mjerenje fotoelektričnog efekta, [2]

Fenomen se najčešće opisuje u kontekstu pokusa, ilustriranog iznad na Slici 2.4. Ako svjetlost dovoljno kratke valne duljine (ovdje plava, otprilike $0,5 \mu\text{m}$) obasja metalnu površinu u vakuumu, dolazi do oslobađanja elektrona koji potom mogu biti sakupljeni na drugoj površini – u ovom primjeru, kolektorskoj ploči. Energija emitiranih elektrona može biti izmjerena dovodeći „negativni napon“ na kolektorsku ploču, odbijajući elektrone [2]. Najvažnija osobina fotoelektričnog efekta je povezana sa ovisnošću fotoelektričnog efekta o valnim dužinama i intenzitetu svjetlosti kojom se osvjetljava metalna ploča: ako je valna dužina manja od neke granice (koja ovisi o vrsti tvari) intenzitet efekta (količina el. naboja koji se pojavljuje na kolektorskoj ploči) raste sa povećanjem intenziteta. Međutim, ako valna dužina svjetlosti prelazi tu granicu, fotoelektrični efekt nestaje, bez obzira koliko intenzivna bila svjetlost. Ovakvo

ponašanje nije se moglo objasniti dotadašnjim poznavanjem fizike: teorija o svjetlosti kao valu nije mogla objasniti zašto veća količina energije ne može izazvati fotoelektrični efekt, jer je ta teorija predviđala da iste količine energije moraju imati iste efekte. Eksperiment je pokazao da za svaki metal postoji najmanja, tzv. granična frekvencija svjetlosti takva da se manjom od nje ne može izazvati fotoelektrični efekt, ma kako velika bila jakost upadne svjetlosti. Planckovoj hipotezi Einstein je dodao i pretpostavku da je za izlazak elektrona iz metala potrebna energija koja je ista za sve elektrone, koju je on nazvao izlazni rad. Treba dodati da je tome doprinijelo i otkriće da su nosioci električnog naboja u metalu električki negativno nabijeni elektroni. Kombinirajući sva tada moderna znanja i hipoteze Einstein je dao jednadžbu koja opisuje fotoelektrični efekt [5]:

$$E_k = hf - W_0 \quad (2.4)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

E_k – Maksimalna kinetička energija elektrona,

h – Planckova konstanta,

f – Frekvencija ulazne svjetlosti,

W_0 – Izlazni rad materijala.

Jedna od najvažnijih primjena fotoelektričnog efekta danas dolazi prilikom konstrukcije uređaja za noćno gledanje. Fotoni udaraju u tanki sloj alkalijskog metala ili poluvodiča u cijevi gdje se slika pojačava, uzrokujući odašiljanje fotoelektrona. Oni su zatim ubrzavaju elektrostatskim poljem i udaraju u zaslon premazan fosforom, gdje opet stvaraju fotone. Ubrzavanjem elektrona ili povećanjem njihovog broja sekundarnom emisijom možemo pojačati signal [6].

2.2.2. Kirchhoffov zakon

Osnova ovog zakona jest koncept crnog tijela. Sva tijela sa temperaturom iznad apsolutne nule zrače energiju. Količina izračene energije i valna duljina na kojoj je izračena određeni su temperaturom tog tijela. Kako temperatura tijela raste, ukupna količina izračene energije također raste, i valna duljina maksimalne (vršne) energije zračenja postaje kraća. Crno tijelo je zamišljeni, idealan izvor energije. Ponaša se tako da upija svo upadno zračenje; ne reflektirajući ništa. Efikasnost u zračenju energije kod

crnog tijela također je „savršena“, ovisi samo o temperaturi. Crno tijelo je hipotetski entitet, jer sva tijela u prirodi reflektiraju barem malu količinu zračenja koja im je dovedena i ne postoji ono koje se ponaša kao savršeni *reradiator* apsorbirane energije. Doduše, iako savršena crna tijela ne postoje u prirodi, njihovo ponašanje može biti aproksimirano u laboratorijskim uvjetima. Takvi laboratorijski uređaji postali su baza za znanstveno istraživanje koje je definiralo odnose između temperature objekta i količine zračenja koje taj objekt emitira [1].

Kirchhoffov zakon govori kako je omjer emisije i apsorpcije toka elektromagnetskog zračenja jednak za sva crna tijela jednake temperature [1].

Zakon je osnova za definiciju pojma emisivnosti (ε) – omjera emitirane energije danog tijela (M) i one za crno tijelo iste temperature (M_b):

$$\varepsilon = \frac{M}{M_b} \quad (2.5)$$

Radi se o mjeri efikasnosti kojom neka površina apsorbira ili reflektira zračenje i kreće se od 0 do 1 [2].

Emisivnost crnog tijela, savršenog emitera je 1, a iznosila bi 0 za savršeni reflektor – takozvano bijelo tijelo [1].

Objekti koje uobičajeno pronalazimo u prirodi, sa emisivnostima u intervalu $0 < \varepsilon < 1$, nazivamo sivim tijelima [2].

2.2.3. Stefan- Boltzmannov zakon

Zakon definira vezu između totalnog emitiranog zračenja tijela (W), izraženog u vatima po jedinici površine, i temperature izražene u kelvinima [1].

Ukupna količina zračenja koje emitira crno tijelo proporcionalno je temperaturi tog tijela na četvrtu potenciju [1].

Stefan- Boltzmannov zakon daje izraz za ukupnu izračenu energiju po jedinici površine izrazom [2] :

$$R = \sigma \varepsilon T^4 \quad (2.6)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

R – energija izračena po m^2 ,

ε – emisivnost,

σ – Stefanova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right]$),

T – apsolutna temperatura danog tijela.

Esencijalno, Stefan- Boltzmannov zakon govori kako toplija crna tijela emitiraju više energije po jedinici površine od hladnijih crnih tijela [1].

2.2.4. Wienov zakon pomaka

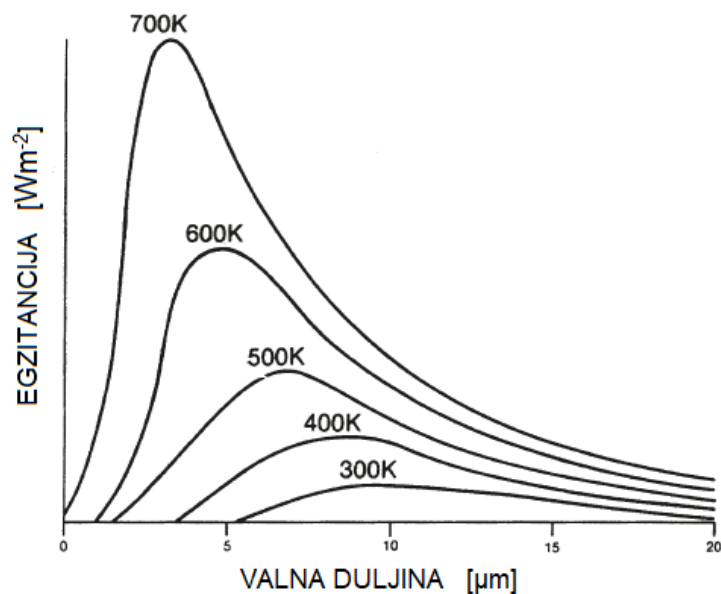
Zadnji u nizu zakona koji će biti navedeni u ovom radu, na neki način povezuje dva ranije spomenuta, i stavlja u vezu valnu duljinu emitiranog zračenja sa temperaturom crnog tijela. Wienov Zakon Pomaka daje nam vršnu valnu duljinu, onu u kojoj dolazi do maksimalne vrijednosti izračene energije za određenu temperaturu [2]:

$$\lambda_{max} = \frac{a}{T} \quad (2.7)$$

gdje oznake imaju sljedeće značenje:

a – konstantna vrijednost ($a = 2,898 \cdot 10^{-3} [mK]$),

T - apsolutna temperatura danog tijela.



Slika 2.5. Wienov zakon pomaka, [1]

Raspodjela valnih duljina, kod toplinskog zračenja crnog tijela, vrlo je sličnog oblika za sve temperature. Vršna vrijednost valne duljine za pojedinu temperaturu, raste s povećanjem temperature i pomiče se prema manjim valnim duljinama [1].

Primjerice, za temperaturu od 310 K - ljudsko zračenje, vršna vrijednost je na valnoj duljini od 10 μm , što je daleko u infracrvenom spektru. Samim time nameće se zaključak da je ljude najoptimalnije opažati koristeći infracrvene kamere.

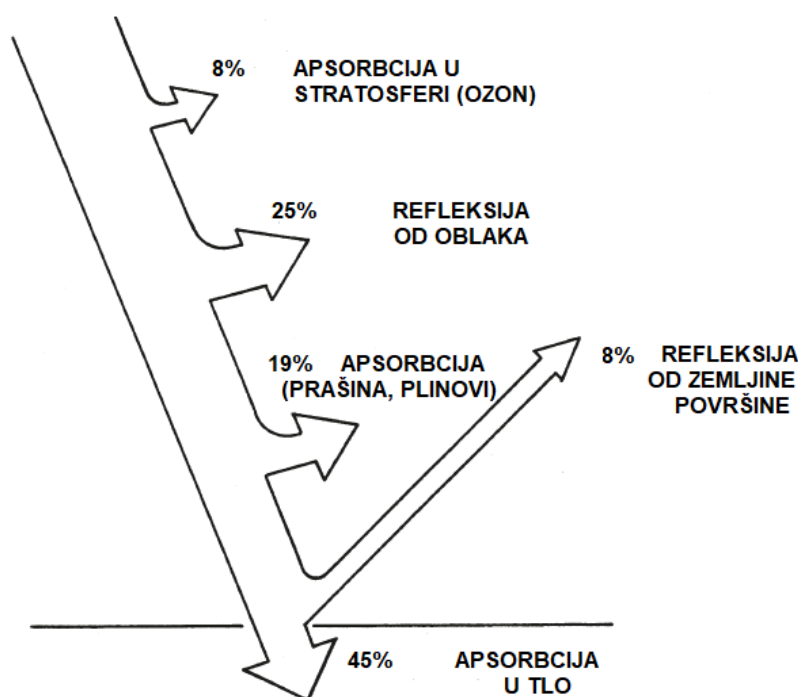
2.3. Interakcije sa atmosferom

Svo elektromagnetsko zračenje koje bilježe senzori mora kroz atmosferu proći dvaput, prije i nakon interakcije sa atmosferom. Taj prolazak izmjeniti će brzinu, frekvenciju, intenzitet, spektralnu distribuciju, kao i smjer tog zračenja. Efekti o kojima će biti riječi najviše utječu upravo na vidljivi i infracrveni dio spektra, dva koja se najviše koriste u daljinskim istraživanjima [3].

Najveći izvor upadnog zračenja koje dolazi do Zemlje jest zračenje Sunca. Takvo zračenje naziva se insolacijom (od eng. *incoming solar radiation*). Puni Mjesec drugi je najveći izvor, sa energijom jačine samo milijuntog dijela one direktne sunčeve [2].

Svo zračenje koje se koristi u daljinskim istraživanjima mora proći kroz „čitavu dubinu“ Zemljine atmosfere. U tim uvjetima, atmosferski efekti mogu imati i imaju, velikog utjecaja na kvalitetu snimaka generiranih sensorima. Pri prolasku kroz atmosferu elektromagnetsko zračenje podložno je modifikaciji od strane nekoliko fizikalnih procesa o kojima će detaljnije biti riječi u idućim poglavljima, a to su raspršenje, refrakcija i apsorbcija [1].

Općenito, ovi fizikalni procesi zavisni su od; sastava i fizikalnih osobina medija kroz koji prolaze, valne duljine i frekvencije upadnog zračenja, kao i kuta pod kojim upadno zračenje udara o površinu [2].

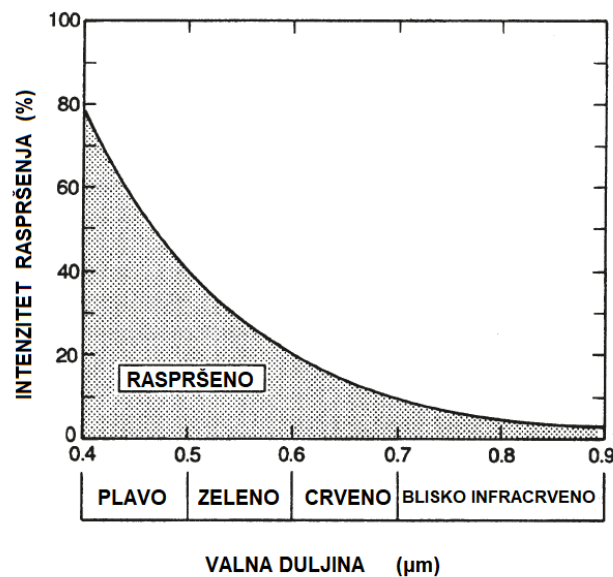


Slika 2.6. Interakcije elektromagnetskog zračenja s atmosferom, [1]

Generalno gledano, od imaginarnih 100 jedinica kratkovalnog zračenja koje dopre do Zemljine atmosfere, otprilike 3% je apsorbirano u stratosferi. Od ostalih 97 jedinica, otprilike 25% biva reflektirano od oblaka, 19% apsorbirano od strane čestica prašine i plinova u nižim slojevima atmosfere, te otprilike 8% reflektirano od raznih površina na tlu. Preostalih 45 jedinica (45% upadnog zračenja) je i najvažniji dio za daljinska istraživanja, zračenje koje je apsorbirano i kasnije ponovo emitirano iz Zemljine površine [1].

2.3.1. Raspršenje

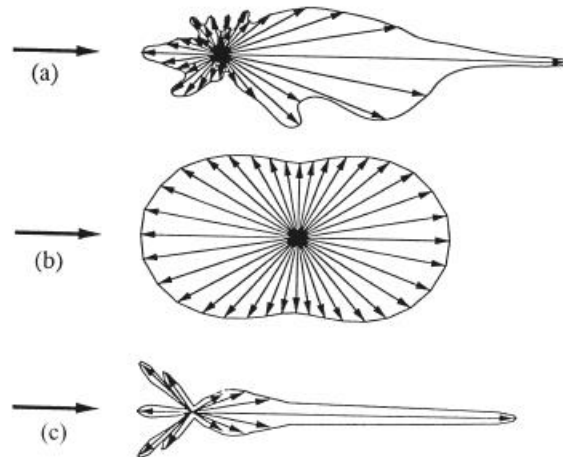
U atmosferi, do raspršenja najčešće dolazi uslijed sudara sa velikim molekulama atmosferskih plinova. Intenzitet raspršenja ovisi o veličini i brojnosti čestica, kao i o valnoj duljini upadnog zračenja te dubini atmosfere kroz koju elektromagnetska energija putuje. Britanski znanstvenik J. W. S. Rayleigh (1824. – 1919.), eksperimentom je dokazao kako do raspršenja dolazi čak i u savršeno čistoj atmosferi, te kako se raspršenje znatno povećava kako se valna duljina upadnog zračenja smanjuje. Drugim riječima, plava svjetlost se raspršuje četiri puta više od crvene, dok se ultraljubičasta raspršuje gotovo 16 puta više od crvene. Rayleighovo raspršenje tako objašnjava i plavu boju neba za vedrog dana – uslijed relativno ravnog i okomitog puta svjetlosti, kao i blistave crvene i narančaste nijanse koje se pojavljuju u suton – duži atmosferski put što uzrokuje prolazak samo dužih valnih duljina svjetlosti [1].



Slika 2.7. Rayleighovo raspršenje, [1]

Iako Rayleighovo raspršenje predstavlja vrlo važnu komponentu razumijevanja djelovanja atmosfere na transmisiju zračenja, ono se odnosi samo na vrlo specifičnu vrstu atmosferskih interakcija. Potrebno je uzeti u obzir i vrstu raspršenja koju je opisao njemački fizičar Gustav Mie (1868. – 1957.), a koje uključuje analizu šire palete atmosferskih čestica. Mieovo raspršenje izazivaju velike atmosferske čestice; prašina, pelud, dim, kapljice vode i slične. Takove čestice mnogo su veće od onih koje uzrokuju

Rayleighovo raspršenje. Promjeri ovih čestica otprilike su jednaki valnim duljinama raspršenog zračenja. Mieovo raspršenje, dakle, također je ovisno o valnim duljinama zračenja, ali ne simplistički kao kod Rayleigha. Primjerice, najozbiljnije posljedice osjećaju se u nižim slojevima atmosfere gdje su spomenute čestice daleko najbrojnije.



Slika 2.8. Raspršenje uslijed sudara sa atmosferskim česticama, izvor: [1]

Slika iznad vizualizira kako geometrijski različito može izgledati atmosfersko raspršenje. U primjeru (a) radi se o sudaru sa česticama dima ili prašine, poprilično nesimetričnim česticama, koje stvaraju snažno izbočeni vrh raspršenja prema naprijed sa manjom količinom raspršenosti u stražnjem dijelu.

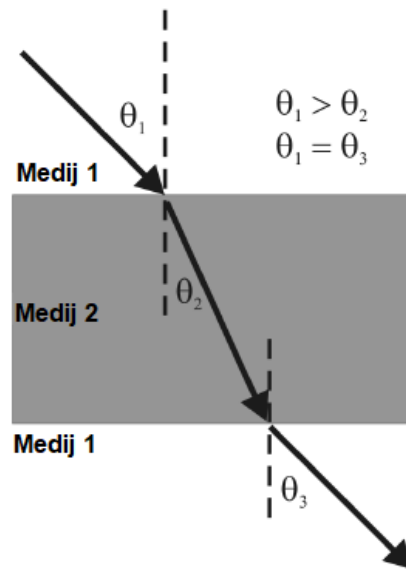
Slučaj (b) prikaz je jednoličnog, gotovo u svim smjerovima jednakog raspršenja, bez izraženih ekstrema. Događa se pri sudaru sa atmosferskim molekulama, koje su i same gotovo simetričnog oblika. Velike kapljice vode ili vodene pare iz primjera (c), izazvat će izražene prednje ekstreme, sa vrlo malo raspršivanja sa stražnje strane, tj. nazad u smjeru iz kojeg zračenje dolazi [1].

Za daljinska istraživanja, raspršenje ima nekoliko bitnih utjecaja. Ultraljubičasti i plavi dio spektra, zbog velike podložnosti Rayleighovom raspršenju, uglavnom se ne koristi. Kao što je djelomično vidljivo na Slici 2.7. Snimke snimljene u tom spektru bilježe svjetlinu atmosfere umjesto svjetline same snimane scene. Iz tog razloga, uređaji za daljinska istraživanja isključuju kratkovalno zračenje, koristeći razne filtere.

Raspršenje također može smanjiti kontrast snimke, rezultirajući time da se tamniji objekti čine svjetlijima i obrnuto [1].

2.3.2. Refrakcija

Refrakcija ili transmisija pojava je otklona zrake svjetlosti pri prolasku kroz granicu dvaju fotopropusnih medija [1]. Prolazak zrake kroz dva medija različitih gustoća ima za posljedicu da se zraka lomi od svoje „ravne“ linije kretanja, također dolazi do promjene u valnoj duljini i brzini širenja zrake, dok frekvencija ostaje konstantna [2].



Slika 2.9. Refrakcija, [2]

U primjeru prikazanom na slici iznad, upadna zraka svjetlosti (pod kutom θ_1) lomi se prema normali ($\theta_2 < \theta_1$), krećući se iz rjeđeg (Medij 1) u gušći medij (Medij 2). Ponovnim izlaskom iz gušćeg medija u rjeđi, zraka se lomi od normale (kut $\theta_3 = \theta_1$). Promjena u brzini širenja elektromagnetskog zračenja objašnjena je tzv. indeksom loma (n), koji definiramo kao omjer brzine elektromagnetskog zračenja u vakuumu (c) i brzine u određenom mediju (v):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.8.)$$

Indeks loma za vakuum jednak je jedinici. Budući da brzina v nikad nije veća od c , n ne može biti manji od 1, za bilo koji medij [2]. Izraz koji povezuje indeks loma i kut upada zrake jest Snellov zakon, a glasi ovako:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.9.)$$

2.3.3. Apsorpcija

Apsorpcija zračenja događa se kada atmosfera sprječava ili snažno slabi prijenos zračenja ili energije tog zračenja kroz samu atmosferu. Energija koju atmosfera u tom procesu upije kasnije je izračena u valovima duže valne duljine. U Zemljinoj atmosferi, tri plina su najodgovornija za ovaj proces, to su ozon (O_3), ugljični dioksid (CO_2) te vodena para (H_2O).

Ozon nastaje interakcijom ultraljubičastog zračenja velike energije sa molekulama kisika, u stratosferi. Koncentracija ovog plina u atmosferi nije velika, tek otprilike - na tlu 0,07 ppm (eng. *parts per million*, bezdimenzionalna veličina, u ovom slučaju označava pojavnost molekule ozona u smjesi zraka) i do 0,2 ppm u stratosferi. Unatoč tome, ima vrlo važnu ulogu u zadržavanju ravnoteže na Zemlji, apsorpcijom sprječavajući prodor štetnog visokoenergetskog ultraljubičastog zračenja u niže slojeve atmosfere.

Ugljični dioksid također se u atmosferi generalno ne pojavljuje u velikim količinama, ali važan je u daljinskim istraživanjima jer uspješno apsorbira zračenje u srednjem i dalekom infracrvenom dijelu spektra. Najjača apsorpcija odvija se na valnim duljinama od otprilike 13 μm - 17,5 μm , u srednjem dijelu infracrvenog spektra.

Na kraju, vodena para česta je pojava u nižim slojevima atmosfere (ispod 100 km) sa i do 3% pojavnosti u smjesi zraka. Pojavnost vodene pare varira od mjesta do mjesta na Zemlji, kao i od vremena do vremena, tako i njen utjecaj na daljinska istraživanja nije uvijek i svugdje jednak. Primjerice, može biti potpuno nevažna u suhim klimama, dok s druge strane, može apsorbirati i do 80% dolaznog zračenja u nekim dijelovima spektra. Najjača apsorpcija odvija se u infracrvenom dijelu spektra, na valnim duljinama od otprilike 5,5 μm - 7 μm i iznad 27 μm [1].

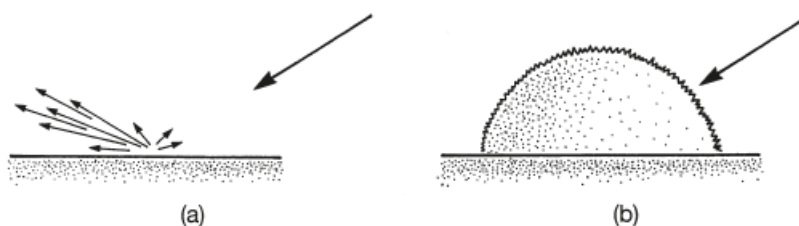
Možemo stoga zaključiti kako Zemljina atmosfera nikako nije potpuno propusna za elektromagnetsko zračenje. Atmosfera selektivno propušta energiju zračenja na određenim valnim duljinama; one valne duljine koje relativno lako „prolaze“ kroz atmosferu nazivaju se atmosferskim prozorima. U daljinskim istraživanjima, upravo ove valne duljine koriste se za formiranje snimaka. Najvažniji prozori za pojedine dijelove spektra dani su u Tablici 2.3., u nastavku.

Tablica 2.4. Najvažniji atmosferski prozori, [1]

Dio Elektromagnetskog Spektra	Prozori
Ultraljubičast i Vidljivi	0,30 μm – 0,75 μm 0,77 μm – 0,91 μm
Bliski Infracrveni	1,55 μm – 1,75 μm 2,05 μm – 2,40 μm
Daleki Infracrveni	8,0 μm – 9,2 μm 10,2 μm – 12,4 μm
Mikrovalni	7,5 mm – 11,5 mm > 20,0 mm

2.4. Interakcije sa površinama

Nakon što elektromagnetsko zračenje dopre do Zemljine površine, ono mora biti reflektirano, apsorbirano ili transmitirano (propušteno) od strane površine s kojom je u interakciji. Najčešće se radi o kombinaciji procesa, čiji omjer ovisi o; prirodi površine s kojom je zračenje u interakciji, valnoj duljini zračenja i kutu upada [1].

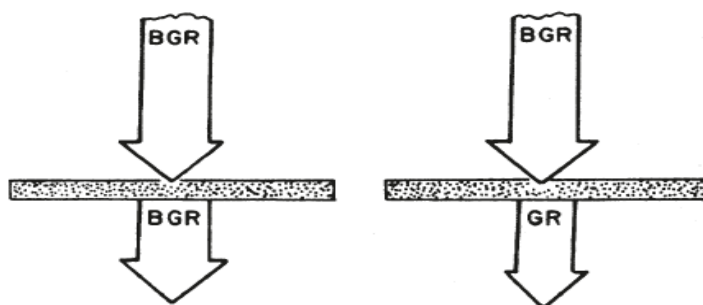


Slika 2.10. Raspršenje upadnog zračenja, [1]

Do refleksije, kao prve od tri pojave, dolazi kada zraka svjetlosti naleti na neku netransparentnu površinu. Priroda refleksije ovisi o veličini predmeta i glatkoći ili hrapavosti površine u odnosu na valnu duljinu zračenja. Ukoliko je površina glatka, spekularna refleksija (Slika 2.10. (a)) reflektira svo ili većinu upadnog zračenja u jednom smjeru. Za takve površine, generalni kut refleksije jednak je kutu upada. Sukladno ranije spomenutom Snellovom zakonu (formula 2.9.) – budući da ne postoji

prelazak između dva različita medija $n=n'$, pa mora vrijediti i $\theta = \theta'$ [1].

Ukoliko se radi o hrapavoj površini, u odnosu na valnu duljinu u padnog zračenja, dolazi do difuzne refleksije (Slika 2.10. (b)). Difuzna refleksija naziv je za pojavu pri kojoj upadno zračenje biva nepredvidljivo odbijeno u više smjerova, uključujući i smjer upada. Nakon sudara, početna brzina i valna duljina zračenja ostaju nepromijenjeni [2]. Iduća pojava i pojam suprotan refleksiji je transmisivnost. Ovdje govorimo o svojstvu površine koja na upadno zračenje reagira tako da propušta, bez posebnog prigušenja, kažemo da je površina transparentna za zračenje [2].



Slika 2.11. Transmisivnost, Izvor: [1]

Slika 2.9. ilustrira ovu pojavu. Na lijevoj strani imamo prikaz zrake svjetlosti u vizualnom dijelu spektra koja bez značajnog prigušenja prolazi kroz površinu (BGR – eng. blue, green, red – plavo, zeleno crveno). Površina s desne strane djeluje kao takozvani „žuti filter“ ili „minus plavi“ filter, propuštajući svu vidljivu svjetlost osim plavog dijela spektra. Pojam vezan uz transmisiju koji ovdje još treba definirati je koeficijent transmisije (t). Definiramo a kao omjer propuštenog zračenja i ukupnog upadnog zračenja [1]:

$$t = \frac{\text{Propušteno zračenje}}{\text{Upadno zračenje}} \quad (2.10.)$$

Na kraju, osim atmosferske apsorpcije, poznajemo i apsorpciju kao svojstvo materijala. Da bi neki medij upio ili apsorbirao zračenje, on mora biti nepropustan za zračenje. Dio apsorbiranog zračenja naknadno prelazi u toplinsku energiju, koju objekt onda izračuje na većim valnim duljinama [2].

3. Infracrveno zračenje

Nuklearne reakcije unutar Sunca izlučuju puni spektar elektromagnetskog zračenja, koje se onda odašilje kroz vakuum Svemira i gotovo nepromijenjeno dolazi do Zemlje. Zračenje prolazi Zemljinom atmosferom, dio je raspršen i ne dolazi do Zemljine površine. Dio ga biva reflektiran od površine Zemlje, i takvo zračenje čini osnovu za standardne fotografije. Zadnji dio, onaj koji nas najviše zanima u ovom radu je termalna energija – dio zračenja koji Zemljina površina ili objekti na njoj prvotno apsorbiraju, a potom izračuju u obliku topline. Ovaj dio spektra elektromagnetskog zračenja vrlo je širok, u usporedbi sa onim u vidljivom dijelu spektra. Proteže se od otprilike 0,72 μm pa do 15 μm valne duljine, što ga čini 40-ak puta širim od vidljivog dijela spektra. Zbog svog širokog obujma, logično je da obuhvaća zračenje vrlo različitih osobina [1].

Glavnina zračenja elektromagnetskih valova ljudskoga tijela je u infracrvenom području. Infracrveno zračenje nastaje kao posljedica sudara čestica pri translacijskome gibanju, pri vibracijama kristalne rešetke čvrstih tijela kao i pri vibracijama i rotacijama kemijski vezanih atoma i atomskih skupina u molekulama organskih tvari i plinova, i to na svim temperaturama višima od apsolutne nule. Bogati su izvori takva zračenja sva užarena tijela, oko polovice Sunčeva zračenja emitira se u infracrvenome području [8].

Za otkriće infracrvenog zračenja zasluge preuzima britanski astronom William Herschel (1738. – 1822.). On je još 1800. godine zapazio da u spektru Sunčeva zračenja, dobivenom s pomoću optičke prizme, najvišu temperaturu pokazuje područje koje se nastavlja na crveni dio vidljivoga spektra. Za ljudsko oko to je zračenje nevidljivo, ali se može osjetiti na koži kao osjećaj topline [8].

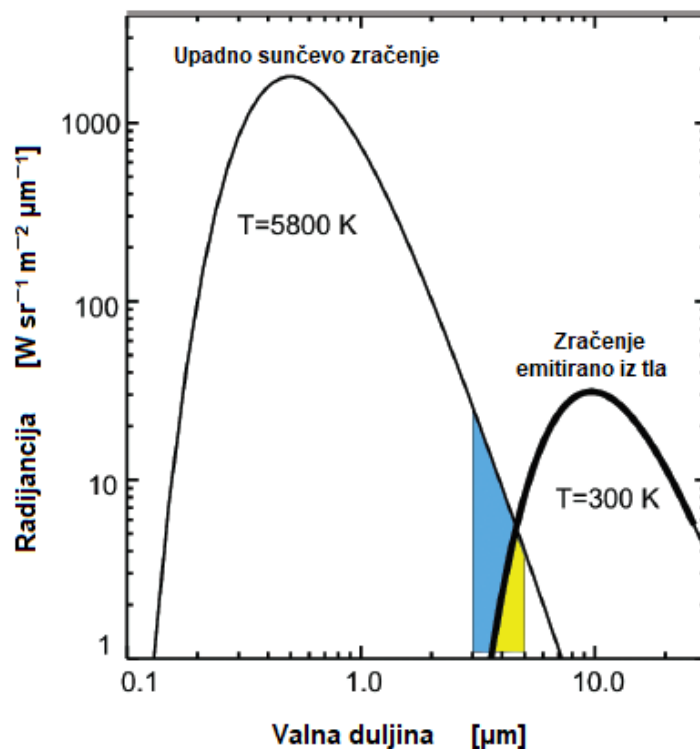
Tablica 3.1. Podjela Infracrvenog Spektra, [9]

Dio Spektra	Kratica	Valna Duljina [μm]	Opće Napomene
Blisko Infracrveno Zračenje	NIR	0,72 – 1,40	Reflektirano solarno zračenje, ponaša se analogno vidljivoj svjetlosti i na sličan se način može i snimati.
Kratkovalno Infracrveno Zračenje	SWIR	1,40 – 3,00	

Srednjevalno Infracrveno zračenje	MWIR	3,00 – 8,00	
Dugovalno Infracrveno Zračenje	LWIR	8,00 – 15,00	Zračenje emitirano iz Zemljine površine. Termalna energija. Po svojstvima fundamentalno različito od vidljivog i drugih infracrvenih dijelova spektra.
Daleko Infracrveno Zračenje	FIR	15 - 1000	

3.1. Koncepti Infracrvenog Zračenja

Kako bismo pravilno i potpuno bili u stanju klasificirati termalnu snimku, prvo je potrebno definirati neke od općih koncepata infracrvenog zračenja, neki od kojih su općenito spomenuti u ranijem tekstu.

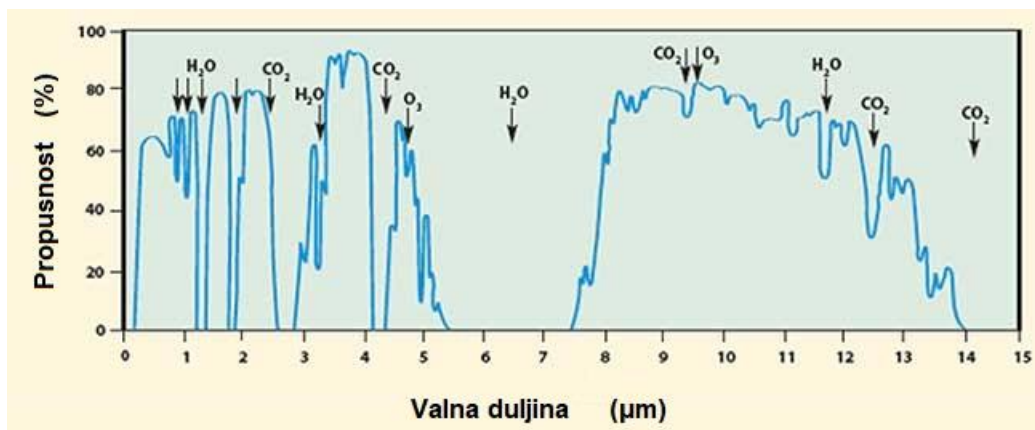


Slika 3.1. Krivulje crnih tijela za Sunce i Zemljinu površinu, [10]

Slika 3.1. nastavlja se na Kirchoffov zakon, teoriju zračenja crnog tijela i Wienov zakon pomaka koji su predstavljeni u poglavlju 2. Poštujući Wienov zakon pomaka, znamo da Zemljina površina, koja je mnogo hladnija, mora emitirati zračenje na mnogo većim valnim duljinama od onog koje emitira Sunce. Sunce, sa temperaturom od gotovo 6000 K, maksimalnim intenzitetom emitira zračenje valne duljine 0,5 μm , u zelenom dijelu vidljivog spektra. S druge strane, Zemljina površina, približne temperature od 300 K, doseže svoj maksimum intenziteta na približno 10 μm , u daleko infracrvenom spektru [1].

Analiziramo li krivulje na slici dalje, vidimo kako upadno zračenje Sunca opada prateći zakon obrnutog kvadrata i zračenje koje opažamo na Zemlji se smanjuje za faktor $\left(\frac{r_{\text{Sunca}}}{r_{\text{Zemljine orbite}}}\right)^2$. Kao posljedica toga, obratimo li pozornost na područje valnih duljina 3 μm - 5 μm , opažamo kako se nalazi točno u sredini između dominantno reflektiranog sunčevog zračenja i dominantno emitiranog termalnog zračenja za objekte na površini Zemlje [2].

Treba ponovo spomenuti i temu atmosferskih prozora, koji su poprilično bitni u infracrvenom dijelu spektra elektromagnetskog zračenja, kao najvećem od svih.



Slika 3.2. Atmosferski prozori u infracrvenom području, [9]

Infracrveno zračenje dijelom se apsorbira prolaskom kroz vodenu paru, ozon i ugljikov dioksid u atmosferi, ali se obično mnogo lakše probija kroz sredstva koja inače raspršuju vidljivo zračenje (sumaglica, zagađena atmosfera, međuzvezdana prašina).

3.2. Toplinski parametri u analizi snimljene scene

Na ranije spomenutim konceptima infracrvenog zračenja temelji se i primjena infracrvene fotografije (prvu snimio William De Wiveleslie Abney, 1880.), koja osim toga omogućuje snimanje predmeta čak i u potpunome mraku na temelju razlike u toplini pojedinih dijelova predmeta [8].

Generalno gledano, instrumenti korišteni u daljinskim istraživanjima neće biti u stanju uključiti emisivnost u analizu scene. Izračena količina energije po jedinici površine nekog objekta u stvarnosti iznosi $\sigma \varepsilon T_{kinetička}^4$, kako je ranije definirano Stefan-Boltzmannovim zakonom. Senzori će, s druge strane, dati vrijednost $\sigma T_{izračena}^4$.

Kinetička temperatura ($T_{kinetička}$) je „prava“ temperatura, ona izmjerena termometrom.

Izjednačimo li dvije vrijednosti dobivamo $T_{izračena}^4 = \varepsilon T_{kinetička}^4$.

Znamo od ranije da je ε broj koji je uvijek manji od 1, tako da je izračena temperatura, ona dobivena na senzoru, uvijek manja od kinetičke i to poštujući jednadžbu [2]:

$$T_{izračena} = \varepsilon^{\frac{1}{4}} T_{kinetička} \quad (3.1.)$$

Bitna razlika između opažanja scene u vizualnom i termalnom infracrvenom području je ta da su vrijednosti izračene energije jako ovisne o dobu dana kada su prikupljeni, kao i okolišu i samoj prirodi opažanih materijala [2].

Toplinski kapacitet ili specifična toplina (C) mjera je porasta količine termalne energije (topline) po stupnju porasta temperature. Mjeri se kao broj kalorija koji je potreban kako bi se temperatura 1 g materijala podigla za 1 °C.

Toplinska vodljivost (K) mjera je brzine kojom toplina prolazi kroz neku tvar. Mjeri se kao količina topline koja prođe kroz površinu jediničnog poprečnog presjeka i određene debljine, sa određenom promjenom temperature.

Toplinska inercija (P) mjera je otpornosti materijala na promjenu temperature, promatra se u vremenski određenim varijacijama temperature tijekom punog ciklusa zagrijavanja i ponovnog hlađenja.

Toplinska difuzivnost mjera je brzine kojom se toplina prenosi unutar tvari. Koliko brzo se promatrana tvar može ohladiti (prenijeti toplinu sa površine u unutrašnjost) ili zagrijati

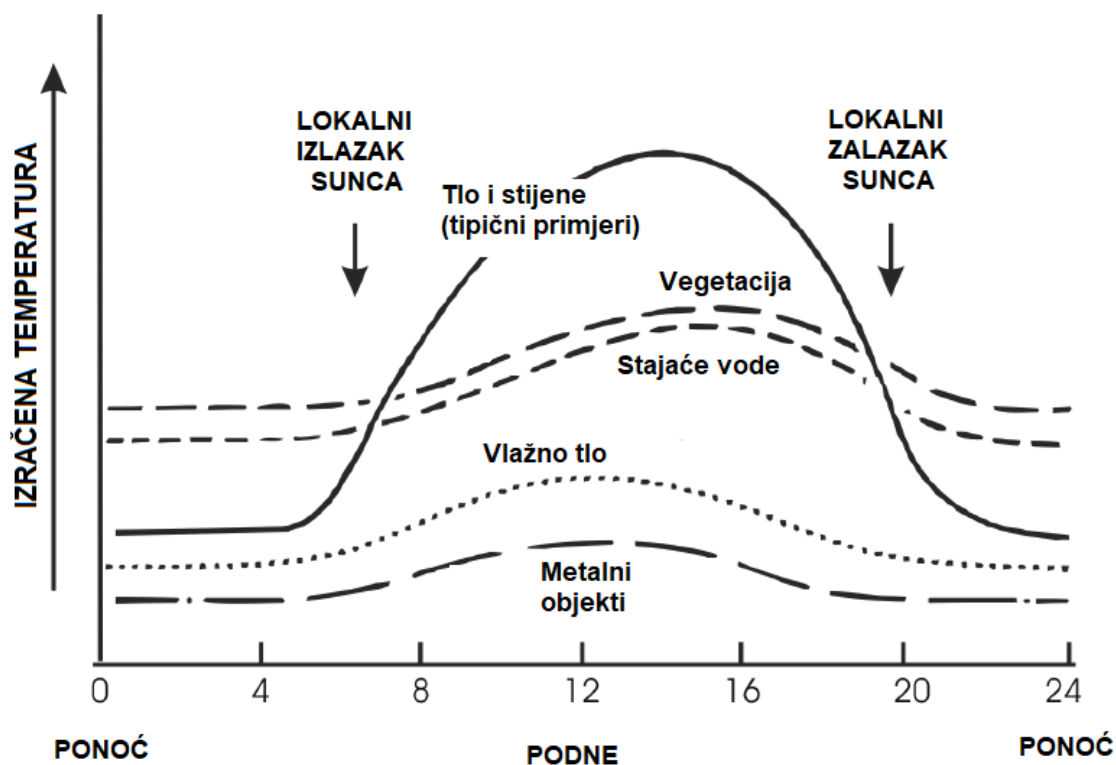
(prenijeti toplinu iz unutrašnjosti na površinu). Definirana je omjerom toplinske vodljivosti i produkta gustoće i specifičnoga toplinskog kapaciteta.

Tablica 3.2. Toplinski parametri različitih materijala, [2]

Materijal	Toplinska Vodljivost $[\frac{cal}{cm \cdot s \cdot ^\circ C}]$	Toplinski Kapacitet $[\frac{cal}{g \cdot ^\circ C}]$	Toplinska Inercija $[\frac{cal}{cm^2 \cdot s^2 \cdot ^\circ C}]$
Voda	0,0014	1,000	0,038
Drvo (Hrast)	0,0005	0,330	0,012
Pješčano tlo	0,0014	0,240	0,024
Bazalt	0,0045	0,210	0,053
Aluminij	0,5380	0,215	0,544
Bakar	0,9410	0,092	0,879
Nehrđajući Čelik	0,0300	0,120	0,168

Kao što je vidljivo u tablici 3.2., visok toplinski kapacitet obično označava niske vrijednosti u toplinskoj vodljivosti i inerciji, i obrnuto. Primjerice vodi, koja ima visoke vrijednosti emisivnosti i toplinskog kapaciteta, treba vrlo dugo da promjeni temperaturu u dnevnoj fluktuaciji topline od izlaska do zalaska Sunca. Još je ekstremniji primjer vegetacija (hrast u primjeru tablice) koja je vrlo dobro „vidljiva“ u infracrvenom spektru. Iako su listovi drveća gotovo nepropusni za vidljivu svjetlost, stanična struktura lista vrlo je reflektivna posebno za blisku infracrvenu svjetlost. U tablici vidimo vrlo nisku vrijednost toplinske vodljivosti za hrast. Zanimljivo je promotriti i dva primjera stijena danih u tablici, pjesak i bazalt. Gdje vidimo kako bazalt zbog svoje izrazito crne boje i glatke površine privlači mnogo više zračenja i pokazuje znatno višu vrijednost toplinske inercije. Primjer drugog ekstrema su metali, ovdje u primjeru bakar i aluminij. Zbog svoje strukture, metali će gotovo uvijek biti najtopliji elementi scene i zbog visoke toplinske inercije najpodložniji su dnevnim fluktuacijama u temperaturi.

Spomenute dnevne temperaturne fluktuacije možemo ilustrirati sljedećom slikom.

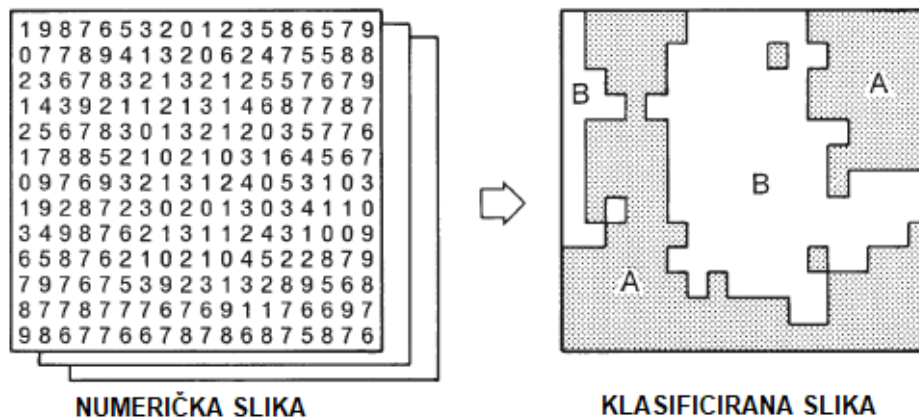


Slika 3.3. Dnevne fluktuacije temperature, [2]

Na slici vidimo kako svi promatrani objekti imaju više ili manje zvonoliku razdiobu temperature tijekom dana, sa maksimumom oko podneva kada je Sunce najviše na nebu i generalno je zračenje najjače. Iznimke su voda i vegetacija, za koje smo ranije spomenuli kako imaju nisku toplinsku inerciju, te im je za postizanje maksimuma potrebno više vremena. Treba primjetiti kako različiti objekti dostižu jednaku izračenu temperaturu u intervalima oko izlaska i zalaska Sunca. Takvi objekti tada „nestaju“ na slikama scene, kako im se temperatura izjednačava sa okolišem [2].

4. Digitalna klasifikacija snimaka

Digitalna klasifikacija snimaka, u najosnovnijem obliku, odnosi se na proces razvrstavanja piksela u odgovarajuće klase. Krajnji zadatak je grupirati spektralno slične piksele u odgovarajuće klase koje će točno reprezentirati kategorije od interesa za krajnjeg korisnika [1].



Slika 4.1. Numerička i klasificirana slika, [1]

U ovom slikovnom primjeru su tamniji pikseli, sa vrijednostima 0,1,2, i 3 grupirani tako da formiraju klasu B, a svjetliji pikseli sa vrijednostima 6,7,8 i 9 tvore klasu A. Obično, u klasifikaciji imamo mnogo više od 2 klase i barem 3 do 4 spektralna pojasa u procesu. Pojam klasifikator označava računalni program koji koristi neku od, kroz povijest razvijenih, statističkih strategija za klasifikaciju snimaka. Na ljudskom operateru je da ispravno definira zadatak i razumije dostupne strategije, odabirući najispravniji klasifikator za zadatak koji se obrađuje [1].

Najjednostavnija digitalna klasifikacija jest razmatranje svakog piksela zasebno i posljedično smještanje u klasu s obzirom na izmjerene vrijednosti u odvojenim spektralnim pojasevima. Iako ovakvi klasifikatori nude ekonomičnost i jednostavnost, oni nemaju mogućnost iskorištavanja u odnosima između piksela u njegovom okolišu. Suprotna vrsta su prostorni klasifikatori koji su mnogo skuplji i kompliciraniji, a razmaraju teksturu. Čovjeku kao klasifikatoru vrlo malo znači svjetlina jednog pojedinog piksela, ali s druge strane, može izvući puno informacija promatrajući kontekst, uzorke i razmještaj susjednih piksela na slici. To su neke od odlika kojima se teži u razvijanju računalnih klasifikatora [1].

Druga važna podjela u klasifikaciji jest ona s obzirom na razinu uključenosti ljudskog analitičara u klasifikacijski proces, na nadziranu i nenadziranu klasifikaciju, o čemu će detaljnije biti riječi u nastavku. Također, treba spomenuti i pojam hibridnog klasifikatora kao možda najbliže onome što se koristi u praksi, kombinirajući značajke obje spomenute metode [1].

4.1. Klase podataka

Informacijske klase su kategorije od interesa za krajnjeg korisnika. Primjerice, vode, vrste pokrova, vrste šuma, zgrade i slično. Ove klase su objekt klasifikacije, informacija koju želimo izlučiti iz sirovih podataka, svjetline pojedinih piksela zabilježenih na snimci. Suprotan pojam je spektralna klasa, skupina piksela koje možemo grupirati na osnovi njihove svjetline u različitim spektralnim pojasevima.

U praksi, informacijske klase gotovo uvijek se sastoje od više spektralnih podklasa koje proizlaze iz razlike u svjetlini zbog postojanja sjena i općenito prirodnih nesavršenosti koje računalo intuitivno ne prepoznaje [1].

Proces klasifikacije praktički se može pojednostaviti kao proces povezivanja spektralnih klasa sa informacijskima. Glavna obilježja spektralnih klasa su statistički pojmovi medijana ili središnje vrijednosti, varijance i standardne devijacije. Svaka spektralna klasa obilježena je medijanom koji predstavlja prosječnu vrijednost svjetline piksela koji pripadaju toj klasi. Kako bi dobili potpunu klasu definira se još i varijanca, kao vrijednost razlike od medijana, tj. broj koji definira za koju vrijednost pikseli mogu biti svjetliji ili tamniji od medijana, a da još uvijek pripadaju u tu spektralnu klasu. Nekad se ta vrijednost definira i kao standardna devijacija, drugi korijen od vrijednosti varijance, kako nam je poznato iz statistike.

4.2. Nenadzirana klasifikacija

Može se definirati kao identifikacija prirodnih zajednica ili struktura, unutar multispektralnih podataka. Nenadzirana klasifikacija sastoji se od definiranja, identificiranja i mapiranja tih prirodnih i nerazdvojivih klasa [1].

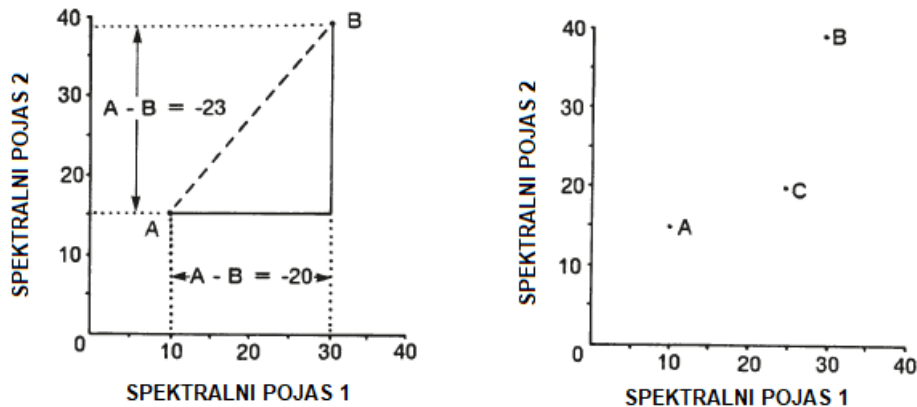
Prednosti ovakve klasifikacije, u odnosu na nadziranu o kojoj će riječi biti kasnije, mogu biti višestruke:

- Nema potrebe za prethodnim znanjem o objektu opažanja da bi se klasifikacija provela. Ali to znanje može dobro doći kod interpretacije dobivenih rezultata.
- Manja mogućnost ljudske greške. Potrebno je manje iskustvo ljudskog analitičara u procesu. Klase koje su ovako definirane uvijek su jednako uniformne, dok kod nadzirane klasifikacije može doći do problema uslijed neprecizno definiranja testnih uzoraka.
- Jedinственe klase prepoznate su kao zasebne jedinice. Obično prostorno manje jedinice koje mogu proći nezamjećeno u procesu nadzirane klasifikacije, gdje ih se uklapa u pogrešnu susjednu klasu.

Međutim, postoji i niz nedostataka na koje treba obratiti pozornost, uglavnom proizašlih iz oslanjanja na prirodna grupiranja koja je nekada teško uklopiti u informacijske klase od interesa :

- Identifikacija spektralno homogenih klasa koje u prirodi nisu slične.
- Analitičar ima ograničenu kontrolu nad specifičnim identitetima i izborom klasa. Teško su povezive sa istim klasama na različitim snimkama.
- Spektralne značajke nekih informacijskih klasa mijenjaju se s vremenom, tj. veze između informacijskih i spektralnih klasa nisu konstantne i teško su prenosive.

Općeniti način na koji klasifikatori određuju klase po spektralnim značajkama je pomoću separabilnosti. Kod nenadzirane klasifikacije mjere se tisuće udaljenosti između različitih kombinacija piksela kako bi se odredila pripadnost različitim klasama. Najčešći klasifikator u ovoj skupini je euklidska udaljenost.



Slika 4.2. Ilustracija mjerenja euklidske udaljenosti, [1]

Na lijevoj strani ilustracije prikazan je način mjerenja spektralne udaljenosti između 2 piksela označena sa A i B. Formula je sljedeća:

$$D_{ab} = [\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1.)$$

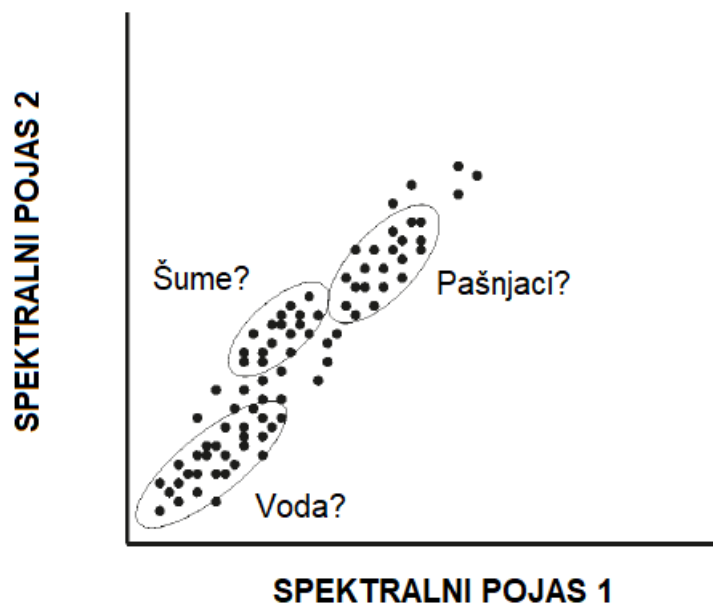
Esencijalno, euklidska udaljenost preko Pitagorinog poučka računa spektralnu udaljenosti između svih piksela u svim kombinacijama pojaseva i po rezultatima određuje svjetlina kojih od piksela je dovoljno „blizu“ da bi oni pripadali istoj klasi.

Na desnoj strani ilustracije, dodan je i piksel C. Mjerenjima vidimo da je spektralno bliži pikselu A i da bi prije pripadao njegovoj klasi nego klasi piksela B.

Postupak nenadzirane klasifikacije počinje odabirom traženog broja klasa. Odabrana vrijednost može proizlaziti iz analitičarovog poznavanja scene ili tražene vrijednosti od strane krajnjeg korisnika [1].

Klasifikacija počinje nasumičnim odabirom nekoliko piksela kao središnjim vrijednostima klastera, postupak odrađuje računalni algoritam kako bi se osiguralo neuplitanje analitičara. Klasifikator tada na gore opisani način računa udaljenosti između centara klastera i svih piksela slike, smještajući ih u najbližije klase. Postupak se iterativno ponavlja sa novim nasumično odabranim srednjim vrijednostima dok se ne konvergira najoptimalnijem rješenju s obzirom na početno odabrani broj klasa.

Nakon što postupak završi, na analitičaru je da poveže ponuđene spektralne klase sa informacijskima u zadnjem koraku nenadzirane klasifikacije.



Slika 4.3. Povezivanje spektralnih klasa sa informacijskim klasama u nenadziranoj klasifikaciji, [1]

4.3. Nadzirana klasifikacija

Proces nadzirane klasifikacije možemo definirati kao postupak korištenja uzoraka poznatog identiteta kako bismo klasificirali piksele nepoznatog identiteta. Uzorci poznatog identiteta su oni pikseli koje intuitivno lako možemo povezati sa informacijskim klasama i oni su baza takozvanih *trening uzoraka* [1].

Analitičar na početku postupka definira trening uzorke. Uzorci moraju biti maksimalno reprezentativni za svoju klasu i što je više moguće homogeni. Ta područja trebala bi poslužiti algoritmu klasifikatora kao definicije spektralnih značajki koje će tražiti za odabranu klasu. Odabir ovih uzoraka prvi je i najvažniji korak u postupku nadzirane klasifikacije.

Prednosti ovakve vrste klasifikacije, u odnosu na ranije spomenutu nenadziranu su sljedeći:

- Analitičar ima potpunu kontrolu nad odabirom informacijskih klasa koje su podešene za specifičnu namjenu i prilagođene značajkama geografske regije.

- Broj i vrste klasa su predvidljivi i mogu se prilagođavati.
- Ne postoje poteškoće naknadnog povezivanja spektralnih klasa sa informacijskima.
- Netočno klasificirana snimka može se „ispraviti“ ponovnom definicijom trening uzoraka.

Također, proces ima i brojne moguće nedostatke:

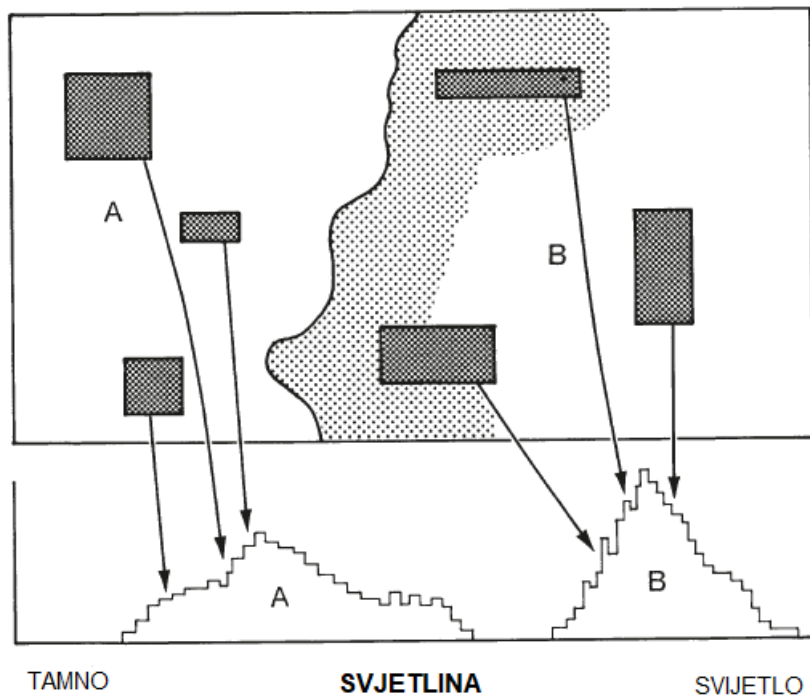
- Analitičar efektivno nameće strukturu klasifikacije podacima. Te definirane klase ne moraju se poklapati sa prirodnim klasama unutar podataka ili biti dobro definirane u multispektralnom prostoru.
- Trening uzorci definirani su isključivo na osnovi informacijskih kategorija, ne oslanjajući se na spektralne značajke.
- Ručni odabir trening uzoraka može biti dugotrajan i skup, pogotovo ako je područje koje treba klasificirati veliko.
- Klasifikacija zahtjeva vrlo iskusne analitičare, dobro upoznate sa područjem koje se promatra.

4.3.1. Značajke trening uzoraka

Ranije je spomenuto kako je pravilan odabir ovih područja snimke ključan korak u procesu nadzirane klasifikacije i upravo zato je bitno točno definirati kakvi trening uzorci moraju biti.

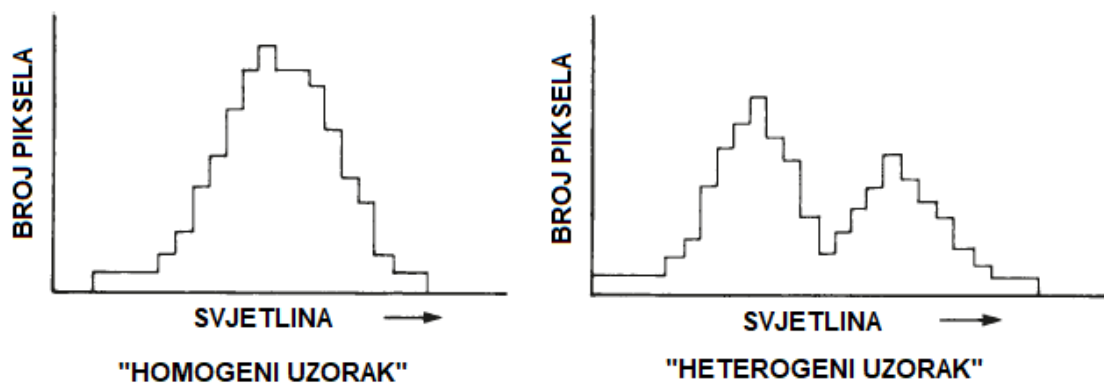
Uzorci se definiraju na digitalnoj snimci odabirući pravokutnik unutar područja za koje je analitičar siguran da pripada odgovarajućoj informacijskoj klasi. Kao pripremu za ovaj korak može biti nužno da se analitičar konzultira sa mapama ili zračnim snimkama interesnog područja ili čak izađe u terensku inspekciju. Mora biti upoznat ne samo sa područjem od interesa nego i sa namjenom konačnog klasificiranog proizvoda.

Bitna stavka je ukupan broj piksela koji je odabran za svaku kategoriju, kao općenito pravilo, preporuča se odabir barem 100 piksela po kategoriji [1].



Slika 4.4. Odabir trening uzoraka, [1]

Individualna izabrana područja, s druge strane, ne bi trebala biti prevelika, jer velika područja uključuju nepoželjne varijacije u spektralnim podacima. Bolje je izabrati više manjih područja. Joyce (1978.) preporuča da individualna područja budu veličine od 4 do 16 Ha i nikako više od 65 ha. Preporuča 10 do 40 piksela po odabranom trening području. Na slici 4.4. vidimo dobro pozicioniranje trening uzoraka (tamnih pravokutnika) unutar područja koje predstavljaju i njihovu ilustraciju histogramima.



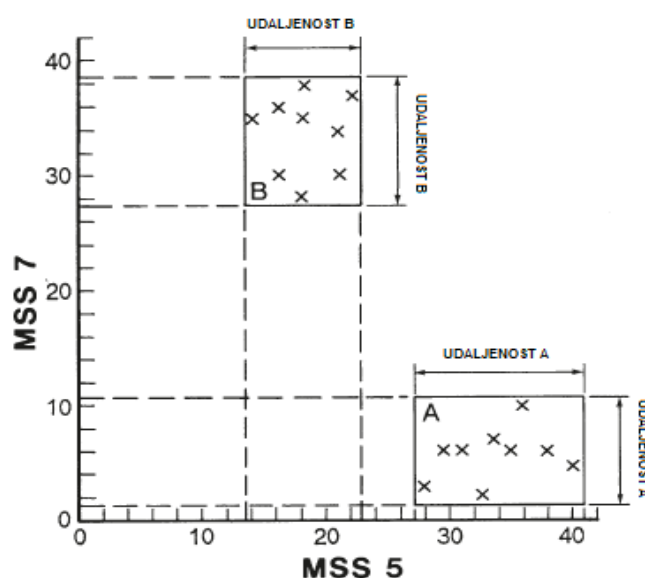
Slika 4.5. Homogeni i heterogeni trening podaci, [1]

Uz veličinu, brojnost i smještaj, najvažnija karakteristika trening uzoraka je uniformnost. Podaci unutar svakog trening uzorka morali bi pokazivati ujednačenu (homogenu) frekvencijsku distribuciju za svaki korišteni spektralni pojas [1].

Scholz (1979.) i Histon (1980.) eksperimentalno su otkrili da je odabir trening uzoraka jednako važan, ako ne i važniji od obabira metode klasifikacije. Utvrdili su da će rezultati klasifikacije tek neznatno varirati ako uz konstantne trening uzorke variramo metode klasifikacije. Međutim, različito definirani trening uzorci za istu korištenu metodu mogu dati vrlo različite rezultate.

4.3.2. Metode nadzirane klasifikacije

Velik broj različitih metoda kroz godine je razvijen s ciljem da se što bolje implementira osnovni cilj nadzirane klasifikacije. Sve one koriste informacije proizašle iz trening uzoraka kao bazu za klasifikaciju ostalih piksela scene.

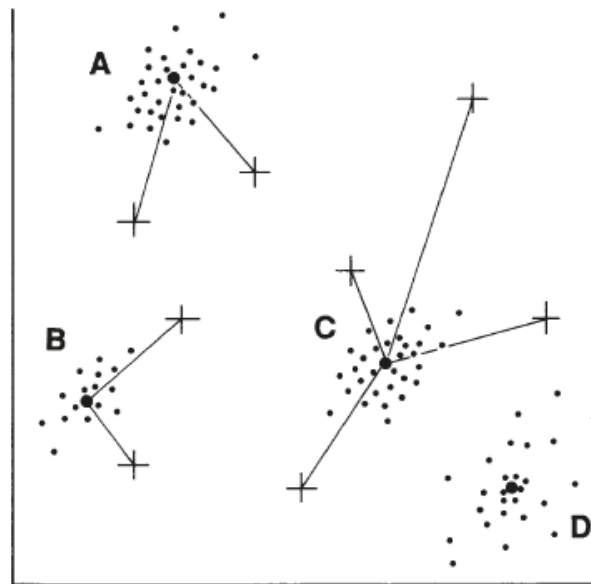


Slika 4.6. Metoda Paralelepipeda, [1]

U **metodi paralelepipeda**, u startu, iz trening uzoraka klasifikator gradi multidimenzionalni prostor. Granice odluke definiraju se standardnim devijacijama vrijednosti unutar trening uzoraka. Spektralne značajke neklasificiranih piksela proicirane su u taj prostor i traži se presjek sa poligonima unaprijed određenih klasa.

Na slici 4.6. prikazan je jednostavan primjer sa dva pojasa multispektralnog skenera Landsat MSS (spektralni pojasevi 5 i 7), ali isto se može primijeniti na koliko je god pojaseva ili klasa potrebno [1].

Metoda je komputacijski jednostavna uzimajući u obzir varijance u trening uzorcima, ali problemi mogu nastati ako se primjerice paralelepipedi preklapaju zbog korelacije [10].

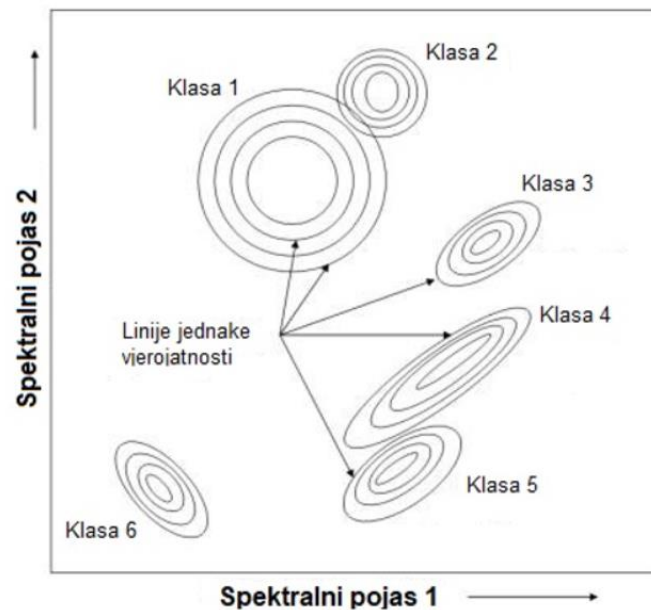


Slika 4.7. Metoda najmanje udaljenosti, [1]

Drugi primjer je ovaj pristup koji koristi centralne vrijednosti spektralnih podataka iz definiranih trening uzoraka. Spektralni podaci trening uzoraka projicirani su u multidimenzionalnom prostoru, slično kao što je ranije ilustrirano primjerom na slici 4.3., samo što se ovdje radi iz trening uzoraka, a ne „prirodno“ sličnih klastera koje definira program nenadzirane klasifikacije. Svaki pojedini klaster ovdje definira njegov centroid, obično srednja vrijednost svjetline za klasu. Kako se dalje razmatraju nedodjeljeni pikseli, mjere se multidimenzionalne udaljenosti do centroida i pikseli dodjeljuju onoj klase kojoj su „najbliže“ [1].

Matematički i računalno se ponovo radi o jednostavnoj metodi. Međutim, vrlo je neosjetljiva na različite varijance i kovarijance u spektralnom odzivu piksela u trening uzorcima. Neka informacijska klasa može imati dosta varijacije u spektralnom smislu i

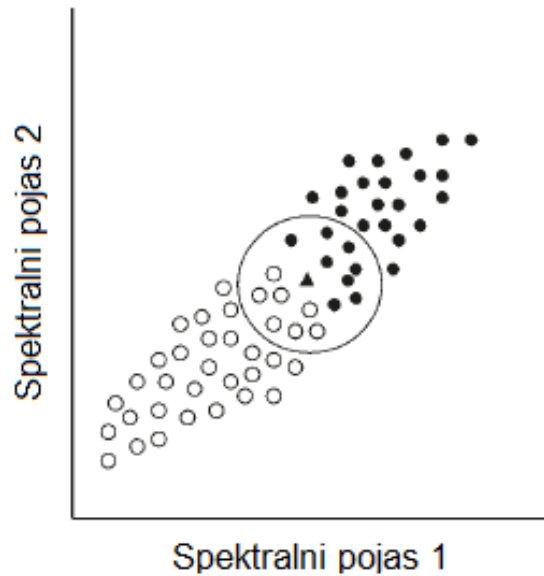
njena srednja vrijednost onda može klasifikator odvesti na „krivi trag“ kod odabira podobnih nerazvrstanih piksela [10].



Slika 4.8. Metoda najveće vjerojatnosti, [10]

Ideja iza **metode najveće vjerojatnosti** počinje iz činjenice da se u prirodi, i same informacijske klase koje pokušavamo rekreirati, sastoje od različitih nesavršenosti, tako da u startu teško možemo očekivati spektralnu čistoću na slikama. Dodatna spektralna varijabilnost dodana je kroz djelovanje atmosferskih, topografskih ili instrumentalnih efekata. Rezultat je nesavršena spektralna podjela za svaku klasu i u svakom spektralnom pojasu [1].

Za razliku od ranije spomenutih klasifikatora, ovaj kvantitativno uzima u obzir i varijancu (unutarnu varijabilnost spektralnog pojasa) i kovarijancu (sličnosti između pojaseva) u obzir i razmatra normalne distribucije za trening uzorke. Upravo ovaj opisani postupak i povećana točnost koja iz njega proizlazi, razlog je zašto je Metoda Najveće Vjerojatnosti jedna od najkorištenijih na polju daljinskih istraživanja [10].



Slika 4.9. Metoda k najbližih susjeda, [1]

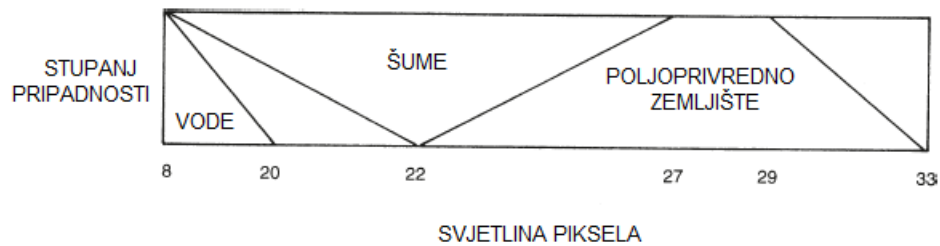
Metoda k najbližih susjeda (*k-nearest neighbours*, KNN) jednostavan je, ali učinkovit klasifikator na osnovi spektralne udaljenosti. Zahtjeva komplet trening uzoraka koji će biti reprezentativan za svaku klasu unutar slike. KNN procedura pregledava svaki piksel od interesa te identificira njegovih k -najbližih trening uzoraka, mjenjenih u multispektralnom prostoru. Vrijednost k odabire analitičar i obično je relativno mali cijeli broj. Promatrani piksel tada se dodjeljuje klasi koja se najviše pojavljuje unutar k -susjeda [1].

U primjeru na slici 4.9., promatrani piksel, tj. onaj koji je predmet klasifikacije, označen je trokutom. Od 15 (k) promatranih najbližih susjednih piksela, više ih pripada crnoj klasi, te je i „trokutasti“ piksel zato dodijeljen crnoj klasi.

Četiri gore spomenuta, i najčešće korištena, klasifikatora nazivaju se *Hard* klasifikatorima. U njihovom slučaju svaki piksel slike dodjeljuje se točno jednoj klasi, što u praksi može predstavljati problem ako cijelo područje terena koje pokriva piksel nije homogeno, tj. ne pripada cijelo jednoj homogenoj kategoriji. U tom slučaju uzet će se u obzir prosječna svjetlina za pokriveno područje i piksel može biti dodijeljen pogrešnoj podatkovnoj klasi.

Tom problemu pokušava doskočiti uporaba tzv. *Soft klasifikatora* ili „nejasnog grupiranja“ (en. Fuzzy clustering). Svaki piksel procjenjuje se posebnom *funkcijom*

pripadnosti koja onda određuje u kojem postotku određeni piksel pripada kojoj od unaprijed definiranih spektralnih klasa.

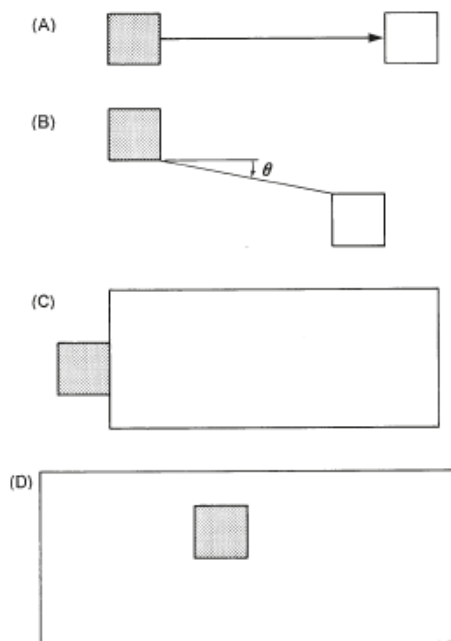


Slika 4.10. Metoda „nejasnog grupiranja“, [1]

Funkcije pripadnosti, na polju daljinskih istraživanja, izražene su iz eksperimentalnih ili trening podataka za svaku scenu koja se promatra. Dobivena funkcija pripadnosti opisuje odnos između pripadnosti određenoj klasi i svjetline piksela, najčešće u nekoliko spektralnih pojaseva. Dakle, dok tradicionalni hard klasifikator mora strogo označiti određeni piksel kao primjerice ili „šume“ ili „vode“, kod soft klasifikatora je dozvoljeno da isti piksel ima vrijednost pripadnosti klasi „šume“ od 0.7 i klasi „vode“ od 0.3 .

Na slici iznad ilustriran je jednostavan primjer djelovanja funkcije pripadnosti, na slučaju triju klasa podataka, razmatranih samo u jednom spektralnom pojasu. Na osi apscise prikazana je svjetlina piksela, dok os ordinata prikazuje stupanj pripadnosti određenoj klasi; od niske na dnu sa minimalnom vrijednosti 0, do visoke na vrhu dijagrama sa maksimalnom vrijednosti 1 (ili 100% pripadnosti). Primjerice klasa „poljoprivredno zemljište“ u ovom slučaju može sadržavati piksele najtamnije vrijednosti od 22 te najsvjetlije 33, iako se čisto poljoprivredno zemljište može naći samo između vrijednosti svjetline 27-29. Piksel vrijednosti 28 može pripadati samo „poljoprivrednom zemljištu“, dok piksel vrijednosti 24 može biti djelomično i u klasi „šume“.

Za kraj poglavlja, spomenuo bih i kontekstualnu klasifikaciju te objektno orijentiranu klasifikaciju kao svojevrsni dodatak na klasične nenadzirane klasifikatore. Radi se o klasifikatorima višeg reda. Njihov cilj je da pokušaju automatizirati i simulirati procese koje koristi čovjek kao „klasifikator“.



Slika 4.11. Kontekstualna klasifikacija, izvor: [1]

Na slici iznad ilustrirani su načini kao se može upotrijebiti kontekst u svrhe bolje klasifikacije. Kad govorimo o kontekstu, u ovoj primjeni, govorimo o informacijama koje možemo dobiti iz prostornih odnosa između piksela unutar snimke, bilo da su oni prethodno klasificirani ili ne. Može se uzeti u obzir udaljenost između piksela (A), smjer u kojem je jedan piksel smješten u odnosu na drugi (B), te važnost blizine (C) ili uključenosti (D) u procesu odlučivanja [1].

Objektno orijentirana klasifikacija, s druge strane, relativno je novi proces koji uključuje identifikaciju objekata ili segmenata na snimci koji se izdvajaju kontinuiranom teksturom, bojom i tonom (Green and Congalton, 2012). Ovaj pristup dozvoljava uzimanje u obzir oblika, veličine, pa čak i konteksta, uz spektralnu sličnost. Uzimanje u obzir grupe piksela kao pojedinačnih objekata posebno je korisno kod klasificiranja snimaka visoke rezolucije gdje primjerice sjene ili promjene u gustoći vegetacije mogu stvarati probleme kod piksel-po-piksel klasifikacije [11].

Snimke koje će biti klasificirane u ovom radu, u narednim poglavljima, nisu osobito visoke rezolucije, pa tako objektno orijentirani pristup, u ovom slučaju, ne bio u potpunosti učinkovit.

5. Klasifikacija infracrvene snimke

5.1. Opis rješenja zadatka

Praktični dio ovog rada klasifikacija je infracrvene snimke snimljene iz zraka.



Slika 5.1. Odsječak originalne snimke

Slika 5.1., iznad, prikazuje prvi kadar sirove snimke za obradu, preuzete iz projekta kojeg su zajednički radili znanstvenici sa Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu i Univerziteta u Banja Luci.

Zadatak je razviti kod u programskom sučelju Matlaba koji bi na snimci prepoznao i označio individualne pčele. Dobiveni video u prvom koraku trebalo je stabilizirati i prebaciti u .avi format koji Matlab može podržati i obraditi. Ovi koraci izvršeni su pomoću alata za obradu i poboljšanje video sadržaja – vReveal. Isti program iskorišten je za idući korak, a to je dijeljenje snimke na kadrove/slike koji su spremljeni u posebnu mapu, što je rezultiralo sa više od 1500 slika u različitim paletama boja koje su testirane u videu. Razvijanje traženog koda jednostavnije je bilo izvesti testirajući ga na individualnoj slici i za klasifikaciju je odabrana paleta boja prikazana na slici iznad, gdje su najtopliji elementi scene prikazani najsvjetlije – bijelom bojom ili u vrijednostima piksela od oko 255.

Slika je potom učitana u Matlab programsko sučelje i prebačena u paletu sivih tonova (en. grayscale) kako bi svaki piksel bio prikazan samo jednom vrijedošću. Originalno, slika je prikazana u 3 *kanala* – crvenom, plavom i zelenom i svaki piksel ima po 3 vrijednosti. Na ovaj način uzimaju se prosječne vrijednosti triju kanala i slika je mnogo pogodnija za daljnju klasifikaciju.



Slika 5.2. Odsječak snimke za klasifikaciju

Slika 5.2. prikazuje izgled slike nakon prvog koraka klasifikacije. Jasno je vidljivo kako su pčele najsvjetliji, tj. najtopliji objekti scene i to je smjer u kojem klasifikacija logično nastavlja. Utvrđeno je da je dovoljan interval koji će obuhvatiti sve pčele, onaj vrijednosti piksela od 200-250.

Ako u kodu zadamo da zelenom bojom budu označeni svi takvi pikseli, klasificirana slika izgleda ovako:



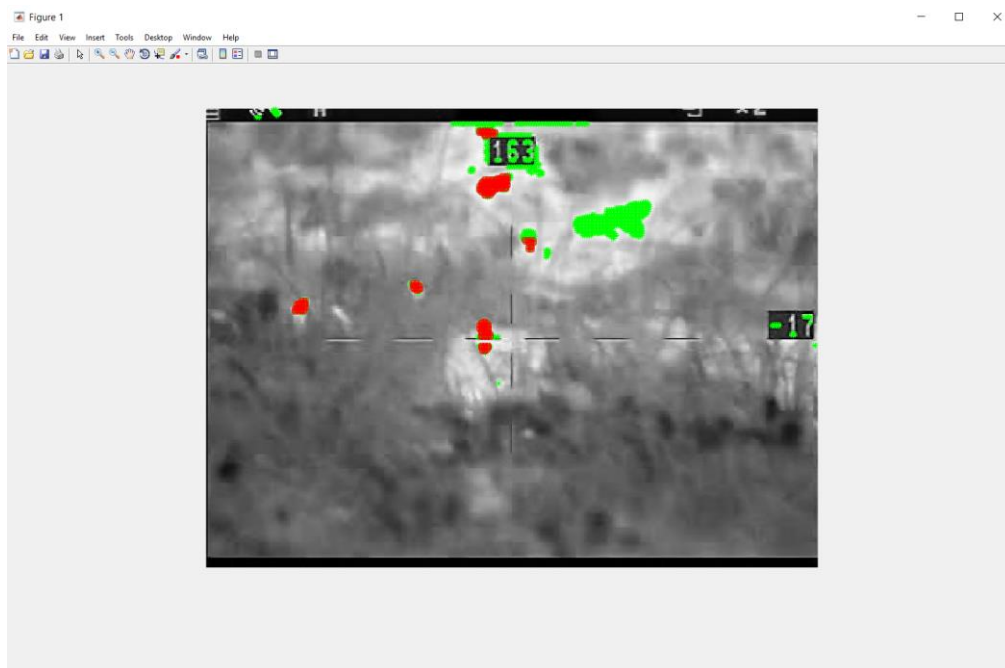
Slika 5.3. Snimka sa označenim najsvjetlijim područjima

Vidimo da su sve pčele označene, ali također da su označena i druga, mahom veća područja, koja sigurno nisu pčele, kao i mjerni brojevi na rubovima slike koji su bijele boje. Razvijanje koda nastavlja se u smjeru isključivanja neželjenih područja.

Utvrđeno je da se pčele na snimci pojavljuju pretežito kao matrice najsvjetlijih piksela veličine otprilike 3x3. Uključi li se to u klasifikaciju, mjerni brojevi na rubovima prestaju predstavljati problem jer su znatno uži od zadanih dimenzija. Ali s druge strane, veliko područje u gornjem desnom dijelu scene ostaje. Radi se vjerojatno o kamenom tlu koje se jako zagrijava tijekom sunčanog dana i izdvaja se kao vrlo svijetlo/toplo područje, temperature preko 30 °C. Matlab tamo nalazi nekoliko spojenih matrica dimenzija 3x3 najsvjetlijih piksela.

Kao rješenje, odlučeno je da cijelo područje bude isključeno iz klasifikacije. U ovom kadru, gledano na slici 5.1. ili 5.2., najbolje vidimo kako u spornom području nema pčela, a takva situacija se nastavlja i u idućih stotinjak kadrova koji se razmatraju u okviru ovog rada. Tako da se apsolutno isključivanje ovog područja od oko 800 piksela u površini, pokazuje kao poprilično sretno i elegantno rješenje.

Primjenjujući spomenute korekcije, dolazimo do sljedeće situacije:



Slika 5.4. Preklopljeni prvi i drugi dio klasifikacije

Na slici iznad, ilustracije radi, ostavljena je situacija iz prvog dijela klasifikacije (sa Slike 5.3.) – dijelovi označeni zelenom bojom, i konačno rješenje koje je ovdje prikazano crvenim oznakama. Vidimo kako su problematična područja koja su ranije spominjana, uspješno isključena i da su crveno označene uglavnom samo pčele.



Slika 5.5. Konačno rješenje klasifikacije

Na slici 5.5. vidimo i konačno rješenje primjene koda klasifikacije. Zadatak je bio točno i cjelovito izdvojiti pčele, što je u velikoj mjeri dobro odrađeno. No, i dalje se primjećuje nekoliko manjih nedostataka.

Manji svjetli/topli dijelovi terena i dalje mogu ostati označeni na snimci i biti pogrešno klasificirani. Također ostaje moguć i slučaj da manji dio pčela povremeno ne bude prepoznat. To će se dogoditi u slučajevima kada je pčela udaljenija od kamere i na slici zauzima manje od 3x3 piksela ili u slučaju koji je vidljiv i u ovom kadru – detalj desno od krajnje lijevo označene pčele; gdje pčela izrazito brzo prolazi kroz kadar i zbog nedostataka infracrvene kamere biva izdužena i tako neprepoznata od strane klasifikatora.

Na kraju klasifikacije, obrađene slike povezane su u video, kao svojevrsni konačan rezultat rješavanja zadanog zadatka rada.

5.2. Točnost klasifikacije

Slika koja čini prvi kadar konačnog videa detaljno je secirana u sklopu potpoglavlja 5.1, a ostatak obrađenih snimaka bit će spomenut u ovom, gdje će točnost cjelokupne klasifikacije biti evaluirana.

Evaluaciju točnosti predstavljam tablično, gdje će svaka uključena i obrađena snimka biti procjenjena po broju opažanih nasuprot klasifikatorskim kodom označenih pčela.

Također, uključen je i stupac sa netočno klasificiranim područjima, onima koja su označena kao pčele na osnovu njihove topline i veličine, a na snimci nisu pomična i možemo ustvrditi kako nisu pčele. Na osnovu tih podataka – opažane pčele, klasificirane pčele i netočno klasificirana područja – svakoj snimci posebno, kao i kasnije videu u cjelini, bit će određena točnost u dvije kategorije. Prva kategorija je točnost „pronalaska“ odgovarajućeg broja pčela u kadru, a druga je cjelokupna točnost slike koja uključuje i netočno klasificirana područja po sljedećoj formuli:

$$\frac{\text{BROJ KLASIFICIRANIH PČELA}}{\text{OPAŽANI BROJ PČELA+BROJ NETOČNO KLASIFICIRANIH PODRUČJA}} \times 100 [\%] \quad (5.1)$$

Tablica 5.1. Točnost klasifikacije

Redni broj snimke	Opazani broj pčela	Broj klasificiranih pčela	Broj netočno klasificiranih područja	Točnost klasifikacije pčela [%]	Ukupna točnost klasifikacije [%]
1	5	4	2	80,00	57,14
2	5	4	2	80,00	57,14
3	5	5	1	100,00	83,33
4	5	4	2	80,00	57,14
5	5	5	3	100,00	62,50
6	5	5	4	100,00	55,56
7	4	4	3	100,00	57,14
8	4	4	3	100,00	57,14
9	5	5	4	100,00	55,56
10	5	4	4	80,00	44,44
11	5	4	4	80,00	44,44
12	5	5	4	100,00	55,56
13	6	6	4	100,00	60,00
14	6	6	4	100,00	60,00
15	6	6	4	100,00	60,00
16	6	6	4	100,00	60,00
17	6	6	5	100,00	54,55
18	7	7	5	100,00	58,33
19	7	7	4	100,00	63,64
20	6	6	4	100,00	60,00
21	7	7	4	100,00	63,64
22	7	7	5	100,00	58,33
23	6	6	3	100,00	66,67
24	7	7	3	100,00	70,00
25	6	6	3	100,00	66,67
26	7	7	5	100,00	58,33
27	6	6	2	100,00	75,00
28	6	6	5	100,00	54,55
29	7	7	3	100,00	70,00
30	6	6	3	100,00	66,67

31	6	6	4	100,00	60,00
32	6	6	4	100,00	60,00
33	7	7	4	100,00	63,64
34	7	7	6	100,00	53,85
35	8	8	7	100,00	53,33
36	8	8	6	100,00	57,14
37	8	8	4	100,00	66,67
38	8	8	4	100,00	66,67
39	6	6	3	100,00	66,67
40	7	7	3	100,00	70,00
41	7	7	4	100,00	63,64
42	8	8	2	100,00	80,00
43	7	7	3	100,00	70,00
44	7	7	4	100,00	63,64
45	8	8	4	100,00	66,67
46	8	8	3	100,00	72,73
47	7	5	4	71,43	45,45
48	7	6	6	85,71	46,15
49	8	7	4	87,50	58,33
50	6	4	4	66,67	40,00
51	6	4	3	66,67	44,44
52	9	8	4	88,89	61,54
53	9	9	4	100,00	69,23
54	8	8	3	100,00	72,73
55	8	8	3	100,00	72,73
56	7	5	3	71,43	50,00
57	7	5	3	71,43	50,00
58	6	6	2	100,00	75,00
59	6	5	2	83,33	62,50
60	7	6	3	85,71	60,00
61	7	6	4	85,71	54,55
62	7	6	2	85,71	66,67
63	8	8	2	100,00	80,00
64	8	8	2	100,00	80,00
65	8	8	2	100,00	80,00

66	8	8	2	100,00	80,00
67	8	8	2	100,00	80,00
68	7	6	2	85,71	66,67
69	9	9	3	100,00	75,00
70	9	9	4	100,00	69,23
			UKUPNA TOČNOST:	94,80	62,69

6. Zaključak

Uzmemo li u obzir analizu iz prethodnog poglavlja i utvrđenu točnost klasifikacije pčela od gotovo 95%, nameće se zaključak kako je zadatak besprijekorno odrađen i kako je Matlab idealan alat za termodetekciju pčela u pokretu. Međutim, vjerujem da puno više govori drugi „rezultat“, tj. ukupna točnost klasifikacije od 62,69%. Ne postoji niti jedna razmatrana snimka na kojoj su označene isključivo pčele i to je podatak o kojem treba dodatno razmisliti. Na sceni će se uvijek nalaziti neko područje koje ulazi u interval toplina i dimenzija postavljenih za pčele i bilo bi ih kontraproduktivno sve ručno isključivati. Također, znamo da su snimka i njena razlučivost od 288x384 piksela daleko od savršenih i kako nije bilo ni realno očekivati savršene rezultate. Završna ocjena uspješnosti, konačno, trebala bi biti negdje između ove dvije teze. Matlab se još jednom pokazao kao moćan, iako jednostavan alat i svakako može biti uspješno korišten u svrhu klasifikacije termalnih dugovalnih snimaka.

Termografija kao takva postaje vrlo relevantna, kako se termalno snimanje i praćenje temperature tijela u velikoj mjeri stavlja u fokus javnosti uslijed globalne pandemije. Posljedično, svako istraživanje na tom polju može se smatrati korisnim.

Na kraju mogu istaknuti kako bi u ovu svrhu vjerojatno bilo ispravnije koristiti neku vrstu višespektralnog snimanja, gdje bi se različiti materijali mogli lakše separirati ako su opažani u više od jednog spektralnog pojasa. Ovako, koristimo li samo izračenu ili emitiranu termalnu energiju objekata kao sredstvo klasifikacije, uvijek će biti nesavršenosti u konačnim rezultatima.

Literatura

- [1] J. B. Campbell, R. H. Wayne Introduction to Remote Sensing – fifth edition: The Guilford Press; 2011.
- [2] R. C. Olsen Remote Sensing from Air and Space: SPIE—The International Society for Optical Engineering; 2007.
- [3] M. A. Reddy Textbook of Remote Sensing and Geographical Information Systems – third edition: BS Publications; 2008.
- [4] <https://www.coursehero.com/sg/general-chemistry/electromagnetic-energy/> (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [5] [www.irb.hr > users > capan > kv pr sv](http://www.irb.hr/users/capan/kv_pr_sv) (Pristupljeno: kolovoz 2019.)
- [6] M. Niaz, S. Klassen, B. McMillan, D. Metz Reconstruction of the History of the Photoelectric Effect and its Implications for General Physics Textbooks: Science Education; 2010.
- [7] <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=spektar+elektromagnetskog+zra%C4%8Denja> (Pristupljeno: rujan 2019.)
- [8] <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=27417> (Pristupljeno: rujan 2019.)
- [9] <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/Infrared> (Pristupljeno: rujan 2019.)
- [10] ZIN 2017 folije s predavanja
- [11] <https://www.e-education.psu.edu/geog883/node/523> (Pristupljeno: kolovoz 2020.)

Popis slika

SLIKA 2.1. POLARIZACIJA U ELEKTROMAGNETSKOM VALU [1]	3
SLIKA 2.2. OBILJEŽJA ELEKTROMAGNETSKOG VALA, [4].....	4
SLIKA 2.3. SPEKTAR ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA, IZVOR: [7].....	6
SLIKA 2.4. SHEMA UREĐAJA ZA MJERENJE FOTOELEKTRIČNOG EFEKTA, [2]	9
SLIKA 2.5. WIENOV ZAKON POMAKA, [1]	13
SLIKA 2.6. INTERAKCIJE ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA S ATMOSFEROM, [1].....	14
SLIKA 2.7. RAYLEIGHOVO RASPRŠENJE, [1].....	15
SLIKA 2.8. RASPRŠENJE USLIJED SUDARA SA ATMOSFERSKIM ČESTICAMA, IZVOR: [1].....	16
SLIKA 2.9. REFRAKCIJA, [2]	17
SLIKA 2.10. RASPRŠENJE UPADNOG ZRAČENJA, [1].....	19
SLIKA 2.11. TRANSMISIVNOST, IZVOR: [1]	20
SLIKA 3.1. KRIVULJE CRNIH TIJELA ZA SUNCE I ZEMLJINU POVRŠINU, [10].....	22
SLIKA 3.2. ATMOSFERSKI PROZORI U INFRACRVENOM PODRUČJU, [9]	23
SLIKA 3.3. DNEVNE FLUKTUACIJE TEMPERATURE, [2]	26
SLIKA 4.1. NUMERIČKA I KLASIFICIRANA SLIKA, [1]	27
SLIKA 4.2. ILUSTRACIJA MJERENJA EUKLIDSKE UDALJENOSTI, [1].....	30
SLIKA 4.3. POVEZIVANJE SPEKTRALNIH KLASA SA INFORMACIJSKIM KLASAMA U NENADZIRANOJ KLASIFIKACIJI, [1]	31
SLIKA 4.4. ODABIR TRENING UZORAKA, [1]	33
SLIKA 4.5. HOMOGENI I HETEROGENI TRENING PODACI, [1].....	33
SLIKA 4.6. METODA PARALELEPIPEDA, [1]	34
SLIKA 4.7. METODA NAJMANJE UDALJENOSTI, [1].....	35
SLIKA 4.8. METODA NAJVEĆE VJEROJATNOSTI, [10].....	36
SLIKA 4.9. METODA K NAJBLIŽIH SUSJEDA, [1].....	37
SLIKA 4.10. METODA „NEJASNOG GRUPIRANJA“, [1].....	38
SLIKA 4.11. KONTEKSTUALNA KLASIFIKACIJA, IZVOR: [1].....	39
SLIKA 5.1. ODSJEČAK ORIGINALNE SNIMKE	40
SLIKA 5.2. ODSJEČAK SNIMKE ZA KLASIFIKACIJU	41
SLIKA 5.3. SNIMKA SA OZNAČENIM NAJSVJETLIJIM PODRUČJIMA.....	42
SLIKA 5.4. PREKLOPLJENI PRVI I DRUGI DIO KLASIFIKACIJE.....	43
SLIKA 5.5. KONAČNO RJEŠENJE KLASIFIKACIJE	43

Popis tablica

TABLICA 2.1. JEDINICE DULJINE NA POLJU DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA, [1]	5
TABLICA 2.2. JEDINICE FREKVENCIJE NA POLJU DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA, [1]	5
TABLICA 2.3. PODRUČJA SPEKTRA ELEKTROMAGNETSKOG ZRAČENJA U DALJINSKIM ISTRAŽIVANJIMA [3].....	6
TABLICA 2.4. NAJVAŽNIJI ATMOSFERSKI PROZORI, [1]	19
TABLICA 3.1. PODJELA INFRACRVENG SPEKTRA, [9].....	21
TABLICA 3.2. TOPLINSKI PARAMETRI RAZLIČITIH MATERIJALA, [2]	25
TABLICA 5.1. TOČNOST KLASIFIKACIJE.....	45

Prilog: Matlab kod

```
clear all;

% definiranje direktorija u kojem se nalaze slike

images = dir('C:\Users\Mislav\Desktop\pcele_video_slike');

for k=3:length(images)

    close all;

    image_name=images(k).name;

% učitavanje svih slika iz foldera

img = imread(fullfile('C:\Users\Mislav\Desktop\pcele_video_slike\', image_name));

img_gray =rgb2gray(img);

figure(k-2);

imshow(img_gray);

    grid on;

    hold on;

% broj redaka i stupaca u slici

img_row = size(img_gray,1);

img_col = size(img_gray,2);

% maximum slike

max_img = max(img_gray(:));

% pozicije maximuma (svaka pozicija na kojoj je pixel svjetliji od 250)

[rowsOfMax colsOfMax] = find(img_gray >= (max_img-5));

    max_rowsOfMax = max(rowsOfMax);

    max_colsOfMax = max(colsOfMax);

% veličina matrice u kojima se nalaze maximumi
```

```
size_row_max = size(rowsOfMax, 1);
```

```
size_col_max = size(colsOfMax, 1);
```

```
% kreiranje nulmatrice veličine slike
```

```
max_mat = zeros(img_row, img_col);
```

```
% punjenje vrijednosti 1 na pozicije max u nulmatricu
```

```
for i=1:size_row_max
```

```
    pos_row = rowsOfMax(i);
```

```
    pos_col = colsOfMax(i);
```

```
    max_mat(pos_row, pos_col) = 1;
```

```
        %scatter(pos_col, pos_row, 'g*');
```

```
end
```

```
% definiranje pčela kao matrica veličine otprilike 3x3
```

```
mat_B = ones(3,3);
```

```
mat_out1 = ones(8,4);
```

```
mat_out2 = ones(4,8);
```

```
% pronađi sve dijelove gdje se maximumi nalaze u matricama 3x3
```

```
[idx, is_bee] = findarray(max_mat, mat_B);
```

```
% pronađi sve gdje se maximumi nalaze u matricama 8x4 i 4x8 - preveliko da bi bila pčela
```

```
[idx_out1, not_bee1] = findarray(max_mat, mat_out1);
```

```
[idx_out2, not_bee2] = findarray(max_mat, mat_out2);
```

```
% is_bee, not_bee1 i not_bee2 su sve jednake veličine
```

```
% ako je vrijednost 1 u paru is_bee i not_bee1 ili u paru is_bee i not_bee2
```

% ta pozicija nije pčela i postavi vrijednost na toj poziciji u 0

```
for i=1:size(is_bee,1)
```

```
    for j=1:size(is_bee,2)
```

% dodatno maskiranje velikog svijetlog područja na slici

```
        if(is_bee(i,j)==1 && i>=2 && i<=82 && j>=192 && j<=302)
```

```
            is_bee(i,j) = 0;
```

```
        end;
```

```
    end;
```

```
end;
```

% uklanja ostatke koji nisu eliminirani s 8x4 i 4x8 matricama

```
[idx,is_bee_final] = findarray(is_bee,mat_B);
```

% ozači ono što je ostalo

```
for i=1:size(is_bee,1)
```

```
    for j=1:size(is_bee,2)
```

```
        if(is_bee(i,j)==1)
```

```
            scatter(j,i, 'r*');
```

```
        end;
```

```
    end;
```

```
end;
```

%spremanje klasificiranih slika u novi folder

%save_folder = ('C:\Users\Mislav\Desktop\test_slike50+')

```
saveas(figure(k), fullfile('C:\Users\Mislav\Desktop\pcele_video_slike+', image_name));
```

```
end;
```



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ diplomski rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj
visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu _____ diplomskog rada
pod naslovom _____

Klasifikacija termalnih infracrvenih snimaka iz zraka

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, _____ 25.11.2020. _____

Student/ica:

M. Vrbec

(potpis)