

Primljeno / Received: 15.09.2018.
Prihvaćeno / Accepted: 08.11.2018.

UDK 528.85
Pregledni naučni rad / Review article

RAZLIČITI NAČINI INTEGRACIJE PODATAKA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

DIFFERENT METHODS FOR REMOTE SENSING DATA INTEGRATION

Nedim Kulo

SAŽETAK

Daljinska istraživanja danas su nezaobilazan izvor informacija o površini Zemlje, prvenstveno satelitski sistemi daljinskih istraživanja. Dok se tradicionalno analiza podataka prikupljenih o određenom području bazirala na analizi podataka jednog satelitskoga snimka, danas na krilima tehnološke revolucije, koja je sa sobom donijela veoma dobru pokrivenost u prostornom, vremenskom i radiometrijskom smislu, analiza obuhvata vremenske setove podataka, kombinaciju (integraciju) podataka različitih senzora, kombiniranje snimaka različitih mjerila te bolju integraciju sa postojećim podacima i modelima. Integracija podataka različitih izvora postaje sve bitnija karika u sve više aspekata daljinskih istraživanja, a rezultati iste se sve više koriste u rješavanju svakodnevnih problema.

Ključne riječi: *Daljinska istraživanja, integracija, nivoi integracije, signal, piksel, karakteristike (značajke)*

ABSTRACT

Nowadays remote sensing is an indispensable source of information about Earth's surface, primarily satellite-based remote sensing systems. Traditionally, the analysis of data collected from a particular area was based on the analysis of the data of one satellite image. The technological revolution improved spatial, temporal and radiometric resolution of satellite images, which allowed time datasets analysis, combining (integrating) data from various sensors, combining images of different scales and better integration with existing data and models. The integration of data from different sources is becoming an increasingly important factor in numerous aspects of remote sensing, and the results of this technique are used in solving everyday problems.

Keywords: *Remote sensing, Data integration, Data integration levels, signal, pixel, features*

1 UVOD

U današnje dinamično doba kada tehnološka revolucija svoje benefite iskazuje kroz široko dostupne snimke Zemljine površine, bilo da se radi o satelitskim snimcima ili fotografijama nastalim iz zraka, društvo, odnosno akademska zajednica, državne institucije i agencije, ali i privatne kompanije, teže da iz istih dobiju što više korisnih informacija. Te informacije ne samo da se ogledaju u rezultatima različitih istraživanja koje sprovode univerziteti i istraživačke agencije širom svijeta, već su i direktna posljedica upotrebe pomenutih snimaka u svrhe planiranja, različitih analiza, studija, određivanja pokrova (eng. *Land Cover Use*) te kartiranja površine Zemlje.

Rastući broj gore spomenutih snimaka Zemljine površine direktna je posljedica daljinskih istraživanja (eng. *Remote Sensing*), koja su danas nezaobilazna metoda prikupljanja podataka. Govoreći o daljinskim istraživanjima Lillesand, Kiefer i Chipman (2004) navode da je riječ o nauci i načinu (vještini) prikupljanja informacija o predmetima, područjima ili različitim fenomenima kroz analizu podataka koji su dobiveni uz pomoć uređaja koji nije u direktnom kontaktu sa predmetom, područjem ili fenomenom koji je od interesa. Općenito govoreći, sistemi za daljinska istraživanja, naročito oni satelitski, pružaju ponavljajući i konzistentan pogled na Zemlju, a kako bi zadovoljili različite potrebe nude širok spektar prostornih, spektralnih, radiometrijskih i vremenskih rezolucija. U prošlosti, podaci, odnosno snimci, bili su dostupni u samo nekoliko prostornih i spektralnih rezolucija, dok danas na raspolaganju postoje snimci čija prostorna rezolucija varira u vrijednostima manjim od jednog metra pa do nekoliko kilometara. Naravno, ovakve snimke prati i sve bolja (finija) spektralna rezolucija.

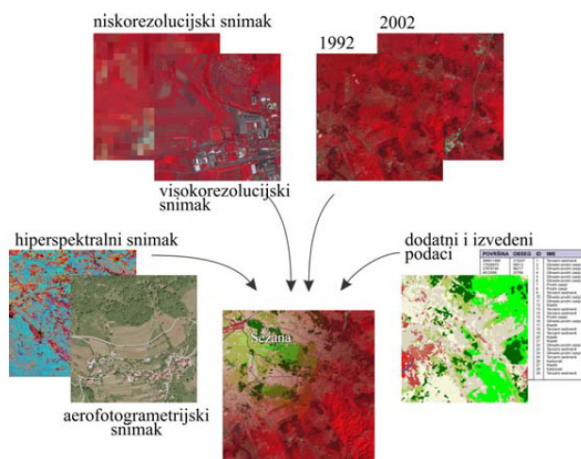
Tradicionalno, analiza podataka prikupljenih o određenom području bila je bazirana na analizi podataka jednog satelitskoga snimka. Pomenuta tehnološka revolucija je sa sobom donijela veoma dobru pokrivenost u prostornom, vremenskom i radiometrijskom smislu, što za rezultat ima mogućnost analize vremenskih setova podataka, kombinaciju (integraciju) podataka različitih senzora, kombinovanje snimaka različitih mjerila te bolju integraciju sa postojećim podacima i modelima. Iz navedenoga, zaključuje se da integracija (povezivanje) podataka postaje sve bitnija karika u sve više aspekata daljinskih istraživanja. U ovom radu će biti prikazane različite načini integracije podataka daljinskih istraživanja, kao i načini procjene kvalitete integriranih snimaka.

2 INTEGRACIJA PODATAKA DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

„Tehnike integracije podataka kombinuju podatke iz različitih izvora, te njima pripadajuće informacije iz pridruženih baza podataka, u svrhu poboljšanja tačnosti i mogućnosti donošenja boljih zaključaka nego li je to moguće na osnovu podataka iz samo jednog izvora“ (Universität Bonn, 2018).

O važnosti integracije podataka daljinskih istraživanja, odnosno o njenoj ulozi pri interpretaciji i analizi, svjedoči i postojanje posebne interesne grupe 'Data Fusion', osnovane 1996. godine od

strane Evropske asocijacije laboratorija za daljinska istraživanja (eng. *European Association of Remote Sensing Laboratories - EARSeL*). Ova interesna grupa doprinosi lakšem razumijevanju i korištenju integracije podataka u svrhe interpretacije i analize površine planete Zemlje i objekata na njoj. Svoje djelovanje grupa ispoljava kroz niz sastanaka koji se održavaju na redovnoj bazi, a bave se osnovama integracije podataka u daljinskim istraživanjima. U ovo se ubraja i niz redovnih, godišnjih međunarodnih konferencija pod nazivom 'Integracija podataka o Zemlji – spajanje tačkastih mjerenja, rasterskih podloga i podataka daljinskih istraživanja', od kojih je prva održana 1996. godine s ciljem da naučnoj zajednici ukaže na višestruke koristi koje nudi integracija podataka u domenu istraživanja i analize Zemljine površine (Ranchin, 2001).



Slika 1. Integracija podataka daljinskih istraživanja (Oštir i Mulahusić, 2014).

Općenito govoreći, integracija podataka daljinskih istraživanja koji nastaju kao rezultat djelovanja različitih senzora, može se izvršiti na različitim nivoima reprezentacije, i to na *nivou signala* (eng. *Signal level of representation*), *piksela* (eng. *Pixel level of representation*), *karakteristika tj. značajki* (eng. *Feature level of representation*) ili na *nivou odluke* (eng. *Decision level of representation*). Pri integraciji podataka na *nivou signala*, signali sa različitih senzora se kombinuju kako bi se kreirao novi signal koji ima bolji odnos signal-šum, odnosno signal-to-noise ratio¹ (S/N ili SNR) nego originalni signali. Tehnike koje se koriste pri ovom nivou integracije obično podrazumjevaju klasične metode detekcije i procjene. Ukoliko podaci nisu srazmjerni, integracija se mora izvršiti na višem nivou. Integracija na *nivou piksela* se sastoji od spajanja podataka različitih snimaka na bazi, odnosno principu piksel po piksel, kako bi se poboljšali rezultati obrade snimka, kao npr. u slučaju segmentacije² snimka. Integracija podataka na *nivou karakteristika (značajki)* se sastoji od spajanja određenih karakteristika koje su izdvojene sa različitih snimaka, ili iz različitih signala. Pri ovom nivou integracije, karakteristike se uzimaju (izvlače) iz opažanja sa različitim sensorima, zatim se spajaju u

¹ Odnos signal-šum je mjera koja se koristi kako bi se pokazao odnos nivoa željenog signala sa nivoom pozadinskog šuma (smetnje). Definiše se kao odnos jačine signala u odnosu na jačinu šuma, i izražava se u decibelima (dB). Npr. odnos veći od 1:1 (viši od 0 dB) ukazuje na to da je željeni signal snažniji od pozadinskog šuma (Wikipedia, 2018).

² Segmentacija je postupak dijeljenja snimka na homogena područja. U pravilu, segmentacija je prvi korak predmetno orijentisane klasifikacije (Oštir & Mulahusić, 2014).

povezani vektor karakteristika i klasificiraju koristeći se standardnim metodama klasifikacije. *Nivo odluke*, ili kako se još naziva *nivo simbola* (eng. *Symbol level*), podrazumjeva integraciju podataka na višem nivou apstrakcije. Bazira se na podacima pojedinačnih senzora nad kojima se vrši preliminarna klasifikacija, a zatim se integracija obavlja spajanjem izlaznih podataka preliminarnih klasifikacija. Odabir najboljeg nivoa integracije te najbolje metode integracije za određenu primjenu zavisi od nekoliko faktora, među kojima su kompleksnost problema klasifikacije, dostupni podaci te ciljevi koji se žele postići analizom (Solberg, 2006).

Integracija podataka zahtjeva sagledavanje mnogo aspekata. Tako, prije nego se i počne sa provođenjem procesa integracije potrebno je odgovoriti na određena pitanja (Pohl i van Genderen, 1998):

- Šta je cilj korisnika, odnosno u koju svrhu će se primjenjivati dobijeni rezultati?
- Koje vrste, odnosno tipovi podataka su najbolji za ostvarenje potreba korisnika?
- Koja je najprimjerenija tehnika integracije odabranih podataka?
- Koji su to potrebni koraci predobrade?
- Koja je to kombinacija podataka najbolja?

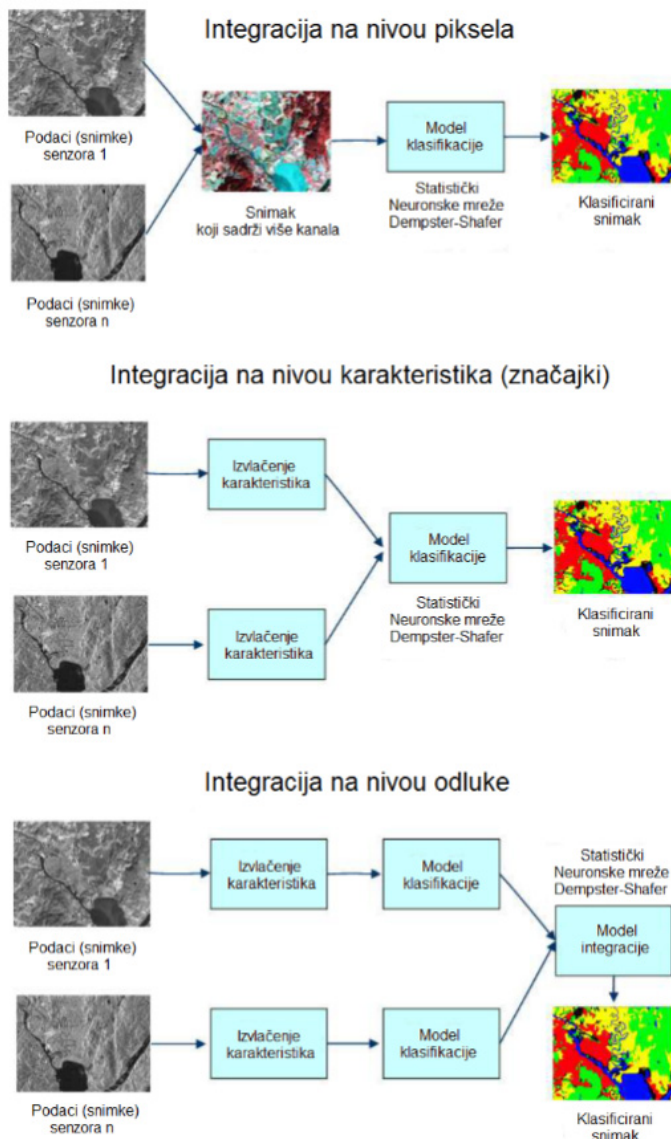
U zavisnosti od odabranoga nivoa integracije, definišu se i postupci predobrade koje treba provesti. Tako npr. u slučaju integracije podataka na nivou piksela geokodiranje³ je od vitalnog značaja. Isto tako, detalji poput geometrijskih modela, kontrolnih tačaka na površini Zemlje, digitalnog modela visina ili načina preuzrokovanja snimka, trebaju se dodatno razmotriti pri geometrijskim popravkama. Također, na izbor nivoa, odnosno načina integracije podataka, određeni uticaj imaju i kriteriji na osnovu koji se vrši ocjena tačnosti, odnosno procjena kvalitete integriranih snimaka. Nadalje, dalja primjena podataka koji će biti rezultat integracije može biti polazna osnova za odabir vremenskih uslova i godišnjeg doba iz kojeg izvorni snimci treba da se prikupe. Isto vrijedi i za samo područje na koje se odnose snimci. Naime, topografija područja od interesa ima bitnu ulogu pri integraciji podataka, kao i pokrovnost i način iskorištavanja zemljišta (prostora). I na poslijetku, jako bitno je izabrati prikladan način interpretacije kako bi podaci koji nastaju integracijom mogli biti iskorišteni u maksimalnom potencijalu (Pohl i van Genderen, 1998).

2.1 Koncepti (načini) integracije podataka daljinskih istraživanja

Kako navode Pohl i van Genderen (1998), snimci koje nastaju kao rezultat integracije podataka mogu omogućiti bolju interpretaciju i pouzdanije rezultate, budući da se konačni sud donosi na osnovu podataka integracije (kombinacije) podataka različitih karakteristika (svojstava). Kako je i ranije navedeno, cilj integracije jeste izvlačenje više informacija o određenom prostoru, objektu ili fenomenu nego što je to moguće na osnovu podataka samo jednog senzora. Dobar primjer za navedeno jeste integracija podataka prikupljenih senzorom koji je osjetljiv na vidljivo i infracrveno svjetlo (VIR) sa radarskim podacima prikupljenih senzorom sa sintetičkom radarskom antenom (SAR). Informacije prikupljene VIR senzorom zavise od

³ Geokodiranje; prostornom objektu dodijeljen podatak koji pruža informacije o geografskom položaju objekta u stvarnom okruženju (Oštir i Mulahusić, 2014).

višespektralnog odboja sunčeve svjetlosti područja od interesa, dok informacije koje prikuplja SAR zavise od karakteristika posmatrane površine te od samog radarskog signala. Integracija ove dvije vrste podataka vodi ka boljem razumijevanju (tumačenju) posmatrane površine, odnosno područja od interesa.



Slika 2. Modeli integracije podataka (Solberg, 2006) .

Najbitnije pitanje na koje se treba odgovoriti, kada je riječ o integraciji podataka daljinskih istraživanja, je vjerovatno slijedeće: *Koja je to svrha podataka koji će se dobiti integracijom?* Ako postoji odgovor na ovo pitanje nije teško odrediti koje to spektralne i prostorne rezolucije zadovoljavaju tražene kriterije, što dalje omogućava pravilan odabir podataka daljinskih

istraživanja koji će biti predmet integracije. Uz to, treba posvetiti pažnju i o dostupnosti pojedinih podataka. Dostupnost podataka (kada je riječ o podacima satelitskih sistema) ovisi, prije svega, o pokrivenosti Zemljine površine snimcima, o politici upravljanja koju sprovodi agencija nadležna za pojedini satelitski sistem, zatim o finansijskom aspektu naručioca, te o atmosferskim prilikama kao što je pokrivenost oblacima i sl. Nakon odabira podataka koji će biti predmet integracije, bira se odgovarajući nivo integracije podataka (Pohl i van Genderen, 1998).

2.1.1 Integracija podataka na nivou signala i piksela

Integracija na nivou piksela je široko prisutna u oblasti daljinskih istraživanja, medicine i računarske grafike. Iako ne postoji univerzalna metoda koja bi se mogla primjeniti na sve slučajeve integracije, tehnike koje se koriste mogu se razvrstati u dvije osnovne skupine: *tehnike koje se zasnivaju na boji i statističke*, odnosno *numeričke metode*. Integracija na nivou piksela je integracija koja se ubraja u najniže nivo obrade, i odnosi se na spajanje izmjerenih fizičkih parametara. Pri ovome koriste se rasterski podaci koji su, u najmanju ruku, registrovani jedni u odnosu na druge, a najčešće geokodirani. Geokodiranje je jako bitno jer greška u registraciji može izazvati neprirodne boje karakteristika na snimcima, što može uzrokovati pogrešnu interpretaciju istih (Pohl i van Genderen, 1998; Li, Kang, Fang, Hu, i Yin, 2017).

Iznad spomenuta skupina tehnika koje se zasnivaju na boji okarakterisana je kompozicijom tri slikovna kanala u RGB kolor prostoru⁴, kao i nešto naprednijim transformacijama zasnovanim na boji, kao što je transformacija HSI⁵. Statističke metode su razvijene na bazi statistike kanala senzora, i u ovu skupinu se ubrajaju postupci filtriranja i analize osnovnih komponenti. Numeričke metode podrazumjevaju aritmetičke operacije kao što su dijeljenje ili množenje, ili nešto kompleksnije postupke kao što je *wavelets* transformacija (Pohl i van Genderen, 1998).

U nastavku slijedi kratak pregled tehnika koje se koriste pri integraciji na nivou signala (1) i piksela (2), (3) i (4), a koje detaljnije opisuje Pohl i van Genderen (1998):

- (1) *Odabir kanala*: neke tehnike dozvoljavaju samo određeni broj kanala koji se mogu integrisati (npr. HSI), dok druge dozvoljavaju kombinovanje većeg broja ulaznih kanala. Statistička metoda odabira, tzv. *optimalni faktor indeksa* (eng. *Optimum Index Factor* - OIF), zasniva se na varijanci podataka, i opisuje ju slijedeći izraz:

$$OIF = \frac{\sum_{i=1}^3 \sigma_i}{\sum_{i=1}^3 |cc_j|} \quad (1)$$

⁴ RGB kolor prostor je koordinatni sistem koji nijanse boja predstavlja osnovnim bojama, tj. crvenom (R), zelenom (G) i plavom (B) (Oštir i Mulahusić, 2014).

⁵ Kolor prostor HSI je koordinatni sistem koji nijanse boje predstavlja sa intenzitetom (I), bojom (H) i zasićenošću (S) (Oštir i Mulahusić, 2014).

gdje je σ_i standardna devijacija numeričke vrijednosti kanala, a cc_j koeficijent korelacije između bilo koja dva od tri kanala. Drugi pristup bi bio odabir kanala koji su najpogodniji za određenu situaciju, tj. primjenu. Ovakav pristup zahtjeva *a priori* znanje operatora, a savjetovan je odabir tri kanala sa najvećim vrijednostima varijance. Jedan od načina za smanjenje broja kanala jeste i analiza osnovnih komponenti.

- (2) *Tehnike zasnovane na boji*: postoji veći broj tehnika koje spadaju u ovu skupinu. Općenito, matematički boje se mogu opisati na dva načina: preko vrijednosti triju koordinata (eng. *Tristimulus values*) ili putem hromatičnosti, tj. sjajnosti boje (eng. *Chromaticity*). Predstavljanje boja putem vrijednosti triju koordinata je zasnovano na tri različite spektralne krivulje. Svaka od njih može predstavljati filter ili zračenje spektra. Predstavljanje putem hromatičnosti se sastoji od svjetlosti objekta i dva koeficijenta osvjetljenja koji vode ka intenzitetu boje i zasićenosti boje. Npr. u RGB kolor prostoru boja se predstavlja pomoću tri koordinate, i ovakav način predstavljanja se najčešće koristi u računarskoj grafici. Prednost RGB kolor prostora je u njegovoj jednostavnosti, i obično se drugi načini predstavljanja boja transformišu u RGB kolor prostor da bi bili prikazani na ekranu.

RGB kolor kompoziti: aditivne primarne (osnovne) boje omogućavaju da se tri različite vrste informacija (npr. slikovni kanali) dodjele trima osnovnim bojama: crvenoj, zelenoj i plavoj. Zajedno, one stvaraju kolor kompozit koji se može prikazati na nekom od medija, odnosno na ekranu. Kompozit u boji olakšava interpretaciju višekanalnih snimaka zbog varijacija u boji na temelju vrijednosti u pojedinačnim kanalima. Sive vrijednosti, na osnovu kojih se odabire crvena, zelena i plava osvjetljenost, smještena je u tzv. preglednim tabelama⁶ (eng. *look up table* – LUT), koje su u biti osnova za generisanje prikaza na ekranu. Mogućnosti mijenjanja kompozita su dosta široke. Ovisno o odabranim ulaznim slikovnim kanalima, integrisani podaci će predstavljati različite karakteristike. Vrlo važno za kolor kompozite jeste distribucija dostupnih sivih vrijednosti na cjelokupan obim podataka.

Transformacija HSI: ovom transformacijom razdvajaju se prostorne (intenzitet) i spektralne (boja, zasićenost) informacije standardnog RGB snimka. HSI kolor prostor je bliži ljudskom poimanju boja. Jednačine ispod predstavljaju matematički kontekst HSI-a:

$$\begin{pmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

⁶ Pregledna tabela je tabela koja omogućava preslikavanje vrijednosti snimka u vrijednosti namijenjene za prikaz na ekranu. Pregledna tabela sadrži popis ulaznih i njima odgovarajućih izlaznih vrijednosti i djeluje kao sučelje između datoteke i ekrana (Oštir i Mulahusić, 2014).

$$H = \tan^{-1}\left(\frac{v_2}{v_1}\right), \quad S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}, \quad (3)$$

gdje su I intenzitet, v_1 i v_2 srednje varijable potrebne za transformaciju, H boja a S zasićenost. Postoje dva načina primjene HSI tehnike pri integraciji: direktni i zamjenski. Prvi znači transformacija tri slikovna kanala povezana sa intenzitetom, bojom i zasićenjem. Drugi se odnosi na transformaciju tro-kanalnih podataka koji se odnose na RGB kolor prostor u HSI kolor prostor, prilikom čega se razdvajaju boje u prosječne intenzitete. Nešto detaljnije o HSI transformaciji može se pronaći u (Oštir i Mulahusić, 2014). HSI transformacija je postala ustaljena tehnika u analizi snimaka. Koristi se prilikom poboljšanja boje podataka sa visokim nivoom korelacije, poboljšanju prostorne rezolucije, naglašavanju karakteristika i integraciji različitih skupova podataka. Korištenje HSI tehnike pri integraciji snimaka je višestruko, ali zasnovano je na jednom principu: zamjena jedne od tri komponente (intenzitet, boja ili zasićenje) jednog skupa podataka sa drugim snimkom. Najčešće se radi o zamjeni kanala koji odgovara intenzitetu. Zamjena intenziteta (sume svih kanala) sa vrijednosti bolje (više) prostorne rezolucije i obrnuta HSI transformacija vode ka kompozitnim kanalima, a to su linearne kombinacije originalnih višespektralnih kanala i visokorezolucionog panhromatskog kanala. Jedna od varijacija HSI načina integracije se odnosi na rastezanje komponenti boje i zasićenja, prije nego se one transformišu u RGB kolor prostor. Ovo se naziva rastezanje kontrasta, a HSI transformacija se može napraviti u jedan ili dva koraka. U slučaju transformacije u dva koraka rastezanje se može napraviti u pojedinačnim H, S i I kanalima. Kao rezultat javlja se integrirani snimak sa dobro naglašenim bojama.

Osvjetljenost-sjajnost boje: još jedan način prikaza boja, tzv. YIQ sistem, ima relativno jednostavnu vezu sa RGB kolor prostorom, i to bez da se gube informacije. Y, odnosno osvijetljenje, ne predstavlja ništa više do svjetlost panhromatske jednobojne snimke. Kombinuje crvene, zelene i plave signale proporcionalno osjetljivošću ljudskog oka na iste. I i Q komponente boje se odabiru u odnosu na kompatibilnost sa hardverom koji se koristi. I komponenta se dobije kao crvena minus cijan, a Q se određuje kao magenta minus zelena. Jednačine 4 i 5 prikazuju odnos između YIQ i RGB kolor prostora.

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 & 0.956 & 0.621 \\ 1.000 & -0.272 & -0.647 \\ 1.000 & -1.106 & -1.703 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Budući da su Y, I i Q komponente u manjem stepenu korelacije nego što su to RGB, ova vrsta transformacije nudi bolje mogućnosti za poboljšanje snimaka.

- (3) *Statističke i numeričke metode*: u ovu skupinu metoda spadaju tehnike koje se koriste matematičkim kombinacijama slikovnih kanala. U to spadaju sabiranje, oduzimanje, množenje i dijeljenje snimaka, kako i kombinacija nabrojanih operacija.

Aritmetičke kombinacije: pojedine kombinacije kanala mogu rezultirati izoštravanjem snimka, npr. boljom prostornom rezolucijom. Jedna od takvih kombinacija je i integracija panhromatskog kanala SPOT sistema sa višespektralnim Landsat TM podacima. *Sabiranje i množenje* snimaka jako je korisno ako je potrebno povećati kontrast snimka. Proces množenja snimka se može prikazati kao:

$$DN_f = A \cdot (w_1 DN_a + w_2 DN_b) + B, \quad (6)$$

$$DN_f = A \cdot DN_a \cdot DN_b + B, \quad (7)$$

gdje su A i B faktori povećanja, w_1 i w_2 težinski parametri, a DN_f , DN_a i DN_b digitalne numeričke vrijednosti konačnog integriranog snimka, te ulaznih snimaka a i b. Ovakva metoda uspješno se primjenjuje na integraciju Landsat TM i SPOT PAN podataka. Mogućnosti koje pruža množenje i sabiranje snimaka su dosta široke, a pravilan izbor težinskih koeficijenata može poboljšati rezultate. *Dijeljenje i oduzimanje* snimaka je jako korisno ukoliko se trebaju utvrditi promjene između dva snimka, pri čemu se obično više koristi metoda dijeljenja. Ukoliko se radi o oduzimanja snimaka, u nekim slučajevima razlike mogu biti negativne vrijednosti, stoga se dodaje određena konstanta kako bi se iste izbjegle. Treba imati na umu da razlike u nekim slučajevima ne upućuju na promjene, zbog faktora kao što su razlika u osvjetljenju, atmosferske prilike, kalibracija senzora ili registracija dvaju snimaka. Sve nabrojano može uticati na vrijednosti zabilježenog zračenja. Operacija oduzimanja se izvodi tako da kod para georeferensiranih snimaka vrijednosti piksela jednog snimka se oduzme od vrijednosti drugog. Rezultat je snimak, kod kojeg vrijednost 0 znači da među snimcima nije došlo do promjene, male vrijednosti znače male promjene a velike vrijednosti ukazuju na velike promjene. Opširnije o aritmetičkim operacijama se može pronaći u (Oštir i Mulahusić, 2014).

Analiza osnovnih komponenti (eng. *Principal component analysis – PCA*): se koristi u slučaju poboljšanja snimaka, kompresije snimaka, otkrivanja promjena digitalnim putem, kod prisustva višečasovnih podataka i prilikom integracije podataka. U pitanju je statistička metoda koja pretvara multivarijantni (viševarijantni) skup podataka koji su međusobno povezani u novi set nepovezanih linearnih kombinacija originalnih varijabli. Ovim se generiše novi set osa koje su međusobno ortogonalne. Analiza osnovnih komponenti se sastoji od izračuna kovarijance ili matrice korelacije, svojstvenih vrijednosti, odnosno vektora i osnovnih komponenti. Osnovna namjena transformacije PCA je smanjenje obima podataka, odnosno broja kanala, sa povećanjem gustoće podataka. Postupak pokušava u potpunosti statistički pronaći najmanji broj dimenzija sa raznolikim rasponom vrijednosti. Početak postupka se ogleda u određivanju korelacije između pojedinačnih kanala snimka, a zatim slijedi traženje vlastitih vrijednosti i njima pripadajućih vektora metodama linearne algebre.

Vektori određuju smjer osnovnih komponenti (osnovnih osa). Na poslijetku, podaci u ulaznom snimku se zakreću i mijenja im se mjerilo, odnosno pretvaraju se u osnovne komponente. Analiza osnovnih komponenti se može izvesti na dva načina: na selektivni i na standardni način. Standardni način podrazumjeva korištenje svih dostupnih kanala ulaznog snimka, dok selektivni način podrazumjeva korištenje samo odabranih kanala, koji se biraju na osnovu *a priori* saznanja ili svrhe primjene rezultata. Ono što je karakteristično jeste da se odnos signal-šum značajno poboljšava nakon primjene standardizovane PCA transformacije. Kada je riječ o integraciji podataka, analizi osnovnih komponenti se može pristupiti na dva načina: *PCA višekanalnog snimka*, zamjena prve osnove komponente sa drugim snimkom i *PCA svih kanala više snimaka*. Prvi spomenuti način prati ideju povećanja prostorne rezolucije višekanalnog snimka uvođenjem drugog snimka sa boljom prostornom rezolucijom. Kanal koji će zamijeniti prvu osnovnu komponentu (PC1) se rasteže do vrijednosti varijance i prosjeka prve osnovne komponente. Snimak bolje (veće) prostorne rezolucije zamjenjuje prvu osnovnu komponentu budući da sadrži informacije koje su zajedničke za sve kanale, dok spektralne informacije ostaju jedinstvene za svaki kanal. Prva osnovna komponenta se računa za maksimalnu varijancu koja može najviše doprinijeti poboljšanju rezolucije integrisanog snimka. Drugi način integriše različita svojstva višesenzorskih ulaznih podataka u jedan snimak. Slikovni kanali različitih senzora se kombinuju u jedan snimak i analiza osnovnih komponenti se pravi na osnovu svih kanala. Na kraju treba navesti da pristup preko analize osnovnih komponenti je osjetljiv na odabir područja za koje se radi analiza.

Visoko propusno filtriranje: još jedan od načina poboljšanja prostorne rezolucije višespektralnih podataka, a zasnovan je na udruživanju prostornih sa spektralnim informacijama. Riječ je o kombinovanju visoko propusnog filtra sa dodatkom kanala. Snimak visoke prostorne rezolucije se filtrira sa malim visoko propusnim filterom, što rezultuje podacima visoke frekvencije koji se odnose na prostorne informacije. Ovdje je riječ o pikselima koji se dodaju u kanale sa nižim rezolucijama, te stoga treba naglasiti da ova tehnika ima određena ograničenja ako je riječ o prijenosu važnih teksturalnih informacija iz kanala sa visokom rezolucijom u kanale sa niskom rezolucijom.

Regresiona varijabilna zamjena: pri integraciji snimaka može se koristiti i procedura regresije kako bi se odredila linearna kombinacija (zamjenski vektor) jednog slikovnog kanala, koji se može zamijeniti sa drugim slikovnim kanalom. Takva metoda se naziva regresiona varijabilna zamjena (eng. *Regression variable substitution – RVS*). Kako bi se postigao željeni efekt integracije zamjenski vektor bi trebao da odgovara značajnoj količini informacija originalnog višestrukog sloja podataka. Ova metoda se može koristiti za poboljšanje snimka u prostornom smislu, ili za otkrivanje promjena pod pretpostavkom da su pikseli nastali pri prvom prikupljanju podataka linearna funkcija piksela nastalih pri drugom prikupljanju podataka.

Kanonska varijabilna zamjena: ova analiza je tehnika kojom se stvaraju novi kompozitni kanali utemeljeni na linearnim kombinacijama originalnih kanala. Ovom tehnikom se izrađuju linearne kombinacije kanala koje pružaju najveće razlike između referentnih klasa, u odnosu na varijacije unutar referentne klase. Uspješna implementacija ove tehnike zahtjeva definiranje homogenih područja, ili referentnih klasa, za svaku od informacionih klasa koja je od interesa korisniku.

Zamjena komponenti: cilj ove tehnike jeste izoštravanje snimka, i najpopularnija tehnika zamjene komponenti jeste ranije spomenuta HSI transformacija. U ovu kategoriju još se može ubrojiti i analiza osnovnih komponenti, koja je također ranije ukratko opisana.

Wavelets, ili talasići: matematički alat prvenstveno razvijen za potrebe obrade signala, ali se može primjeniti i na integraciju snimaka daljinskih istraživanja prateći koncept višerezolucijske analize (eng. *multiresolution analysis* – MRA). Ova transformacija stvara zbir elementarnih funkcija (talasića) od proizvoljnih funkcija konačne energije. Težine koje se dodjeljuju talasićima su tzv. talasićasti koeficijenti, koji imaju bitnu ulogu u određivanju strukture karakteristika u određenoj rezoluciji i na određenom prostoru. Interpretacija struktura, ili detalja snimka, ovisi od rezolucije snimka koja se hijerarhijski računa u piramidalnom obliku prilikom višerezolucijske analize. Sa tačke gledišta integracije podataka, ovakva transformacija se može upotrijebiti da se opišu razlike između sukcesivnih snimaka nastalih višerezolucijskom analizom. Kada se odrede talasićasti koeficijenti za dva snimka različite prostorne rezolucije, transformacioni model može odrediti nedostajuće talasićaste koeficijente za snimak sa nižom prostornom rezolucijom. Koristeći se posljednjima, moguće je stvoriti sintetički snimak zasnovan na izvornom snimku niže prostorne rezolucije, ali sada sa boljom (višom) prostornom rezolucijom. Ovako nastali snimak zadržava spektralne informacije, ali i prikazuje više detalja zbog bolje rezolucije.

- (4) *Kombinovani pristup*: u nekim slučajevima primjena jednog od gore navedenih pristupa neće rezultirati željenim informacijama, te se stoga koristi određena kombinacija tehnika. Smatra se da kombinovani pristup integraciji podataka igra jednu od bitnijih uloga u domeni integracije. Problemi kao što su pokrivenost oblacima ili zamagljeni snimci, upravo su razlog koji je potakao daljnja istraživanja i optimiziranja tehnika. Pri integraciji, mogu se koristiti različite kombinacije, među kojima se izdvajaju: RGB u kombinaciji sa drugim tehnikama; HSI transformacija u kombinaciji sa drugim tehnikama; visoko propusni filtri u kombinaciji sa kombinovanjem kanala; mozaiciranje u kombinaciji sa drugim tehnikama. Detaljnije o kombinovanom pristupu može se pročitati u (Pohl i van Genderen, 1998).

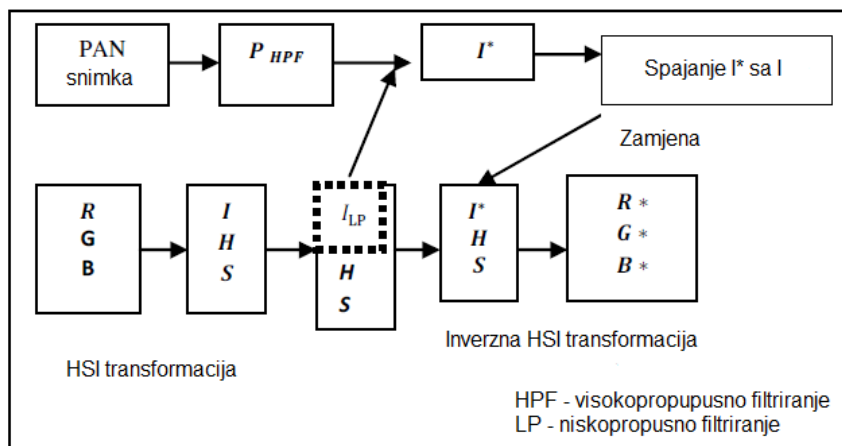
2.1.2 Integracija na nivou karakteristika (značajki)

Integracija na ovom nivou podrazumjeva izvlačenje, tj. izuzimanje karakteristika (značajki – eng. *features*) sa ulaznih snimaka. Ove karakteristike mogu biti osvjetljenost piksela, ili rubovi i teksture karakteristika. Koje karakteristike se izuzimaju ovisi o cilju koji se želi postići integracijom. Karakteristike koje se izdvajaju sa snimaka uključuju rubove, regije, oblike, veličine, dužine ili segmente snimka, te one karakteristike sa sličnim intenzitetima na snimcima, i to u cilju integracije navedenih sa različitim snimcima koji se odnose na isto geografsko područje. Ove izdvojene karakteristike se kombinuju sa drugim karakteristikama sličnih osobina sa drugih snimaka kroz unaprijed odabrani proces kako bi se stvorio konačni, integrisani snimak. Općenito, integracija na nivou karakteristika bi trebala biti relativno jednostavna, ali stvari se dodatno komplikuju ukoliko se radi o podacima koji dolaze iz različitih izvora. Većina algoritama na ovom nivou integracije zahtjeva da pikseli snimaka sa različitih sistema imaju istu prostornu rezoluciju, što nekada nije slučaj. Stoga, prije integracije neophodno je napraviti geometrijsku registraciju i radiometrijske popravke polaznih snimaka jedan u odnosu na drugoga (Al-Wassai i Kalyankar, 2012).

U nastavku slijedi kratak opis tri tehnike koje se koriste pri integraciji podataka na nivou karakteristika, prikazane na primjeru integracije panhromatskog snimka visoke rezolucije sa višespektralnim snimkom niže prostorne rezolucije, a koje detaljnije opisuju Al-Wassai i Kalyankar (2012):

- (1) *Spajanje snimaka na osnovu segmenata* (eng. *Segment Based Image Fusion – SF*): je tehnika razvijena s ciljem očuvanja spektralnih karakteristika prilikom integracije snimaka. Zasnovana je na HSI transformaciji uparenoj sa filtriranjem prostorne domene. Osnovni princip očuvanja spektralnih karakteristika pri integraciji jeste da se visoka prostorna rezolucija panhromatskog snimka iskoristi za izoštravanje višespektralnog snimka bez da se stvaraju nove sive vrijednosti prostornih informacija. Idealan algoritam ovakve integracije naglašava promjene koje opisuje visoka frekvencija, npr. rubove te sive vrijednosti visoke frekvencije bez da pravi promjene u homogenim područjima višespektralnog snimka. Kako bi se navedeno ostvarilo, potrebno je ispuniti dva preduslova: prvo, boja i prostorne informacije treba da se razdvoje; i drugo, način na koji će se vršiti manipulacija nad prostornim informacijama treba da omogući prilagodljivo poboljšanje snimka. Stoga, intenziteti koji se nalaze na višespektralnom snimku se filtriraju uz pomoć niskopropusnog filtera, dok se panhromatski snimak filtrira visokopropusnim filterom. Ovo se, u osnovi, radi kako bi se prostorni detalji sa panhromatskog snimka visoke rezolucije dodali na višespektralni snimak niske rezolucije. Kako je cilj poboljšanja kontrasta otkrivanje malih detalja na snimku, primjenom visokopropusnog filtera izdvajaju se detalji koje karakteriše visoka frekvencija. Sav postupak, u konačnici, vodi ka naglašavanju detalja visoke frekvencije na snimku, kao što su rubovi, linije i tačke sa visokim gradijentom. Intenziteti koji se izdvoje niskopropusnim filtriranjem višespektralnog snimka i kanal koji nastaje visokopropusnim filtriranjem panhromatskog snimka se spajaju u originalnom histogramu intenziteta (osvjetljenosti). Nakon završenog filtriranja,

snimci se transformišu u polaznu prostornu domenu inverznom HSI transformacijom, te spajaju kako bi nastao integrisani snimak sa podacima niske frekvencije višespektralnog snimka i podacima visoke frekvencije panhromatskog snimka. Na ovaj način dobijene komponente intenziteta i originalne komponente boje i zasićenosti višespektralnog snimka formiraju novu HSI snimku. Finalni korak je obrnuta, ili inverzna HSI transformacija kojom se stvara integrisani RGB snimak koji sadrži prostornu rezoluciju ulaznog panhromatskog snimka i spektralne karakteristike ulaznog višespektralnog snimka.



Slika 3. Spajanje (integracija) snimaka na osnovu segmenata (Al-Wassai i Kalyankar, 2012).

- (2) *Integracija snimaka na nivou karakteristika na osnovu analize osnovnih komponenti:* ova tehnika transformiše, ili drugačije rečeno projicira, karakteristike iz originalne domene u novu domenu (zvanu i PCA domena), gdje su karakteristike posložene u odnosu na svoje varijance. Karakteristike u transformiranoj domeni nastaju linearnom kombinacijom originalnih karakteristika, i nisu u korelaciji. Proces integracije se ostvaruje u PCA domeni zadržavanjem onih karakteristika koje sadrže značajnu količinu informacija. Osnovna ideja je da se pronađu one karakteristike koje oslikavaju što je više moguće varijacija u podacima, a da njihov broj bude što je to moguće manji. Najkraće, određivanje osnovnih komponenti se predstavlja u nekoliko koraka:

- računanje matrice kovarijanci iz ulaznih podataka,
- računanje svojstvenih vrijednosti i svojstvenih vektora iz matrice kovarijanci, te njihovo sortiranje u opadajućem nizu u odnosu na svojstvene vektore,
- formiranje matrice tranzicije uzimajući u obzir željeni broj komponenti (vlastitih vektora) i
- množenje ulaznog prostora komponenti sa matricom tranzicije, što vodi ka smanjenju dimenzija reprezentacije prostora.

Za višespektralne snimke jako je bitno da se analizom osnovnih komponenti slikovni kanali (njih tri ili više) transformišu u set osnovnih komponenti, kako bi se prva osnovna komponenta mogla zamijeniti sa odgovarajućim kanalom panhromatskog

snimka čiji histogram je predhodno usklađen sa pomenutom prvom komponentom. Nakon toga, pravi se inverzna transformacija analizom osnovnih komponenti kako bi se zamijenjene komponente vratile natrag u originalni prostor koji odgovara ulaznom snimku, a ovim se stvara i set integriranih višespektralnih kanala. Ovakav način integracije je osjetljiv na područje na kojem se primjenjuje jer varijance vrijednosti piksela i korelacija između pojedinih kanala razlikuju se ovisno o tipu pokriva zemljišta. Stoga, rezultati ove tehnike variraju u ovisnosti o korelaciji među slikovnim kanalima višespektralnog snimka.

- (3) *Integracija rubova* (eng. *Edge Fusion – EF*): ova tehnika se koristi za otkrivanje tačaka na digitalnom snimku u kojima se svjetlost snimka mijenja naglo, ili formalno rečeno u kojima se javljaju diskontinuiteti. Pojam 'rub' se odnosi na sve promjene u vrijednosti slikovnog signala, poznate kao i slikovni gradijent. Postoji više metoda za otkrivanje rubova, a većina istih se može grupisati u dvije skupine: one zasnovane na pretrazi i one zasnovane na nultom prelazu. Otkrivanje rubova na osnovu izvoda prvog reda svodi se na traženje vrijednosti prvog izvoda u horizontalnom i u vertikalnom smjeru. Ako se navedeno primjeni na panhromatski snimak, horizontalni detektor rubova daje vrijednosti razlika između dvije horizontalno susjedne tačke, ali da bi se otkrio horizontalni rub potreban je i detektor vertikalnih rubova koji pravi razlike među vertikalno susjednim tačkama, a uz pomoć kojeg se ustanovljava promjena intenziteta u horizontalnom smislu. Ovim se neće otkriti promjene intenziteta u vertikalnom smislu, stoga se kombinacijom horizontalnog i vertikalnog detektora stvara novi operator kojim se otkrivaju horizontalni i vertikalni rubovi zajedno. Sa druge strane, otkrivanje rubova na osnovu izvoda drugog reda znači korištenje Laplasovog operatora:

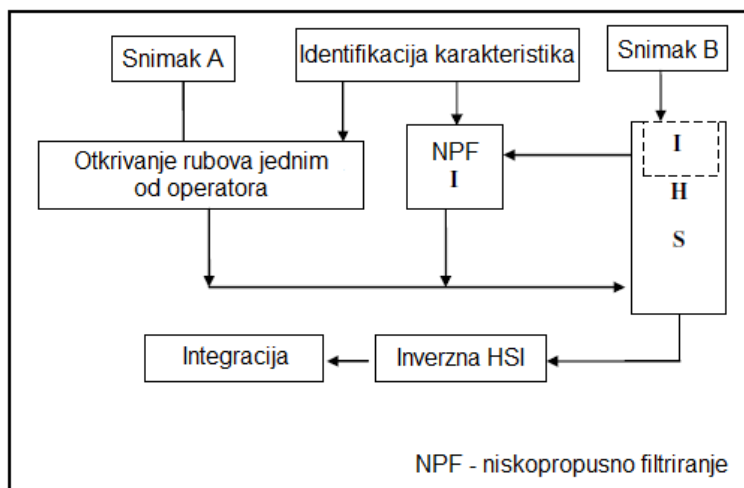
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad (8)$$

što je diferencijalni operator drugog reda u n-dimenzionalnom Euklidovom prostoru. Postoji više diskretnih verzija Laplasovog operatora, a obično se isti koriste pri otkrivanju rubova i u svrhe procjene pomaka. U svrhe integracije, koriste se na jedan od dva načina: preko direktnog integriranja rubova, što može rezultirati nekompletnim granicama između segmenata; i preko potpune segmentacije snimka što dijeli snimak na konačan broj različitih regija sa diskretno definisanim granicama. Općenito, integracija preko rubova se opisuje u nekoliko koraka:

- Otkrivanje rubova na panhromatskom snimku jednim od operatora, i njihovo izdvajanje sa panhromatskog snimka;
- Niskopropusno filtriranje intenziteta višespektralnog snimka i dodavanje rubova panhromatskog snimka;
- Transformacija snimki u originalnu prostornu domenu inverznom HSI transformacijom i njihovo spajanje u cilju stvaranja nove snimke koja sadrži podatke niske frekvencije višespektralnog snimka i rubove panhromatskog snimka.

Nova komponenta intenziteta, te originalne komponente boje i zasićenja višespektralnog snimka, sada tvore novu HSI snimku.

- Inverznom HSI transformacijom kreira se integrisana RGB snimka koja sadrži prostornu rezoluciju ulaznog panhromatskog snimka i spektralne karakteristike ulaznog višespektralnog snimka.



Slika 4. Shema postupka integracija rubova (Al-Wassai i Kalyankar, 2012).

2.1.3 Integracija na nivou odluke

Odluke se obično baziraju na znaju stečenom o određenoj situaciji, a koje se oslanja na mnoge izvore u domeni integracije podataka. Tehnike na ovom nivou integracije imaju za cilj stvaranje zaključaka o događajima ili aktivnostima koje se odnose na interesnu pojavu, i to na visokom nivou. Ove tehnike često se koriste simboličkim informacija, a proces integracije zahtjeva razumno određivanje nesigurnosti i ograničenja (Castanedo, 2013).

U nastavku slijedi kratak pregled metoda koje se mogu koristiti pri integraciji podataka na nivou odluke, a koje dosta detaljnije opisuje (Castanedo, 2013):

- (1) *Bayesian metoda* (eng. *The Bayesian Methods*): ova metoda pruža formulaciju za kombinovanje dokaza prema pravilima vjerovatnoće. Nesigurnost se predstavlja korištenjem uslovnih vrijednosti, koje opisuju uvjerenja i kreću se u intervalu od [0,1], gdje vrijednost 0 označava potpuni izostanak uvjerenja, a vrijednost 1 označava apsolutno uvjerenje. Bayesian zaključak se temelji na Bayesian pravilu, koje glasi:

$$P(Y|X) = \frac{P(X|Y)P(Y)}{P(X)}, \quad (9)$$

gdje je *posteriori* vjerovatnoća, $P(Y|X)$, predstavljena kao uvjerenje u hipotezu Y obzirom na informacije X . Ova vjerovatnoća se dobije množenjem *a priori* vjerovatnoće hipoteze $P(Y)$ sa vjerovatnoćom da je X sa obzirom na Y istinito, $P(X|Y)$.

Vrijednost $P(X)$ se koristi kao normalizirajuća konstanta. Jedan od nedostataka ovakvog pristupa je taj što vjerovatnoće $P(X)$ i $P(X|Y)$ moraju biti poznate. Neke od poteškoća koje se mogu javiti pri ovakvom pristupu su problemi prilikom utvrđivanja a priori vjerovatnoća, kompleksnost ako se radi o više potencijalnih hipoteza i većem broju događaja koji ovise od uslova, hipoteze bi trebale biti međusobno isključive ili poteškoće u opisivanju nesigurnosti zaključaka.

- (2) *Dempster-Shafer zaključak* (eng. *The Dempster-Shafer Inference*): se bazira na matematičkoj teoriji koja generalizuje Bayesian teoriju. Ova tehnika pruža formalizaciju koja se može iskoristiti za predstavljanje nepotpunog znanja, unapređenje uvjerenja i kombinaciju dokaza, te omogućava izričito predstavljanje nesigurnosti. Za razliku od tehnike opisane iznad, Dempster-Shafer ne zahtjeva poznavanje *a priori* vjerovatnoće, budući da se iste dodijeljene informacijama u onome trenutku kada su iste uzete u razmatranje. Npr. u vojne svrhe, ova tehnika *a priori* informacije ima na raspolaganju u bazama podataka, na osnovu kojih se dalje vrši klasifikacija, primjera radi, vojnih plovila.
- (3) *Abdukcijsko rasuđivanje* (eng. *Abductive Reasoning*): jeste način razmišljanja pri kojem se odabire ona hipoteza koja pod pretpostavkom da je događaj (slučaj) istinit najbolje pojašnjava razmatrani događaj (slučaj). Drugačije rečeno, kada se posmatra neki događaj ova metoda pokušava iznaći najbolje moguće objašnjenje za isti. Za ovu metodu se može reći da je više uzorak za odlučivanje, nego što je tehnika integracije.
- (4) *Semantičke metode* (eng. *Semantic Methods*): su metode koje se koriste semantičkim podacima kao ulaznim slojem pri integraciji, i često se smatraju metodama koje mogu pružiti dosta bolje rezultate od onih koje se oslanjaju samo na pojedinačne izvore podataka. U suštini, ove metode predstavljaju shemu po kojoj se sirovi podaci sa senzora obrađuju tako da čvorovi razmjenjuju samo rezultujuće semantičke informacije. Integracija podataka ovom metodom obično obuhvaća dvije faze: izgradnju znanja i podudaranje uzoraka (zaključak). Prva faza uključuje najpogodnije znanje u semantičke informacije. Nakon toga, druga faza spaja relevantne attribute i pruža semantičku interpretaciju podataka zapisanih senzorom. Ova metoda može se posmatrati kao ideja za integraciju i prevođenje podataka senzora na formalni jezik. Zbog ovoga se jezici dobiveni na osnovu opažanja okruženja upoređuju sa sličnim jezicima koji su pohranjeni u bazama podataka. Ključ ove strategije jeste da su slična ponašanja koja predstavljaju formalni jezici semantički slična. Ovom metodom štediti se na troškovima prijenosa podataka, budući da čvorovi prenose samo formalnu jezičku strukturu umjesto kompletnih sirovih podataka. Ali, da bi metoda bila uspješna, unaprijed poznati skup ponašanja mora bit pohranjen u bazu podataka, što u nekim slučajevima predstavlja problem.

Detaljnije o načinima integracije podataka može se pronaći u (Castanedo, 2013). U Tabeli 1 prikazane su usporedbe različitih nivoa integracije podataka, uz navedene prednosti i nedostatke svakog od iznad spomenutih nivoa integracije.

Tabela 1

Prednosti i nedostaci različitih nivoa integracije podataka daljinskih istraživanja (Solberg, 2006)

<i>Integracija na nivou piksela</i>	
Prednosti	Jednostavna. Ne zahtjeva posebne softvere za klasifikaciju integrisanih snimaka. Uspostavljena je korelacija između izvornih snimaka. Pogodna za otkrivanje promjena.
Nedostaci	Pretpostavlja se da podaci mogu biti modelirani korištenjem zajedničke funkcije gustine. Pouzdanost izvornih podataka se ne može modelirati.
<i>Integracija na nivou karakteristika</i>	
Prednosti	Jednostavna. Ne zahtjeva posebne softvere za klasifikaciju integrisanih snimaka. Karakteristike ovisne o tipu senzora pružaju prednost u odnosu na integraciju na nivou piksela. Pogodna za otkrivanje promjena.
Nedostaci	Pretpostavlja se da podaci mogu biti modelirani korištenjem zajedničke funkcije gustine. Pouzdanost izvornih podataka se ne može modelirati.
<i>Integracija na nivou odluke</i>	
Prednosti	Pogodna za podatke različitih vjerovatnoća gustine. Pouzdanost izvornih podataka se može modelirati. Unaprijed poznate informacije o kombiniranju izvora se mogu modelirati.
Nedostaci	Zahtjeva posebne softvere.

2.2 Procjena kvaliteta integracije podataka (snimaka)

Na osnovu provedenih istraživanja, različiti autori su predstavili različite načine za procjenu kvaliteta određene metode integracije podataka, odnosno integracije snimaka daljinskih istraživanja. Općenito, procjena kvaliteta neke od metoda korištene za integraciju podataka može se napraviti uspoređujući rezultujući (integrisani) snimak sa nekim referentnim snimkom, za koji se smatra da je 'idealno'. Usporedba se može bazirati na spektralnim i prostornim karakteristikama, te se može napraviti vizuelno i kvantitativno. Ono što je nedostatak u ovom procesu jeste činjenica da referentni snimci često nisu dostupni u praksi, te zbog toga je potrebno napraviti simulaciju iste, ili se odlučiti za kvantitativnu i 'sljepu' procjenu integrisanog snimka. Za procjenu kvalitete snimka nastalog integracijom podataka, potrebno je definisati određene aspekte. Ovi aspekti, primjerice, mogu uključivati prostornu i spektralnu rezoluciju, količinu informacija na snimku, preglednost, kontrast te detaljnost karakteristika od interesa. Procjena kvalitete također zavisi i od načina primjene integrisanog snimka, iz razloga što različite primjene iziskuju različite aspekte kvalitete snimka. Generalno gledajući, načini procjene kvalitete mogu se razvrstati u dvije skupine: *kvalitativne* (ili *subjektivne*) i *kvantitativne* (ili *objektivne*) metode. Kvalitativne metode uključuju vizuelno uspoređivanje referentnog snimka sa integrisanim snimkom, dok kvantitativne metode uključuju indikatore kvalitete koji određuju spektralne i prostorne sličnosti između višespektralnog i integrisanog snimka (Fonseca i dr., 2011).

Kako navode Fonseca i dr. (2011), na osnovu unaprijed ustanovljenih kriterija ili ličnog iskustva, procjena kvalitete snimka se može okarakterisati ocjenom. U ovom procesu, interpretator analizira ton, kontrast, zasićenost, oštrinu i teksture integrisanog snimka. Konačna procjena kvaliteta snimka može se dati na osnovu težinskih parametara i srednjih ocjena svakog od nabrojanih segmenata, i ovakav pristup naziva se rezultat srednjeg mišljenja (eng. *mean opinion score* - MOS). Kvalitativne metode obično uključuju apsolutne i relativne mjere, prikazane u Tabeli 2. Treba istaći da ovakve metode procjene ovise o iskustvu stručnjaka ili njegovoj pristrasnosti, te se mora uzeti u obzir da uvijek postoje određene nesigurnosti. Ove metode ne mogu se predstaviti egzaktnim matematičkim modelima, i uglavnom tehnike koje se koriste se baziraju na vizuelnoj interpretaciji.

Tabela 2

Apsolutne i relativne mjere kvalitativnih metoda (Fonseca i dr., 2011)

Ocjena	Apsolutna mjera	Relativna mjera
1	Odlična	Najbolja u skupini
2	Dobra	Bolja od prosjeka u grupi
3	Srednja	Prosječna u grupi
4	Loša	Lošija od prosjeka u grupi
5	Vrlo loša	Najlošija u grupi

Sa druge strane, neki od pokazatelja koji se koriste za procjene kvantitativnim metodama su i (Fonseca i dr., 2011; Pandit i Bhiwani, 2015):

- *Entropija* (eng. *Entropy* - H) je važan indikator kojim se opisuje količina informacija na snimku. Sasvim je logično za očekivati da će se količina informacija snimka promijeniti integracijom, a informacijska entropija snimka može se pokazati kao:

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p(i) \log_2 p(i), \quad (10)$$

gdje je $p(i)$ vjerovatnoća nijanse sive boje i , L je ukupni raspon sive boje snimka a dinamički raspon analiziranog snimka je $[0, L-1]$. Ukoliko se vrijednost entropije poveća nakon integracije, to znači da se informaciona vrijednost snimka povećala i da se integracija može smatrati uspješnom.

- *Korijen srednje kvadratne greške* (eng. *Root Mean Square Error* - RMSE) je standardna mjera razlika između referentnih i integrisanih snimaka. Računa se kao:

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_R(i, j) - I_F(i, j)]^2}{M \times N} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

gdje su $I_R(i, j)$ i $I_F(i, j)$ vrijednosti piksela referentne i integrisane snimke, a $M \times N$ je veličina (dimenzija) snimka. Veća RMSE vrijednost znači da su i razlike između referentne i integrisane snimke veće.

Za određivanje razlika u spektralnim informacijama između integrisanog i referentnog snimka koriste se slijedeći indikatori:

- *Koeficijent korelacije* (eng. *Correlation Coefficient* – CC) između referentnog i integrisanog snimka bi trebao biti što je moguće više bliži vrijednosti 1;
- *Srednje vrijednosti razlika* između referentnih i integrisanih snimaka u osvijetljenu (DM). Što su ove vrijednosti manje, to je spektralna kvaliteta integrisanog snimka bolja. Razlike bi trebale biti što je to moguće bliže nuli;
- *Standardna devijacija* razlike snimka (SSD) u odnosu na srednju vrijednost referentnog snimka, izražena u procentima. Što je ova vrijednost niža to je spektralna kvaliteta integrisanog snimka bolja.
- *Univerzalni indikator kvalitete snimka* (eng. *Universal Image Quality Indicator* – UIQI):

$$UIQI = \frac{4\sigma_{F_i R_i} \mu_{F_i} \mu_{R_i}}{(\sigma_{F_i}^2 + \sigma_{R_i}^2)[(\mu_{F_i})^2 + (\mu_{R_i})^2]} \quad (12)$$

gdje je $\sigma_{F_i R_i}$ kovarijanca između kanala referentnog snimka i kanala integrisanog snimka, a μ i σ su srednje i standardne devijacije snimaka. Što je UIQI indeks viši to je bolja spektralna kvalitete integrisanog snimka.

Za procjenu globalnog spektralnog kvaliteta integrisanog snimka mogu se koristiti i slijedeći parametri:

- *Relativni prosječni indeks spektralne greške* (eng. *Relative average spectral error index* - RASE), koji opisuje prosječne performanse svih kanala:

$$RASE = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (DM^2(R_i) + SSD^2(R_i))}, \quad (13)$$

gdje je μ srednje osvijetljenje N spektralnih kanala (R_i) referentnog snimka, DM srednja vrijednost razlika u osvijetljenju a SSD standardna devijacija razlika snimka.

- *Relativna globalna dimenzionalno-sintezna greška* (eng. *Relative global dimensional synthesis error* - ERGAS):

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{DM^2(R_i) + SSD^2(R_i)}{\mu_i^2} \right)}, \quad (14)$$

gdje su h i l prostorne rezolucije visoko i niskorezolucijskog snimka, a μ_i je srednje osvjetljenje svakog od spektralnih kanala uključenih u proces integracije. DM i SSD su definisani iznad.

Što je niža vrijednost RASE i ERGAS indeksa to je bolji spektralni kvalitet integrisanog snimka.

2.3 Ciljevi integracije podataka daljinskih istraživanja

Kako navode Dong, Zhuang, Huang i Fu (2009) te Pohl i van Genderen (1998), integracija podataka u polju daljinskih istraživanja se, obično, odnosi na kombinovanje različitih snimaka korištenjem naprednih tehnika integracije. Cilj navedenog jeste da se iz različitih i komplementarnih podataka dobiju nove informacije, koje bolje opisuju područje, predmet ili fenomen interesovanja i koje utiču na povećanje stepena pouzdanosti interpretacije. Sve ovo vodi ka tačnijim podacima i većem stepenu iskoristivosti istih. Također, navodi se da integrisani podaci mogu omogućiti bolju operativnu učinkovitost, npr. povećati stepen samopouzdanja operatora pri donošenju odluka, mogu smanjiti dvosmislenost, poboljšati pouzdanost i klasifikaciju snimaka. Na osnovu navoda spomenutih autora dolazi se do zaključka da integracija podataka u polju daljinskih istraživanja otvara mnoge mogućnosti, a kao neki od osnovnih ciljeva mogu se izdvojiti:

- *Bolja identifikacija objekata*: integracija podataka u kombinaciji vidljivo i infracrveno svjetlo često kao rezultat donosi snimak koji je dosta bolji od izvornih, ulaznih snimaka.
- *Bolja klasifikacija snimaka*: kako je klasifikacija snimaka jedan od osnovnih načina primjene daljinskih istraživanja, tačnost iste je jako bitna. Spomenuta tačnost se može poboljšati ako se u proces uključi više snimaka iz različitih izvora.
- *Bolje otkrivanje promjena*: otkrivanje promjena je važan proces u praćenju i upravljanju prirodnim resursima i urbanom razvoju područja, budući da pruža mogućnost kvantitativne analize prostorne raspodjele objekta ili fenomena od interesa. Integracija podataka u ove svrhe se zasniva na različitim platformama koje nose senzore, a posmatraju isti geografski prostor u različitim vremenskim epohama.
- *Izoštavanje snimka – poboljšanje prostorne rezolucije snimka*: kako je to već više puta navedeno, integracijom se može poboljšati prostorna rezolucija snimka. U ove svrhe koriste se visokorezolucijski panhromatski snimci i višespektralni snimci lošije prostorne rezolucije, čijom integracijom nastaje snimak koji karakteriše visoka prostorna i dobra spektralna rezolucija. Treba naglasiti da se mora napraviti jasna razlika između čistog vizuelnog poboljšanja (snimak izgleda ugodnije za posmatrati) i stvarne interpolacije podataka kako bi se postigla željena visoka prostorna rezolucija.

3 ZAKLJUČAK

Integracija podataka daljinskih istraživanja je veoma moćan alat za rješavanje različitih problema sa kojima se stručnjaci iz različitih oblasti susreću svakodnevno. Kako je i predočeno u tekstu način na koji će se pomenuta napraviti ovisi od mnogo faktora, a među njima, kao jedan od najvažnijih, se izdvaja svrha u koju će se koristiti integrirani podaci. Ovisno o potrebama, stručnjaci na izbor imaju različite nivoe integracije podataka (nivo signala i piksela, nivo karakteristika i nivo odluke), od kojih svaki ima svoje prednosti i nedostatke. Ne može se reći da postoji univerzalni način, odnosno metod integracije koji može zadovoljiti bilo koji izazov koji se stavi pred stručnjake, ali iskustvo, ranija istraživanja i preporuke uveliko mogu olakšati proces odabira ulaznih podataka i procjenu očekivanih rezultata. Također, predočeni su i različiti načini ocjene, odnosno procjene kvalitete snimaka koji nastaju kao rezultat integracije podataka. Jako je bitno raspolagati podacima o kvaliteti integriranih snimaka, jer na osnovu pomenutih se donosi odluka da li se nastavlja s procesom analize ili pak se treba odabrati neki drugi metod integracije radi postizanja što boljih konačnih rezultata. I naravno, na posljetku, integracija podataka se radi s nekim ciljem, a iz mnoštva se izdvajaju bolja identifikacija objekata, bolja klasifikacija snimaka, bolje otkrivanje promjena te samo izoštravanje snimaka. Integracija je zasigurno proces koji će u budućnosti biti sve više korišten iz prostog razloga što rezultira novim informacijama koje stručnjacima olakšavaju proces donošenja ispravnih i kvalitetnih odluka.

LITERATURA

- Al-Wassai, F. A., Kalyankar, N. V. (2012). Multisensor Images Fusion Based on Feature-Level. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, 124-138.
- Castanedo, F. (2013). A Review of Data Fusion Techniques. *The ScientificWorld Journal*, 1-19.
- Dong, J., Zhuang, D., Huang, Y., Fu, J. (2009). Advances in Multi-Sensor Data Fusion: Algorithms and Applications. *Sensors*(9).
- Fonseca, L., Namikawa, L., Castejon, E., Carvalho, L., Pinho, C., Pagamisse, A. (2011). Image Fusion for Remote Sensing Applications. In Y. Zheng, *Image Fusion and Its Applications* (pp. 153-178). Rijeka: InTech.
- Li, S., Kang, X., Fang, L., Hu, J., Yin, H. (2017). Pixel-level image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*(33), 100-112.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., Chipman, J. W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation, 5th Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd.
- Oštir, K., Mulahusić, A. (2014). *Daljinska istraživanja*. Ljubljana i Sarajevo: Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu.

Pandit, V. R., Bhiwani, R. J. (2015). Image Fusion in Remote Sensing Applications: A Review. *International Journal of Computer Applications*, 120(10), 22-32.

Pohl, C., van Genderen, J. L. (1998). Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 823-854.

Ranchin, T. (2001). *Data fusion in remote sensing: examples*. Paris: Ecole des Mines de Paris.

Solberg, A. H. S. (2006). *Data fusion for remote sensing applications*. Oslo: Department of Informatics, University of Oslo. Dostupno na:
https://folk.uio.no/inf5300/2008/datafusion_paper.pdf

Universität Bonn. (2018, January 26). *Definitions of Sensor Data Fusion in the Literature*. Retrieved from Institute of Computer Science 4: <https://net.cs.uni-bonn.de/wg/sensor-data-and-information-fusion/what-is-it/sdf-definitions/>

Wikipedia. (2018, January 26). *Signal-to-noise ratio*. Retrieved from Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Signal-to-noise_ratio

Autor:

MA Nedim Kulo, dipl.inž.geod.

Građevinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu

Patriotske lige 30, 71000 Sarajevo

Bosna i Hercegovina

E-mail: nedim.kulo@gf.unsa.ba