
DALJINSKO ZAZNAVANJE



KRIŠTOF OŠTIR

Krištof Oštir
Daljinsko zaznavanje



Krištof Oštir
Daljinsko zaznavanje

© Inštitut za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU, 2006

Recenzija: Mojca Kosmatin Fras in Marko Komac
Lektoriranje: Helena Dobrovoljc
Oblikovanje naslovnice: Milojka Žalik Huzjan
Izdelava ilustracij: Žiga Kokalj, Krištof Oštir in Klemen Zakšek
Prelom: Krištof Oštir

Izdajatelj: Inštitut za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU
Za izdajateja: Ivan Šprajc
Založnik: Založba ZRC
Za založnika: Oto Luthar
Glavni urednik: Vojislav Likar

Tisk: Tiskarna Ljubljana d.d.
Naklada: 500 izvodov

Ilustracija na ovitku:

Vizualizacija Zemlje, ustvarjena z uporabo podatkov Blue Marble Next Generation in digitalnega modela višin GTOPO30. Blue Marble Next Generation je obdelan mozaik posnetkov, ki jih je leta 2004 ustvaril MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), nameščen na satelitu Terra. Izvirni podatki so last National Aeronautics and Space Administration (Earth Observatory) in US Geological Survey, prikaz pa je izdelal Žiga Kokalj.

Izid publikacije je podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

CIP – Kataložni zapis o publikaciji
Narodna in univerzitetna knjižnica, Ljubljana

528.8

OŠTIR, Krištof

Daljinsko zaznavanje / Krištof Oštir. – Ljubljana :
Založba ZRC, 2006

ISBN-10 961-6568-72-8

ISBN-13 978-961-6568-72-2

230389504

© 2006, Založba ZRC, ZRC SAZU

Vse pravice pridržane. Noben del te izdaje ne sme biti reproduciran, shranjen ali prepisan v kateri koli obliki oziroma na kateri koli način, bodisi elektronsko, mehansko, s fotokopiranjem, snemanjem ali kako drugače, brez predhodnega pisnega dovoljenja lastnikov avtorskih pravic (copyrighta).

Daljinsko zaznavanje

Krištof Oštir

Ljubljana 2006

»Sem znanstvenik in vem, kaj je potrebno za dokaz. Vendar se kličem po svojem otroškem imenu tudi zato, ker se s tem opominjam, da mora biti znanstvenik brez pridržkov tudi kot otrok. Če vidi stvar, mora reči, da jo vidi, pa če je tisto, kar je mislil, da bo videl, ali ne. Najprej poglej, potem pomisli, in nazadnje preveri. Ampak vedno najprej poglej. Drugače boš videl samo to, kar si pričakoval. Večina znanstvenikov pozablja na to.

No, in drugi razlog, da se kličem Pametni Wonko, je ta, da bi ljudje mislili, da sem nor. Zaradi tega si lahko privoščim, da povem, kar vidim. Ne moreš biti znanstvenik, če te skrbi, da bi ljudje mislili, da si nor.«

Pametni Wonko Arthurju in Fenchurch
Zbogom in hvala za vse ribe
Douglas Adams, 1952–2001
Prevedel Alojz Kodre

Vsebina

1	Definicija daljinskega zaznavanja	13
2	Kratka zgodovina daljinskega zaznavanja	15
3	Elektromagnetno valovanje	21
3.1	Opis valovanja	21
3.2	Spekter elektromagnetnega valovanja	23
4	Interakcija z atmosfero	25
4.1	Sipanje	25
4.2	Absorpcija	27
4.3	Lom valovanja	29
5	Interakcija s površjem	31
5.1	Spektralni podpis	34
6	Sistemi daljinskega zaznavanja	37
6.1	Platforme daljinskega zaznavanja	37
6.2	Tirnice satelitov	39
6.3	Pasivni in aktivni senzorji	44
7	Ločljivost snemalnih sistemov	47
7.1	Prostorska ločljivost	47
7.2	Spektralna ločljivost	49
7.3	Radiometrična ločljivost	50
7.4	Časovna ločljivost	53
8	Optični senzorji	55
8.1	Fotografske kamere	55
8.2	Večspektralno skeniranje	59
8.2.1	Prečni skenerji	59
8.2.2	Vzdolžni skenerji	60
8.3	Termično snemanje	62

9 Radar	65
9.1 Radar bočnega pogleda	65
9.2 Umetno odprtinski radar	67
9.3 Interakcija mikrovalov s površjem	68
10 Lidar	73
10.1 Delovanje lidarja	73
10.2 Obdelava podatkov	76
11 Satelitski sistemi za opazovanje Zemlje	81
11.1 Vremenski sateliti	81
11.1.1 GOES	82
11.1.2 NOAA AVHRR	84
11.1.3 Meteosat	86
11.2 Sateliti za opazovanje kopnih površin	87
11.2.1 Landsat	88
11.2.2 SPOT	92
11.2.3 IKONOS	96
11.2.4 QuickBird	98
11.3 Sateliti za opazovanje morja	99
11.3.1 SeaWiFS	100
11.4 Radarski sistemi	101
11.4.1 ERS-1 in ERS-2	101
11.4.2 Envisat	103
11.4.3 RADARSAT	107
11.4.4 Shuttle Radar Topography Mission	108
12 Prenos in sprejem podatkov	111
13 Interpretacija podob	113
14 Vizualna interpretacija	119
15 Predobdelava podob	123
15.1 Odprava napak v delovanju senzorjev	123
15.1.1 Manjkajoče vrstice	124
15.1.2 Odstranitev prog	125
15.2 Geometrijski popravki in registracija	125
15.2.1 Prevzorčenje podob	128
15.3 Atmosferski popravki	129
15.4 Popravki osvetlitve in vpliva terena	131
15.5 Kalibracija podatkov	132
16 Izboljšanje podob	137
16.1 Človeški vid in barvni prostori	137
16.2 Izboljšanje kontrasta	140
16.2.1 Linearni razteg kontrasta	142
16.2.2 Uravnoveženje histograma	143
16.2.3 Gaussov razteg histograma	146
16.3 Psevdoobarvni prikazi	150

16.3.1	Razrez na nivoje	150
16.3.2	Psevdoobarvna transformacija	151
16.4	Filtriranje	152
16.4.1	Konvolucijsko filtriranje	153
16.4.2	Nizkoprepustni filtri	154
16.4.3	Filter mediana	155
16.4.4	Gaussov filter	156
16.4.5	Visokoprepustni filtri	157
16.4.6	Filtri robov	158
17	Transformacije podob	161
17.1	Aritmetične operacije	162
17.2	Vegetacijski indeks	164
17.3	Analiza osnovnih komponent	166
17.4	Kauth-Thomasova transformacija	170
17.5	Transformacija HSI	171
18	Klasifikacija podob	175
18.1	Nenadzorovana klasifikacija	178
18.2	Nadzorovana klasifikacija	179
18.3	Ovrednotenje klasifikacije	181
19	Integracija podatkov	185
20	Primeri uporabe	189
20.1	Kartiranje in posodabljanje kart	191
20.2	Izdelava digitalnih modelov višin	192
20.3	Določanje pokrovnosti oziroma rabe tal	193
20.4	Opazovanje gozdov	195
20.5	Opazovanje naravnih nesreč	195
	Terminološki slovar	199
	Literatura	229
	Kazalo slik	237
	Kazalo tabel	241
	Stvarno kazalo	243

Predgovor

Daljinsko zaznavanje je veda, s katero se – hote ali nehote – srečujemo ves čas svojega življenja. Ko se sprehajamo po mirni naravi ali hitimo po neskončnih cestah, ko zremo v oblake na nebu, nemočno mežikamo v svetlo Sonce, zasanjano opazujemo oddaljene zvezde ali prebiramo debele knjige. Ne da bi se prav zavedali, zaznavamo oddaljene predmete z očmi – »instrumentom«, ki ga nobeno tehnično sredstvo ne more zamenjati. Pa vendar včasih svoj pogled usmerimo tudi onkraj vidnega in vzamemo v roke mikroskop, se zazremo skozi teleskop ali si na računalniškem zaslonu ogledamo satelitske posnetke.

Tehnologija zajema podatkov iz letal in satelitov postaja vsakodnevno orodje v najrazličnejših študijah – od arheologije, biologije in ekologije, prek geografije, meteorologije, geologije in gozdarstva do geodezije. Razvoj internetnih tehnologij, predvsem hitrejših spletnih povezav, in dejavnost tehnološko vplivnih podjetij, kot sta, na primer, Google in Microsoft, sta satelitske podobe prinesela v domove sodobnih internavtov. Storitve, kot Google Earth in Microsoft Virtual Earth, resda predstavljajo le drobec v mozaiku aplikacij, a so za popularizacijo daljinskega zaznavanja naredile več kot vse ostale aktivnosti.

V slovenščini – kljub nekaterim odmevnim primerom uporabe – do sedaj še nismo imeli dela, ki bi daljinsko zaznavanje obravnavalo pregledno in v celoti. Pričujoča knjiga, namenjena raziskovalcem in strokovnjakom najrazličnejših strok kot referenčno delo, študentom in pedagogom kot učbenik in pripomoček ter poljudno znanstveni javnosti kot vir dodatnih informacij o aktualni tehnologiji, skuša to vrzel odpraviti.

V knjigi je najprej definiran predmet daljinskega zaznavanja in podana njegova zgodovina. Obravnavni so elementi, s katerimi se srečamo pri zajemu, obdelavi in uporabi satelitskih in letalskih posnetkov, ter podane lastnosti snemalnih sistemov, še posebej njihova prostorska, spektralna, radiometrična in časovna ločljivost. Sledita opis delovanja senzorjev, in sicer tako optičnih, kot so fotografske kamere in večspektralni skenerji, kot radarskih in lidarskih, ter pregled pomembnejših snemalnih sistemov za opazovanje vremena, kopnih površin in morja.

Osrednji del monografije predstavlja obdelava in interpretacija podob – obravnavana je »klasična« vizualna interpretacija in digitalna obdelava podob. Pri digitalni obdelavi so podrobno analizirani vsi koraki, od predobdelave (odprava napak v delovanju senzorjev, geometrijski popravki, kalibracija) prek izboljšanja (izboljšanje kontrasta, filtriranje) in transformacij (aritmetične operacije, indeksi, analiza osnovnih komponent, Kauth-Thomasova transformacija, transformacija HSI) do klasifikacije (nenadzorovana

in nadzorovana klasifikacija). Delo zaključuje pregled izbranih primerov uporabe daljinskega zaznavanja v Sloveniji.

Knjiga vsebuje tudi terminološki slovar, ki definira osnovne pojme hitro razvijajoče se stroke in skuša tako urediti dosedanje stihijsko prakso uveljavljanja slovenskih ali poslovenjenih izrazov. Razloženih je skoraj štiristo izrazov in okrajšav, ki se uporabljajo v literaturi. Kljub vsej pazljivosti pri sestavljanju slovarja je pričakovati, da se bodo sčasoma uveljavili novi ali spremenjeni izrazi.

Ker se zavedam, da brez prijaznosti posameznikov in naklonjenosti različnih ustanov ta knjiga ne bi nastala, izrekam na tem mestu iskreno zahvalo vsem, ki so mi kadar koli pomagali.

Še posebej bi se želel zahvaliti Zoranu Stančiču, ki me je z zanimivo tehnologijo spoznal. Mojca Kosmatin Fras in Marko Komac sta kot recenzenta temeljito pregledala prvo različico te knjige in predlagala številne pomembne dopolnitve in spremembe. Slovar so poleg njiju pomagali izboljšati Marko Krevs, Dušan Petrovič in Radoš Šumrada. Da je besedilo primerno ilustrirano ter strokovno in oblikovno boljše, je v veliki meri zaslug sodelavcev Inštituta za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU, in sicer Tatjane Veljanovski, ki je pravi strokovnjak za iskanje spodrseljajev, Klemena Zakška, ki je zrisal del slik, Petra Pehanija, ki je odkrival tiskarske škrate, in Žige Kokalja, ki je knjigo natančno pregledal strokovno in jo tudi tehnično uredil. Helena Dobrovoljc je z zavzetostjo in natančnostjo odpravila veliko jezikovnih napak in nedoslednosti. Ne nazadnje se želim zahvaliti tudi piscem in urednikom Wikipedije, tako slovenske kot angleške različice, ter študentom Univerze v Ljubljani, ki so me s svojimi vprašanji spravljali v zadrego in delo razširili za nekaj strani.

Ilustracije v knjigi so nastale z uporabo podatkov v javni lasti ali gradiva, katerega lastniki so Canadian Space Agency, DigitalGlobe, European Space Agency, EUMETSAT, GeoEye, National Aeronautics and Space Administration, National Oceanic and Atmospheric Administration in Spot Image. Satelitski posnetki, uporabljeni v prikazih obdelav, so last Znanstvenoraziskovalnega centra SAZU.

Daljinsko zaznavanje je mešanica veščine, znanosti in umetnosti, ki malokoga pusti hladnega. Ko sem se sam z njim prvič srečal sredi devetdesetih let prejšnjega stoletja, se je rodila simpatija, ki je kmalu prerasla v pravo obsedenost. Lotil sem se brskanja po knjižnicah in prekrižaril prostranstva interneta, kmalu prišel do osnovnih podatkov, prvih obdelanih posnetkov in tudi navidezno nepremagljivih ovir. Lagal bi, če bi ne priznal, da sem si vse skupaj na začetku predstavljal precej lažje, kot je bilo v resnici, pa vendar mi je bilo moje »raziskovanje« ves čas v veliko veselje. Daljinsko zaznavanje je še vedno moja ljubezen, le odnos je danes precej bolj zrel, saj se zavedam tako njegovih prednosti kot omejitev.

Upam, da bom s to knjigo vsaj komu olajšal pot in tehniki pomagal priti v kako zanimivo študijo.

Krištof Oštir

Kranj, decembra 2006

1 Definicija daljinskega zaznavanja

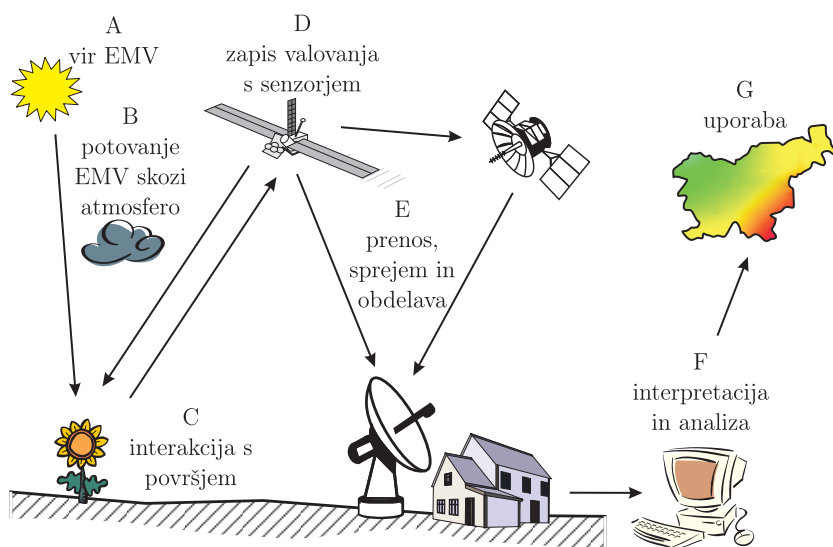
Ljudje smo vizualna bitja in že od nekdaj vemo, da si stvari mnogo lažje predstavljamo, če jih vidimo, kot če o njih samo poslušamo ali beremo. Še tako preprosta slika bolje opiše pojav kot besedilo ali, kot radi rečemo, »slika pove več kot tisoč besed«. Pri interpretaciji podob smo ljudje zelo uspešni, saj se z njo ukvarjamo ves čas (ne nazadnje je tudi branje neke vrste analiza podob). Slike nam podajajo prostorske »razsežnosti« predmetov – informacije o njihovem položaju, velikosti in medsebojnih razmerjih.

Definicij daljinskega zaznavanja je veliko, kar je odraz najrazličnejših področij njegove uporabe. Nekatere med njimi so precej obsežne, druge dokaj skope, vse pa imajo nekaj skupnih točk. V splošnem lahko daljinsko zaznavanje definiramo takole.

»Daljinsko zaznavanje je znanost pridobivanja informacij o površju Zemlje, ne da bi z njo prišli v neposredni stik. Pri tem zaznavamo in zapisujemo odbito ali sevano elektromagnetno valovanje, ga obdelujemo, analiziramo in uporabimo v različnih aplikacijah.«

Pri daljinskem zaznavanju se najpogosteje, ne pa vedno, ukvarjamo z opazovanjem Zemlje, poznani pa so tudi primeri opazovanja Lune, Venere, Marsa in drugih planetov. Daljinsko zaznavanje je postopek, ki temelji na interakciji vpadnega elektromagnetnega sevanja (svetlobe) z opazovanimi predmeti. Pri tem ponavadi ločimo naslednjih sedem delov (slika 1.1).

1. *Izvir elektromagnetnega valovanja* (A) – Prvi pogoj za daljinsko zaznavanje je vir elektromagnetnega valovanja, ki bodisi osvetli opazovane predmete ali pa ga ti sevajo sami. Najpogostejši izvir valovanja je Sonce, pri daljinskem zaznavanju pa uporabljamo še umetne vire (radarske antene) in izkoriščamo lastno (termično) sevanje predmetov.
2. *Pot skozi atmosfero* (B) – Ko valovanje potuje skozi atmosfero, z njo interagira (sodeluje). Pri tem lahko plasti atmosfere prečka enkrat (od površja do senzorja) ali dvakrat (od vira energije – Sonca ali aktivnega instrumenta – do površja in nazaj).
3. *Interakcija s površjem* (C) – Ko valovanje prispe do zemeljske površine, z njo interagira. Način sodelovanja je odvisen tako od lastnosti površja kot od lastnosti valovanja.



Slika 1.1: Postopek daljinskega zaznavanja.

4. *Zapis valovanja s senzorjem* (D) – Potem ko se valovanje siplje na površju ali pa ga to oddaja, ga moramo zaznati s senzorjem (ki je oddaljen, torej ni v stiku s predmetom). Senzorji zaznavajo elektromagnetno valovanje in ga pretvorijo v značilen zapis (fotografski ali digitalni posnetek).
5. *Prenos, sprejem in obdelava* (E) – Signale, ki jih zabeležijo senzorji, moramo prenesti, praviloma v elektronski obliki z radijskim valovanjem, do sprejemne postaje na Zemlji. V sprejemni postaji podatke obdelamo in iz njih ustvarimo podobo, bodisi tiskano ali (in) zadnje čase praviloma digitalno.
6. *Interpretacija in analiza* (F) – Obdelano podobo moramo interpretirati, kar lahko storimo vizualno ali (in) digitalno, pri čemer skušamo izluščiti čim več informacij o opazovanem predmetu.
7. *Uporaba* (G) – Zadnji, a najbrž najpomembnejši element postopka daljinskega zaznavanja je uporaba informacij, ki smo jih dobili z interpretacijo, v določeni študiji ali pri reševanju konkretnega problema.

Opisanih sedem elementov sestavlja postopek daljinskega zaznavanja od začetka do konca. Praviloma – ne pa vedno – pri vsakem snemanju naletimo na vseh sedem korakov; predvsem tretji je delno spremenjen v primeru, ko predmeti sevajo lastno valovanje. V nadaljevanju se bomo z vsakim delom ukvarjali podrobneje.

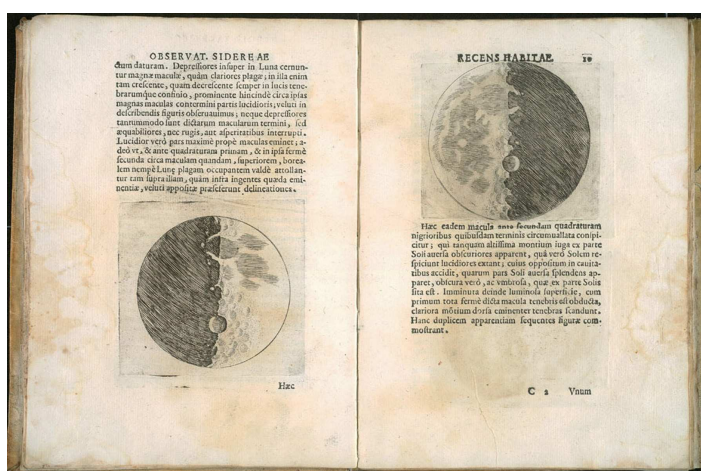
Vprašanja

1. Podaj definicijo daljinskega zaznavanja.
2. Kateri so osnovni deli postopka pri daljinskem zaznavanju?

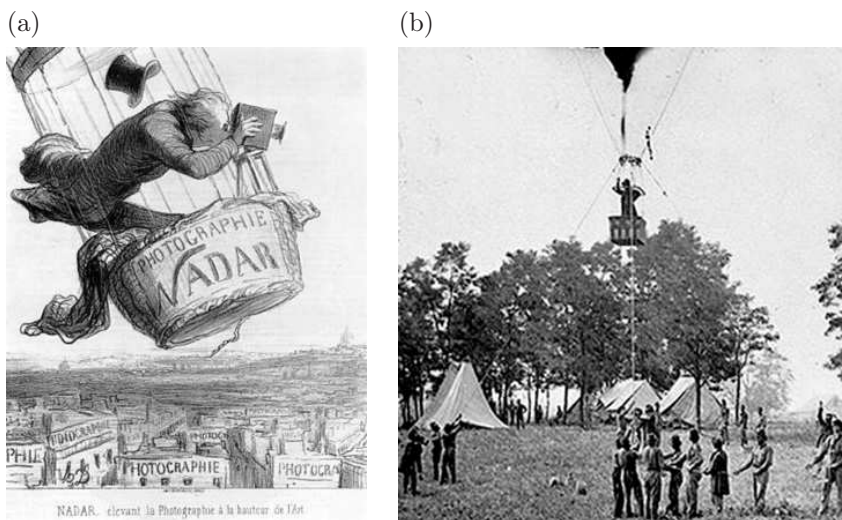
2 Kratka zgodovina daljinskega zaznavanja

Preden se podrobneje seznanimo s posameznimi koraki daljinskega zaznavanja, si na kratko oglejmo njegovo razmeroma razgibano zgodovino. Ljudje so si od nekdaj želeli videti nevidno, želeli so ugotoviti, kaj se skriva pod površino Zemlje, kaj je pod vodo in kaj za vidnimi zvezdami. Pa vendar njihove metode zaradi pomanjkanja tehnologije niso bile preveč uspešne, dokler ni na začetku sedemnajstega stoletja Galileo Galilei začel uporabljati teleskopa.

Skozi svoja »vohunska očala« je Galileo na Soncu opazil pege, odkril »nepravilnosti« na Luni ter spoznal, da je Mlečna cesta sestavljena iz velikega števila majhnih zvezdic. Njegovo najbolj sijajno (in hkrati za tisti čas sporno) je bilo odkritje Jupitrovih satelitov, s katerim je razblinil koncept geocentričnega univerzuma in predvidevanja, da se vse vrti okrog našega planeta. Galileo je bil skrben in natančen opazovalec, ki je vse podatke zabeležil in neutrudno ustvarjal risbe na papirju, edinem načinu »zapisovanja« podob še naslednjih 200 let (slika 2.1).



Slika 2.1: Galileo Galilei je podobe daljinskega zaznavanja zapisoval na papir. Na sliki je stran iz njegovega dela Sidereus nuncius (Wikipedia, 2006a).



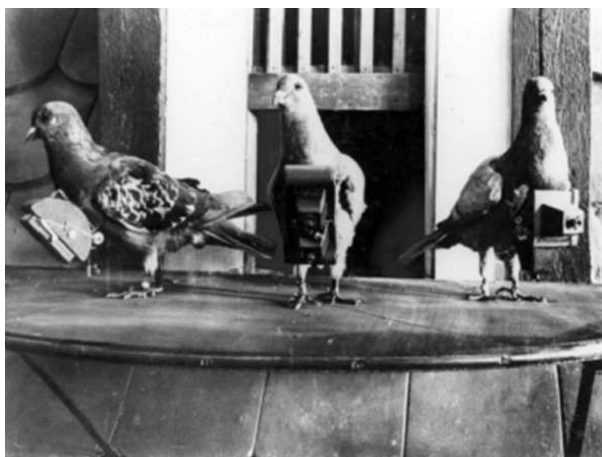
Slika 2.2: Baloni so omogočili opazovanje Zemlje od zgoraj. Gaspard Felix Tournachon, poznan kot Nadar (a), je bil prvi fotograf iz zraka, ameriška vojska, oziroma US Army Balloon Corps, pa je balone uporabila za redno opazovanje sovražnikovih položajev (b).

Gaspard Felix Tournachon, poznan tudi kot Nadar (slika 2.2 a), je bil slaven francoski fotograf in balonar, ki je leta 1859 združil obe svoji strasti in postal del zgodovine. Želel je namreč opraviti meritve zemeljskega površja s posnetkov iz zraka. A kljub temu, da je postavil temelje za današnje daljinsko zaznavanje, Nadar kot zračni zemljemer, ni uspel, so pa njegova fotografska opazovanja pritegnila zanimanje vojske ...

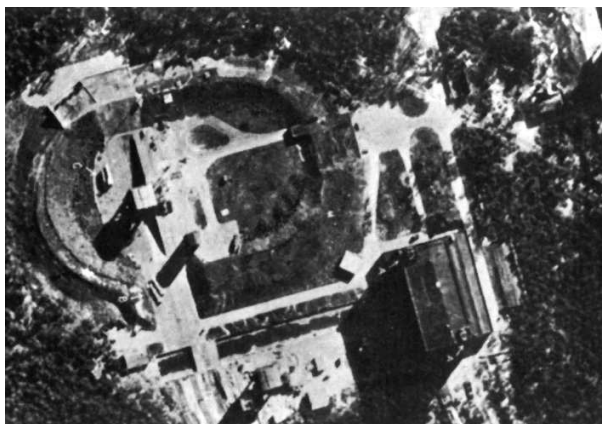
Aprila leta 1861 je profesor Thaddeus Lowe v bližini Cincinnatija, v Ohiju, pričel opazovati vreme iz balona. Žal z vremenom ni imel pretirane sreče, saj ga je veter zanesel v Južno Karolino, kjer so ga aretirali kot »unionističnega« vohuna. Ko so ga kmalu potem izpustili, je sklenil vohun postati tudi zares, saj je bil prepričan, da bi lahko balone uspešno uporabili za opazovanje. Svoj namen je predstavil predsedniku Abrahamu Lincolnu in ta je pod poveljstvom Lova leta 1862 ustanovil US Army Balloon Corps (slika 2.2 b). Enota pa je bila kljub znatni pomoči silam Severa deaktivirana že leta 1863. Razlog za to je bil precej preprost – baloni so bili prelahka tarča za sovražnikovo strelno orožje.

Da bi se izognili nesrečam z baloni in neučinkovitim papirnatim zmajem, ki so jih v tistih časih prav tako uporabljali za opazovanje iz zraka, so Bavarci izdelali zelo lahke fotografske kamere in jih pritrdili na – golobe (slika 2.3). Aparati so bili narejeni tako, da so fotografijo posneli vsakih trideset sekund, medtem ko so se golobi vračali v svoje domače »gnezdo«. Seveda »izstreljevanje« golobov za sovražnikovim hrbotom ni bilo niti približno preprosto, poleg tega pa so bili golobi za lačne vojake precej vabljiva tarča. Zgodnja tehnika daljinskega zaznavanja je postala velika zanimivost Dresdenske mednarodne fotografske razstave leta 1909. Takrat so bile namreč fotografije sejma, posnete z golobi, zelo priljubljene.

Golobi so bili vsekakor hitrejši kot baloni, vendar pa je bila njihova pot manj predvidljiva. Na vso srečo se je s primerno rešitvijo pojavil Wilbur Wright. Starejši izmed slavnih letalskih izumiteljev je pilotiral ob dveh pomembnih dogodkih v zgodovini daljinskega zaznavanja. Najprej je njegov sopotnik Louis Paul Bonvillain na demon-



Slika 2.3: Golobi s fotografskimi kamerami.



Slika 2.4: Letalski posnetek preskusnega poligona raket V-2.

stracijskem letu v Franciji, leta 1908, posnel prve letalske fotografije. Naslednje leto je neki drugi spremljevalec Wrighta med letom v Italiji posnel prvi film in kmalu so ljudje pričeli uživati v posnetkih pokrajine iz zraka.

Dvokrilna letala so nadomestila balone pri opazovanju sovražnih položajev med frontnim vojskovanjem v prvi svetovni vojni. Do konca vojne sta pomen fotografskega opazovanja spoznali obe strani. Nemci so med načrtovanjem svoje zadnje ofenzive leta 1918 na dan posneli približno 4000 fotografij, zavezniki pa so jih v zadnjih štirih mesecih vojne naredili več kot milijon. Kljub temu, da so fotografije široko uporabljali, je morala miniti še ena vojna, da so potrdili resnično moč fotografskega opazovanja.

V drugi svetovni vojni sta bila letalsko snemanje in fotointerpretacija uveljavljeni tehniki. Obe strani sta imeli posebne enote za opazovanje, ki so pomagale pri načrtovanju vojaških operacij in odkrivanju ciljev za bombardiranje. Pomemben korak v zgodovini daljinskega zaznavanja pa so imele povojne raziskave zajetih V-1 in V-2, reaktivnih projektilov, ki so povzročili veliko škodo in ustrašovali predvsem prebivalce



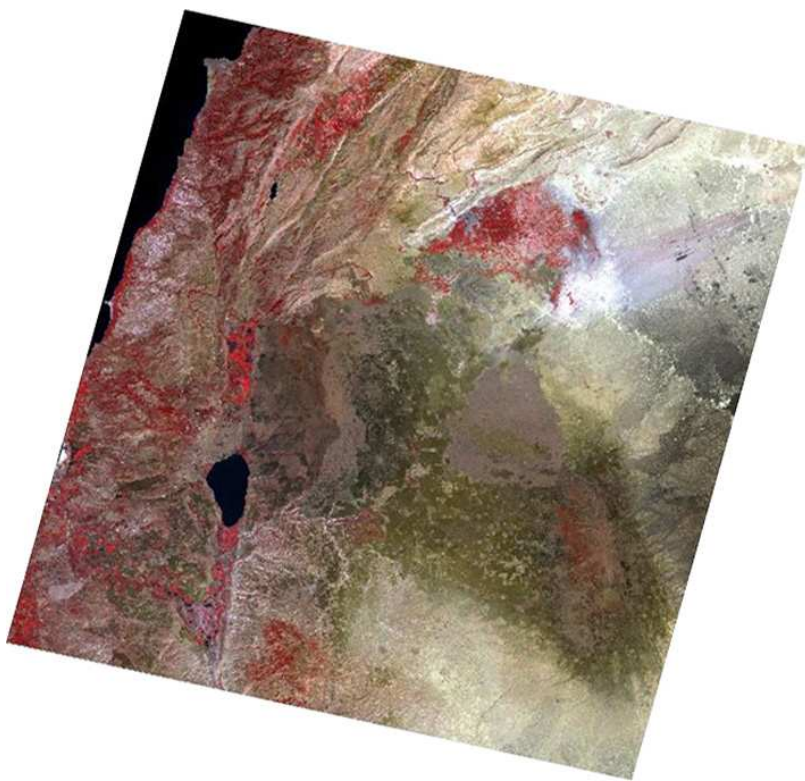
Slika 2.5: Prve slike Zemlje iz vesolja so posneli v okviru programa Apollo.

južne Anglije. Rakete V-2 (slika 2.4) so bile za razliko od starejših, ki so jih poganjali reaktivni motorji, opremljene z etilnim alkoholom in utekočinjenim kisikom kot gorivom. Njihova nadgradnja je konec petdesetih let omogočila razvoj sistemov za izstreljevanje satelitov in s tem odprla pot v vesolje.

Potovanje človeka na Luno je zahtevalo skrbno načrtovanje, še posebno pozornost pa so namenili predlaganemu pristajalnemu mestu. Pri tem so si močno pomagali z daljinskim zaznavanjem. Kot »stranski izdelek« opazovanja Lune je Apollo 8 leta 1968 posnel prve slike Zemlje iz vesolja. Še pomembnejši je njegov naslednik Apollo 9, ki je modri planet slikal z večspektralno kamero s štirimi objektivi (slika 2.5). Fotografije, ki so jih kasneje digitalizirali, so omogočile razvoj tehnik obdelave podob, ki so jih uporabili pri sistemih Landsat.

Julija leta 1972 je ameriška vesoljska agencija NASA izstrelila prvi civilni satelit za opazovanje Zemlje Earth Resources Technology Satellite (ERTS-1). Večspektralni podatki, ki jih je satelit zajemal, so izboljšali razumevanje dogajanja na zemeljski površini (slika 2.6). Omogočali so namreč opazovanje mineralov, prsti, kmetijskih površin, razširjanja urbanih območij in podobno. Ime satelita, in s tem vseh njegovih naslednikov, so zaradi lažje prepoznavnosti kmalu spremenili v Landsat. Program je postal tako uspešen, da so do danes izstrelili že sedem satelitov vrste Landsat, zadnjega Landsat 7 aprila 1999 (utirjenje satelita Landsat 6 ni uspelo). Količina podatkov, ki so jih omenjeni sateliti zajeli, je tako velika, da so jih do sedaj obdelali le manjši delež.

Landsat je povzročil pravo revolucijo na področju daljinskega zaznavanja in kmalu so mu sledili številni sistemi za opazovanje Zemlje. Najprej so bili to optični z vedno zmogljivejšimi senzorji, na primer SPOT. V začetku devetdestih let prejšnjega stoletja se je uveljavilo radarsko snemanje, predvsem po zaslugi evropskih satelitov ERS. Konec



Slika 2.6: Območje Damaska, ki ga je na enem prvih posnetkov 15. septembra 1972 opazoval satelit Landsat.

devetdestih so se pričeli pojavljati viskoločljivi satelitski sistemi, na primer IKONOS in QuickBird, v zadnjih letih pa se težišče opazovanj premika k lidarju.

Vprašanja

1. Opiši zgodovinski razvoj daljinskega zaznavanja!

3 Elektromagnetno valovanje

Vsa telesa, ki imajo temperaturo različno od absolutne ničle, sevajo tako imenovano lastno sevanje. Poleg tega večina teles odbija valovanje, ki ga sevajo druga telesa. Z zapisovanjem izsevanega in odbitega elektromagnetnega valovanja ter upoštevanjem njegovih lastnosti pri poti skozi atmosfero in načina njegove interakcije s predmeti na površini lahko določimo opazovane predmete na njej (vegetacija, zgradbe, gola prst, odprte površine, vodne površine ...). Pri vsaki uporabi podatkov daljinskega zaznavanja je treba razumeti *elektromagnetno valovanje*, značilnosti njegovega potovanja skozi atmosfero in načine interakcije s predmeti na zemeljski površini. V nadaljevanju poglavja se bomo zato nekoliko podrobneje seznanili z elektromagnetnim valovanjem in tako predstavili osnove za naslednja poglavja.

Elektromagnetno valovanje povzroča več različnih mehanizmov, na primer spremembe v energijskem stanju elektronov, pospeševanje nabitih delcev, razpad radioaktivnih snovi in termično gibanje atomov in molekul. Jedrske reakcije v notranjosti Sonca ustvarijo bogat spekter elektromagnetnega valovanja, ki skoraj brez večjih sprememb potuje skozi vesolje. Preden valovanje doseže zemeljsko površino, mora prepotovati še pot skozi atmosfero. Valovanje nato interagira (sodeluje) s predmeti na površini, pri čemer se ga del absorbira, del prepusti in del odbije.

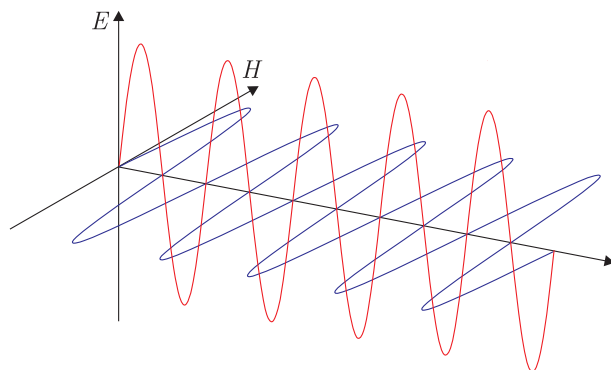
Odbita svetloba predstavlja osnovo za fotografranje in sorodno snemanje. Del valovanja, ki ga površje absorbira, se ponovno izseva v obliki termičnega valovanja. Slednje je prav tako lahko osnova za daljinsko zaznavanje, kljub temu da se slike, ustvarjene z njim, precej razlikujejo od »klasičnih« podob, ustvarjenih z odbito svetlobo. Ne nazadnje lahko za daljinsko zaznavanje uporabimo tudi »umetno« elektromagnetno valovanje, na primer radarske valove.

3.1 Opis valovanja

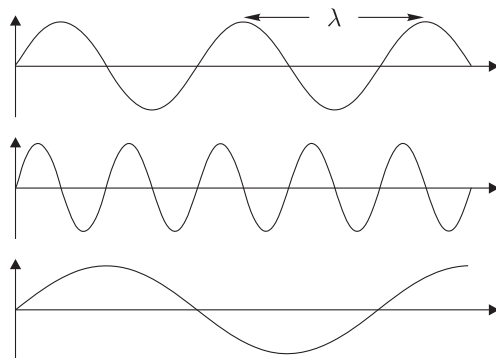
Elektromagnetno valovanje je sestavljeno iz spreminjajočega se električnega polja ($\vec{E}$), ki je pravokotno na smer širjenja valovanja (slika 3.1). Električnemu polju sledi v fazi magnetno polje ($\vec{H}$), ki je prav tako pravokotno na smer valovanja, hkrati pa je pravokotno na električno polje.

Vsako valovanje, torej tudi elektromagnetno, opišemo z naslednjimi tremi lastnostmi (slika 3.2):

- valovno dolžino (λ),
- frekvenco (ν) in



Slika 3.1: Elektromagnetno valovanje je nihanje električnega ($\vec{E}$) in magnetnega polja ($\vec{H}$). Polji sta pravokotni drugo na drugo in hkrati na smer širjenje valovanja.



Slika 3.2: Valovanje opišemo z amplitudo, frekvenco in valovno dolžino. Srednji grafikon prikazuje visoko frekvenco oziroma majhno valovno dolžino, spodnji pa nizko frekvenco oziroma veliko valovno dolžino.

- amplitudo (A).

Valovna dolžina (λ) podaja razdaljo med zaporednima točkama, ki nihata z enako fazo (vrhovoma, dolinama), frekvenca (ν) pa je merilo za število nihajev v enoti časa. Frekvenca in valovna dolžina sta med seboj povezani prek hitrosti valovanja

$$c = \lambda \nu. \quad (3.1)$$

Pri tem je c svetlobna hitrost, ki je snovna konstanta. Hitrost svetlobe v praznem prostoru (vakuumu) je osnovna konstanta in znaša $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 300\,000 \text{ km/s}$. V vseh snoveh je hitrost svetlobe manjša kot v vakuumu.

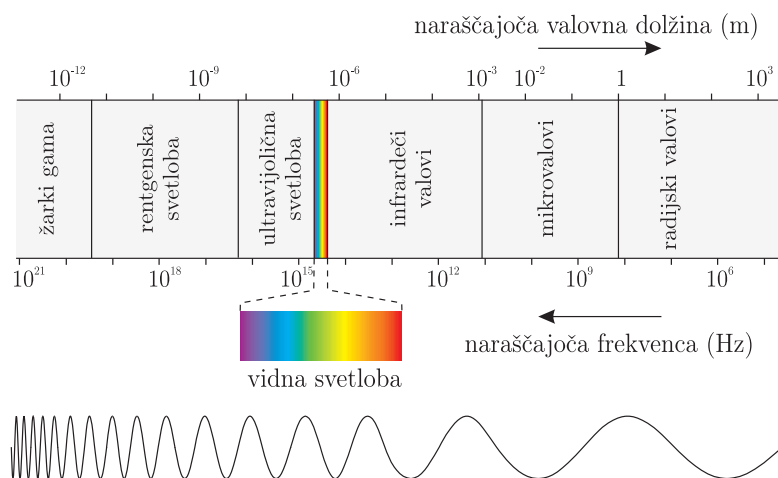
Elektromagnetno valovanje se obnaša kot valovanje in kot curek fotonov, čemur pravimo valovno-delčni dualizem. Kadar opisujemo elektromagnetno valovanje kot valovanje, ga opišemo s hitrostjo razširjanja ter valovno dolžino ali frekvenco. Ko pa ga opisujemo kot curek delcev, pa podamo njihovo energijo (E). Slednja je neposredno povezana s frekvenco

$$E = h \nu. \quad (3.2)$$

Pri tem je Planckova konstanta $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$. Večja frekvenca (manjša valovna dolžina) pomeni večjo energijo, manjša frekvenca (večja valovna dolžina) pa manjšo energijo. Valovanje z daljšimi valovnimi dolžinami je torej manj nevarno za živa bitja kot valovanje s krajšimi. Polovica energije valovanje je shranjena v električnem polju, druga polovica pa v magnetnem polju.

3.2 Spekter elektromagnetnega valovanja

Spekter elektromagnetnega valovanja je oznaka za celoten razpon valovnih dolžin oziroma frekvenc, ki jih lahko zajame elektromagnetno valovanje. Z oznako pojmujeemo torej obseg valovanja, ki ga seva, odbija ali prepušča določeno telo. Najbolj poznana oblika elektromagnetnega sevanja je vidna svetloba, ki zajema zelo majhen del celotnega elektromagnetnega spektra. Večji in za daljinsko zaznavanje pomembnejši del slednjega leži izven območja, ki ga zazna človeško oko.



Slika 3.3: Spekter elektromagnetnega valovanja je zelo širok. Pri daljinskem zaznavanju uporabljamo njegov manjši del.

Spekter elektromagnetnega valovanja lahko razdelimo v posamezne skupine, ki imajo različno energijo, valovno dolžino in frekenco (slika 3.3). Meje med posameznimi deli elektromagnetnega spektra niso ostre, kljub temu pa lahko določimo nekaj skupin s podobnimi lastnostmi. Najbolj poznani del spektra je vidna svetloba, poleg tega pa so pomembni še radijski valovi, mikrovalovi, infrardeči valovi, ultravijolična svetloba, rentgenski žarki in žarki gama. Bolj vroča telesa ali delci, ki se gibljejo zelo hitro, ustvarjajo visokoenergijska valovanja (rentgenska svetloba in žarki gama), hladnejša telesa ali počasnejši delci pa nizko energijsko sevanje (radijsko valovanje).

V območju dolgih valovnih dolžin (to je pri nizki frekvenci in energiji) srečamo najprej *radijske valove*. Ustvarjajo jih antene prave velikosti ali zvezde in plini v vesolju. Njihova valovna dolžina je od nekaj 100 m do 1 mm. Radijske valove uporabljamo za prenos podatkov, na primer pri televiziji ali mobilnih telefonih.

Radijskim valovom sledijo *mikrovalovi*. Mikrovalovi zajemajo območje med približno 1 m in 1 mm. Ustvarjajo jih klistroni in magnetoni, zanje pa je značilno, da jih

absorbirajo molekule v tekočinah, ki imajo dipolni moment (kar s pridom izkoriščamo v mikrovalovnih pečicah).

Infrardeče valovanje, pogosto ga imenujemo tudi toplota, ker je nanj občutljiva naša koža, je v območju med 1 mm in 750 nm. V grobem ga lahko razdelimo na tri dele, in sicer daljno infrardečo (10 μm –1 mm), ki je blizu mikrovalovom in jo praviloma absorbirajo molekule v plinih in tekočinah oziroma fononi v trdnih snoveh, srednjo infrardečo (2,5 μm –10 μm), ki jo močno sevajo topli predmeti, absorbirajo pa nihajoče molekule, ter bližnjo infrardečo (750 nm–2,5 μm), ki meji na vidno svetlobo in ima njej podobne lastnosti.

Infrardeči sledi *vidna svetloba*. Gre za območje, v katerem Sonce (in podobne zvezde) izsevajo največ svetlobe in v katerem so, ne po naključju, človeške oči najbolj občutljive. Vidno in bližnjo infrardečo svetlobo ponavadi absorbirajo in sevajo elektroni, ki v molekulah in atomih prehajajo z enega na drugi energijski nivo. Vidna svetloba predstavlja le neznamenit del celotnega elektromagnetnega spektra. Zaradi barvnega vtisa ta del spektra razdelimo na rdečo (625–740 nm), oranžno (590–625 nm), rumeno (565–590 nm), zeleno (520–565 nm), turkizno (500–520 nm), modro (430–500 nm) in vijolično (380–430 nm) barvo.

Vidnemu elektromagnetnemu valovanju na visokoenergijskem delu spektra sledi *ultravijolična svetloba*, ki zajema valovne dolžine med 0,3 μm in 30 nm. Ta svetloba lahko cepi kemijske vezi, močno reagira z molekulami in spremeni njihovo delovanje. Dobro so poznani uničujoči učinki pretiranega izpostavljanja kože ultravijolični svetlobi. Sonce izseva veliko tovrstne svetlobe, ki pa se večinoma absorbira v atmosferi.

Še bolj energijsko močni so *rentgenski žarki*, ki imajo valovno dolžino med 10 nm in 100 pm. Z rentgensko svetlobo lahko preiskujemo notranjost teles, predvsem v medicini, poleg tega pa jo uporabljamo tudi v astronomiji in visokoenergijski fiziki. Gre za tako imenovano ionizirajoče sevanje, ki je za živa bitja nevarno. Vir tovrstne svetlobe so spremembe v energijskih nivojih atoma.

Žarki gama predstavljajo elektromagnetno valovanje z največjo energijo. Njihove valovne dolžine navzgor niso omejene. Žarke gama uporabljamo v (jedrski) medicini za preiskave in zdravljenje pa tudi v astronomiji pri opazovanju visokoenergijskih predmetov in območij. Dobimo jih pri radioaktivnem razpadu in drugih atomskih procesih ter v pospeševalnikih delcev kot rezultat anihilacije para elektron pozitron.

Pri daljinskem zaznavanju uporabljamo – zaradi lastnosti atmosfere in razpoložljivosti vira valovanja – le omejen del elektromagnetnega spektra, in sicer vidno svetlobo, infrardečo svetlobo in mikrovalove (poglavje 4).

Vprašanja

1. Kaj je elektromagnetno valovanje in kako ga opišemo?
2. Opiši spekter elektromagnetnega valovanja.
3. Kateri je najpomembnejši vir elektromagnetnega valovanja v daljinskem zaznavanju?

4 Interakcija z atmosfero

Elektromagnetno valovanje na poti od vira do senzorja potuje skozi *atmosfero* (slika 4.1). Pot opravi enkrat, če opazujemo lastno sevanje zemeljskega površja, oziroma dvakrat, kadar opazujemo odbito valovanje (Sonca ali umetnega vira). Pri tem pride do interakcije, ki je odvisna od sestave ozračja, predvsem velikosti delcev, in valovne dolžine valovanja. V nadaljevanju si bomo ogledali načine sodelovanja valovanja z ozračjem in opisali dele elektromagnetnega spektra, ki jih atmosfera prepušča in jih zato lahko uporabimo pri daljinskem zaznavanju.

Atmosfera ali ozračje je plinast plašč okoli Zemlje, ki oslabi in vpije Sončevo ali kozmično sevanje. Atmosfera vsebuje 77 % dušika, 21 % kisika, 0,93 % argona, 0,03 % ogljikovega dioksida, ozon, vodno paro, prašne delce ... Kemična sestava zraka se od morske gladine do velikih višin načeloma ne spreminja bistveno, zato pa se spreminja gostota (vsakih 5000 metrov se gostota prepolovi). Plasti atmosfere so prikazane v tabeli 4.1.

<i>Plast</i>	<i>Višina (km)</i>
Troposfera	0–12 (8 nad poli do 16 nad ekvatorjem)
Stratosfera	12–50 (v tej plasti je ozonska plast)
Mezosfera	50–80
Termosfera	80–650 (v tej plasti je ionosfera)
Eksosfera	650–

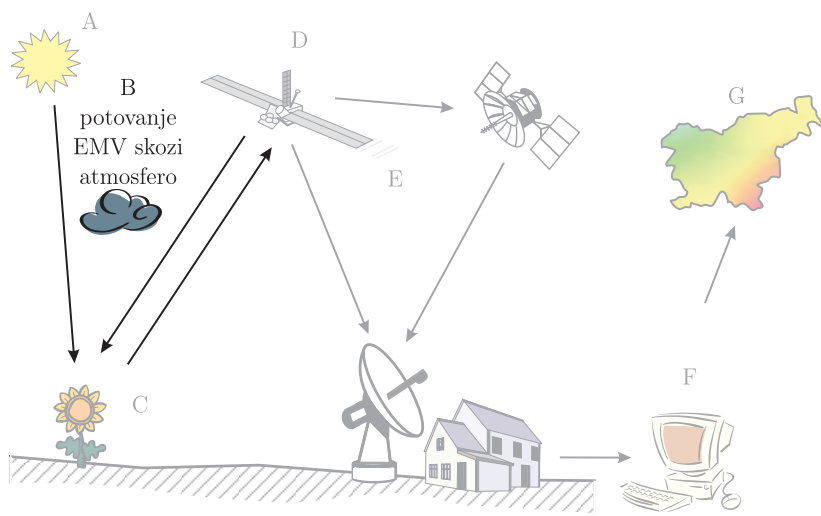
Tabela 4.1: Plasti atmosfere.

Trdni delci, molekule plinov in tekočin v atmosferi, vplivajo na vpadno valovanje. Glavni načini delovanja ozračja na prehajajoče valovanje so:

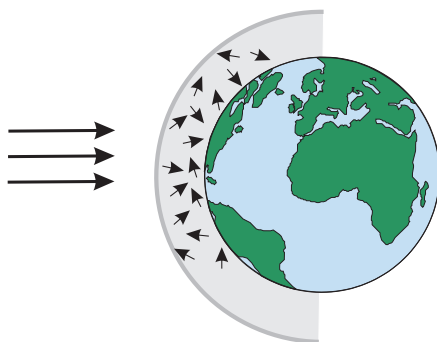
- *sipanje*,
- *absorpcija* in
- *lom*.

4.1 Sipanje

Do *sipanja* pride, ko valovanje pade na delce, na primer prah, ali velike plinske molekule v ozračju. Pri tem se smer valovanja spremeni (slika 4.2). Jakost sipanja je odvisna od



Slika 4.1: Potovanje elektromagnetnega valovanja skozi atmosfero.

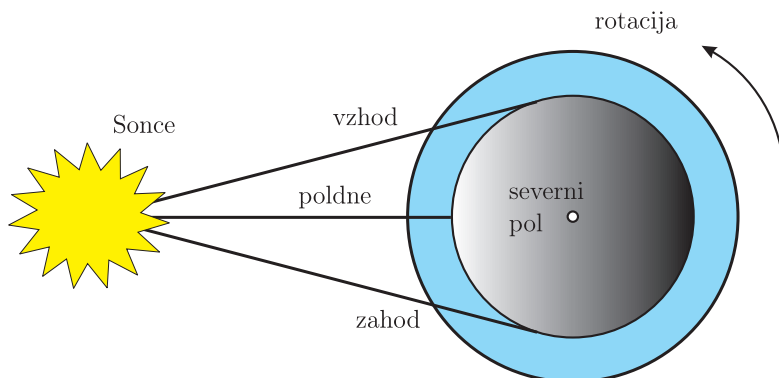


Slika 4.2: Sipanje valovanja v atmosferi.

velikega števila dejavnikov, od katerih so najpomembnejši valovna dolžina valovanja, gostota delcev in molekul ter dolžina poti, ki jo valovanje opravi v atmosferi. Poznamo tri vrste sipanja:

- *Rayleighovo*,
- *Miejevo* in
- *neselektivno*.

Rayleighovo sipanje nastane, ko so delci v ozračju majhni v primerjavi z valovno dolžino valovanja. Ponavadi gre za delce prahu ali pa za molekule dušika in kisika. Sipanje je bolj izrazito pri krajših valovnih dolžinah. Rayleighovo sipanje je prevladujoče v zgornjih plasteh atmosfere in prav zaradi tega pojava je nebo videti »modro«. Ko Sončeva svetloba prodira skozi atmosfero, se krajše valovne dolžine (modra svetloba) vidnega dela spektra močneje sipajo kot daljše. Ob sončnem vzhodu in zahodu je pot skozi atmosfero daljša kot opoldne, zato je sipanje krajših valovnih dolžin bolj



Slika 4.3: Rayleighovo sipanje močnejše vpliva na krajše valovne dolžine kot na daljše. Ker je pot žarkov skozi atmosfero ob vzhodu in zahodu daljša, je sipanje modre svetlobe bolj izrazito in Sonce je zato videti rdeče barve.

intenzivno (slika 4.3). Skozi atmosfero pridejo v glavnem daljše valovne dolžine (rdeča svetloba), zato je Sonce takrat videti rdeče.

Mijevo sipanje se pojavi, kadar so delci v atmosferi približno enako veliki kot je valovna dolžina vpadlega valovanja. Najpogostejši vzroki za to sipanje so prah, cvetni prah, dim in vodna para. Mijevo sipanje v primerjavi z Rayleighovim močnejše vpliva na daljše valovne dolžine. Značilnost tovrstnega sipanja je usmerjenost, saj je najbolj izrazito v smeri vpada valovanja (torej naprej), še posebej pri večjih delcih. Pojavi se predvsem v nižjih plasteh atmosfere, kjer so večji delci tudi pogostejši. Mijevo sipanje je najbolj močno v času oblačnosti. Zaradi tovrstnega sipanja so oblaki in megla videti beli, ker se modra, zelena in rdeča svetloba sipajo približno enako.

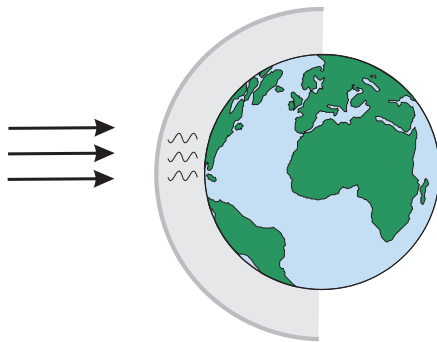
Zadnji sipalni mehanizem je *neselektivno sipanje*, ki se pojavi, kadar so delci, na katerih sipanje poteka, mnogo večji od valovne dolžine valovanja. Povzročajo ga predvsem vodne kapljice in veliki prašni delci. Neselektivno sipanje je ime dobilo zaradi dejstva, da na vse valovne dolžine vpliva približno enako. Do tovrstnega sipanja pride predvsem v nižjih plasteh ozračja, na meglicah (smogu), ki so zaradi neodvisnosti sipanja od valovne dolžine videti sive.

4.2 Absorpcija

Naslednji pojav, da katerega pride med potovanjem elektromagnetnega valovanja skozi atmosfero, je *absorpcija* (slika 4.4). Pri absorpciji molekule v ozračju absorbirajo energijo različnih valovnih dolžin. *Ozon*, *ogljikov dioksid* in *vodna para* med vsemi sestavinami ozračja najmočnejše absorbirajo svetlobo.

Ozon absorbira ultravijolično svetlobo, ki je najbolj škodljivi (za večino živih bitij) del Sončevega sevanja. Brez zaščitnega plašča ozona bi se naša koža v stiku z vpadno svetlobo opekla, večina živih bitij pa sevanja ne bi preživel. Ultravijolična svetloba povzroča spremembe genskega materiala v celicah. Te so večinoma škodljive in celo smrtno nevarne, vendar pa včasih povzročijo tudi koristne mutacije živih bitij.

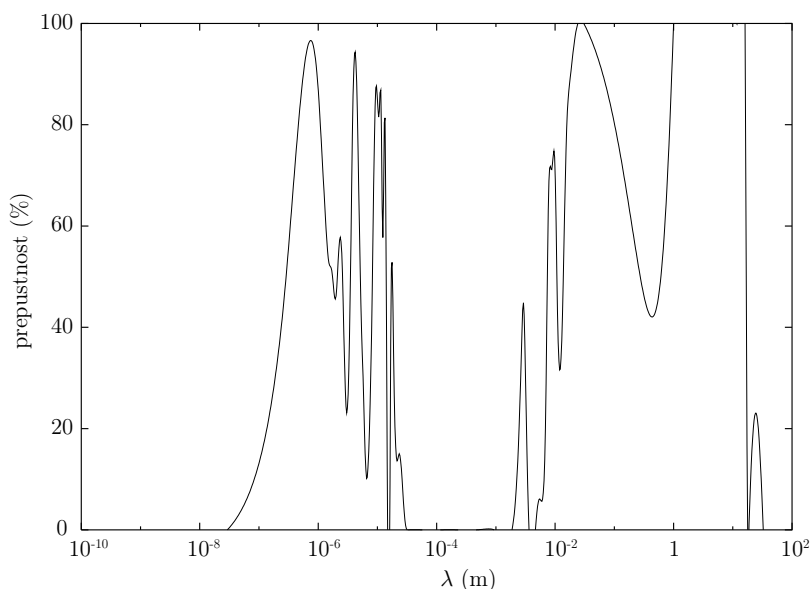
Ogljikov dioksid je znan kot plin tople grede. Razlog za to je njegova velika zmožnost absorpcije elektromagnetnega valovanja v območju infrardeče svetlobe – to je v delu, povezanem s termičnim sevanjem. Ogljikov dioksid zadržuje »toploto« v atmosferi, s



Slika 4.4: Absorpcija valovanja v atmosferi.

čimer preprečuje ohlajanje zemeljskega površja in ustvari podoben učinek kot steklo tople grede.

Vodna para v ozračju absorbira veliko dolgovalovnega infrardečega valovanja, poleg tega pa tudi kratkovalovne mikrovalove (z valovno dolžino med $22\ \mu\text{m}$ in $1\ \text{mm}$). Vsebnost vode v spodnjih plasteh ozračja se močno spreminja, tako krajevno kot časovno (dnevno, letno). Tako vsebujejo, na primer, zračne mase nad puščavami le neznatne količine vode, medtem ko je v tropskih krajih vlažnost (vsebnost vode) v zraku zelo velika.



Slika 4.5: Prepustnost zemeljske atmosfere v odvisnosti od valovne dolžine določa okna, ki jih lahko uporabljamo za daljinsko zaznavanje.

Ker omenjeni trije plini v ozračju absorbirajo valovanje samo v posameznih delih elektromagnetnega spektra, določajo, katere dele spektra lahko uporabljamo pri daljinskem zaznavanju. Dele, na katere atmosfera ne vpliva pretirano, in jih torej lahko

Valovna dolžina (λ)	Spektralni pas
0,30–0,75 μm 0,77–0,91 μm	ultravijolična in vidna svetloba
1,55–1,75 μm 2,05–2,4 μm	bližnja infrardeča svetloba
8,0–9,2 μm 10,2–12,4 μm	daljna (termična) infrardeča svetloba
7,5–11,5 mm 20 mm–	mikrovalovi

Tabela 4.2: Atmosferska okna so področja, ki so uporabna za daljinsko zaznavanje (Campbell, 2002).

uporabimo pri daljinskem zaznavanju, imenujemo *atmosferska okna*. Pri izbiri pravih valovnih dolžin moramo poleg njih upoštevati tudi značilnosti dveh najpogostejših virov elektromagnetnega valovanja, to je Sonca in Zemlje. Prepustnost atmosfere v odvisnosti od valovne dolžine prikazuje slika 4.5.

Vidni del elektromagnetnega spektra, v katerem so človeške oči najbolj občutljive, ustreza tako atmosferskemu oknu kot tudi največji intenziteti Sončeve svetlobe. Prepustno okno je tudi v območju pri približno 10 μm , to je v termičnem delu spektra, kjer ima vrh sevanje zemeljske površine pri »normalni«
temperaturi. Za daljinsko zaznavanje je, kljub odsotnosti naravnih virov svetlobe, pomemben tudi pas valovnih dolžin nad 1 mm, čemur ustreza mikrovalovna svetloba. Glavna prepustna okna podaja tabela 4.2.

4.3 Lom valovanja

Pri prehodu valovanja med optično različno gostimi snovmi pride do *loma valovanja*. Ko potuje svetloba iz optično redkejšega medija (na primer iz zraka) v gostejšega (na primer v steklo), se lomi proti normali (premici, pravokotni na površino). Do tega pojava pride, ker se valovanje v gosti snovi upočasni in zato spremeni smer (slika 4.6 a). Pri prehodu iz optično gostejšega sredstva v optično redkejšo se valovanje lomi proč od normale.

Vpadni žarek, lomljeni žarek in normala ležijo pri lomu v isti ravnini. Za smeri žarkov velja lomni zakon

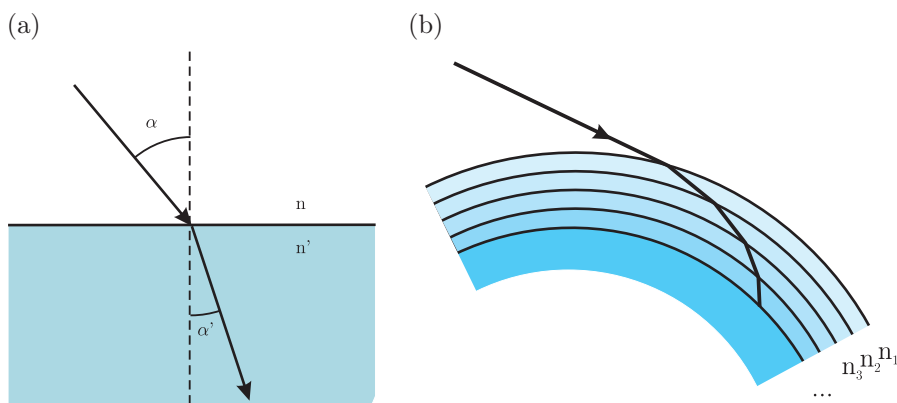
$$n \sin \alpha = n' \sin \alpha'. \quad (4.1)$$

Pri tem sta α in α' lomna kota, n in n' pa ustrezna lomna količnika. Lomni količnik je povezan s hitrostjo svetlobe v snovi in je snovna konstanta

$$c = \frac{c_0}{n}. \quad (4.2)$$

Večji ko je lomni količnik, močnejši je lom. Ker se lomni količnik atmosfere spreminja z njeno višino, je lom svetlobe pri potovanju skozi ozračje zelo zapleten (slika 4.6 b).

Lom svetlobe povzroči premik zvezd glede na njihov navidezni položaj, poleg tega pa rahlo popači sliko Zemlje iz vesolja. Pri ustvarjanju podob moramo zato upoštevati snemalno geometrijo in na podobah odpraviti vodoravni premik, ki ga lom povzroči.



Slika 4.6: Lom svetlobe pri prehodu iz optično redkejši snovi v optično gostejšo (a) in potovanje žarka svetlobe skozi atmosfero (b).

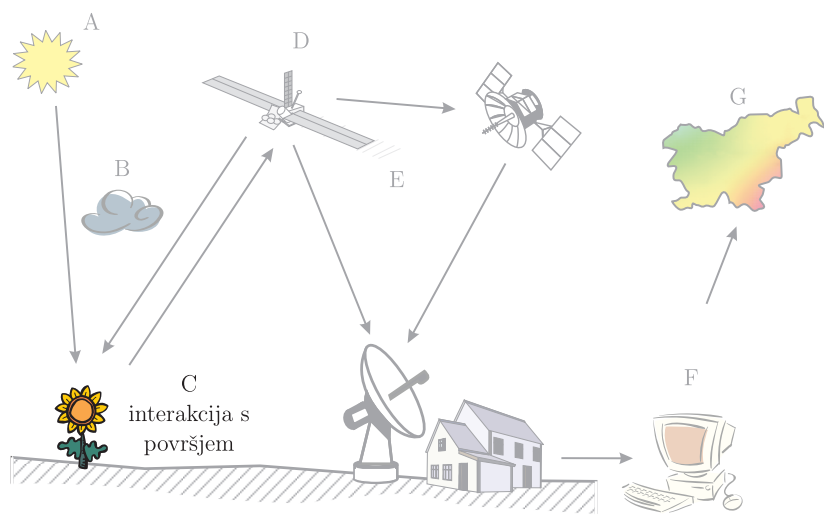
Pri tem praviloma uporabljamo preprost model, tako za obliko Zemlje kot za atmosfero. Zapletene spremembe poti in s tem časa potovanja signala povzročijo tudi spremembe lomnega količnika zaradi nihanja temperature in vlage v ozračju. Težava je še posebej opazna pri opazovanju, ki temelji na meritvah časa, na primer pri lidarju ali radarju.

Vprašanja

1. Opiši interakcijo elektromagnetnega valovanja z atmosfero.
2. Kakšne vrste sipanje poznamo?
3. Kaj je absorpcija valovanja?
4. Opiši lom valovanja v atmosferi.
5. Opiši idealne atmosferske pogoje za snemanje v vidnem delu spektra.
6. Ali lahko uporabljamo senzorje v ultravijoličnem delu spektra?

5 Interakcija s površjem

Elektromagnetno valovanje, ki se ne absorbira ali sipa v atmosferi, pride do zemeljskega površja in z njim interagira (slika 5.1). Vrsto in stopnjo interakcije določajo lastnosti površja in valovna dolžina vpadnega valovanja. Odvisnost odboja od valovne dolžine (tako imenovani spektralni podpis) omogoča prepoznavanje predmetov, podobno kot lahko na osnovi podpisa prepoznamo osebe.

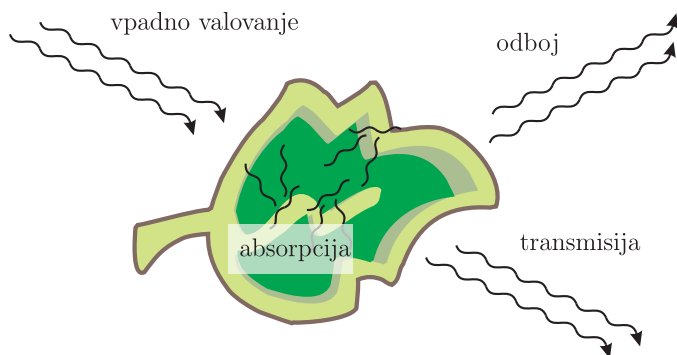


Slika 5.1: Ko valovanje pride do zemeljskega površja, z njim interagira.

Obstajajo trije glavni načini sodelovanja valovanja s površjem (slika 5.2):

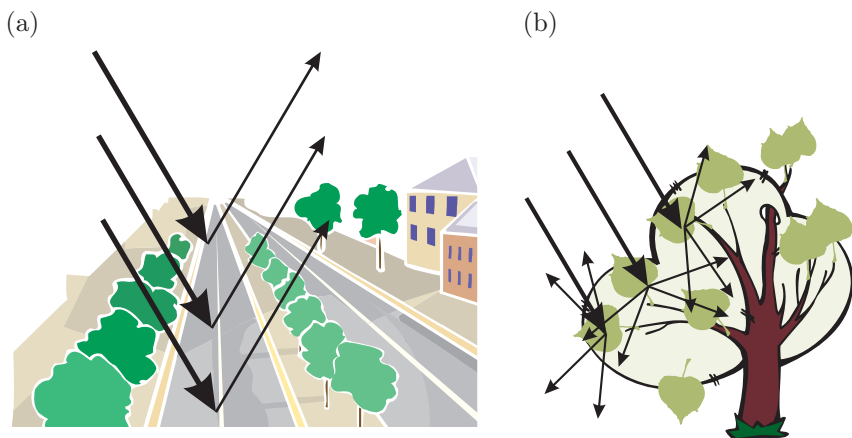
- *absorpcija*,
- *transmisija* in
- *odboj*.

Vpadna energija interagira s površjem na enega ali več od omenjenih načinov. Razmerje med njimi je odvisno od valovne dolžine svetlobe ter lastnosti in stanja površja. *Absorpcija* je pojav, pri katerem se sevanje (energija) vpije ali absorbira v snovi. Pri



Slika 5.2: Poznamo tri osnovne načine interakcije valovanja s površjem, in sicer absorpcijo, transmisijo in odboj.

transmisiji valovanje ali pogosteje njegov del prodre skozi snov. Ob *odboju* oziroma refleksiji se valovanje na opazovanem predmetu »odbije« in nadaljuje pot v spremenjeni smeri. Pri daljinskem zaznavanju se ponavadi ukvarjamo z odbito oziroma reflektirano svetlobo, to je valovanjem, ki se od opazovanih predmetov odbije v smeri proti senzorju. Ločimo dva skrajna primera odboja elektromagnetnega valovanja na površini, in sicer *zrcalni odboj* in difuzni ali *razpršeni odboj*.



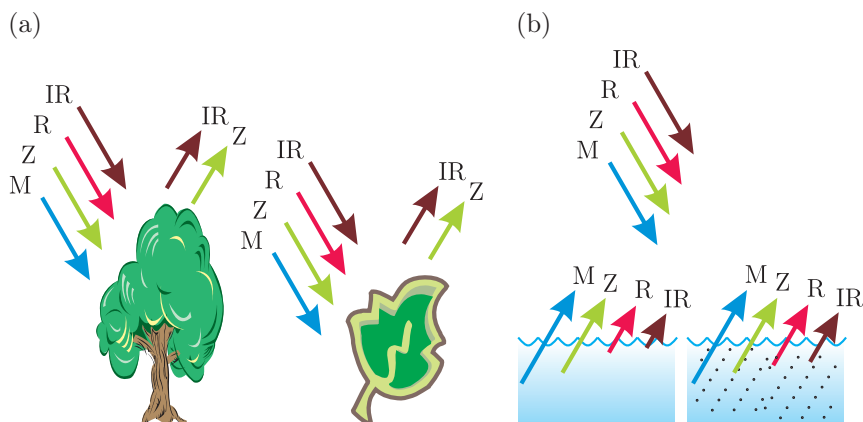
Slika 5.3: Odboj valovanja na površju: zrcalni (a) in razpršeni (b).

Do zrcalnega odboja (slika 5.3 a) pride, kadar valovanje pade na gladko površino. Pri tem se vsa – ali skoraj vsa – vpadna energija odbije stran od odbojne površine v eni sami smeri, odbojni kot pa je enak vpadnemu. Razpršeni odboj (slika 5.3 b) pa se pojavi, kadar je ploskev groba in se valovanje odbije (približno enako) v vse smeri. Večina predmetov na površju Zemlje je po lastnostih nekje med zrcalnim in difuznim odbojnikom.

Ali neko telo deluje kot zrcalni ali kot razpršeni odbojnik ali nekje vmes, je odvisno od njegove razgibanosti, in sicer v primerjavi z valovno dolžino vpadnega valovanja. Če so valovne dolžine manjše ali primerljive z značilnimi dolžinami na površju (razgibanost) ali od velikosti predmetov, ki površje sestavljajo, pride v glavnem do razpršenega

odboja. V primeru, ko pa je valovna dolžina večja od značilnih razdalj na površju, pride do zrcalnega odboja. Tako je, na primer, drobnnozrnat pesek popolnoma gladek za dolge valovne dolžine (mikrovalovi), hkrati pa precej razgiban za vidno svetlobo.

Oglejmo si nekaj značilnih predmetov na zemeljski površini ter opišimo, kaj se dogaja z elektromagnetnim valovanjem ob stiku z njimi. Podrobneje se bomo ukvarjali z vegetacijo, vodo in golimi tlemi ter z vidno in bližnjo infrardečo svetlobo.



Slika 5.4: Interakcija elektromagnetnega valovanja z vegetacijo (a) in vodo (b).

Klorofil v zelenih rastlinah močno absorbira valovanje v rdečem in modrem delu spektra, medtem ko odbija zeleno svetlobo (slika 5.4 a). Listi se nam zato zdijo zeleni, in sicer najbolj spomladi in zgodaj poleti, ko stopnja klorofila v njih doseže vrhunec. Jeseni je v njih manj klorofila, zato je absorpcija manjša in posledično močnejši odboj rdeče svetlobe, zaradi česar se listi zdijo rdeči ali rumeni.¹ Notranja zgradba zdravih listov predstavlja odličen difuzni odbojnik za svetlobo bližnjega infrardečega dela spektra. Če bi bile naše oči občutljive na infrardečo svetlobo, bi se nam drevesa zdela izredno svetla, saj je odboj v infrardečem delu spektra kar petkrat večji kot v vidnem. Merjenje in opazovanje odboja v infrardečem delu spektra predstavlja zelo natančen mehanizem določanja zdravosti (ali poškodovanosti) vegetacije. V delu infrardeče pa opazimo absorpcijske pasove zaradi vode v listih, ki močno absorbira valovne dolžine 1,4 μm , 1,9 μm in 2,5 μm . Absorpcija je neposredno povezana s količino vode in je merilo za vlažnost vegetacije.

Precej drugačno pa je dogajanje ob interakciji valovanja z *vodo* (slika 5.4 b). Voda močneje absorbira daljše valovne dolžine vidne in infrardeče svetlobe kot kratkovalovno vidno svetlobo. Zaradi znatnega odboja je voda ponavadi videti modra ali modrozelená. Pri opazovanju v rdečem in infrardečem delu spektra pa je videti temna. Stanje je nekoliko spremenjeno, kadar so v vrhnjih plasteh vode raztopljene rudninske snovi. V tem primeru pride do močnejšega odboja in voda je videti v vseh pasovih svetlejša. Barva vode je v tem primeru navidežno pomaknjena proti daljšim valovnim dolžinam, torej proti rdečemu delu spektra. Raztopljene sedimente zlahka zamenjamo s plitvo vodo, ki je na podobah videti skoraj enaka. Klorofil v algah absorbira del modre svetlobe in odbija zeleno, zaradi česar je voda, ki vsebuje alge, videti zelenkasta. Na način interakcije valovanja z vodo vpliva tudi topografija vodnih površin. Na vodi

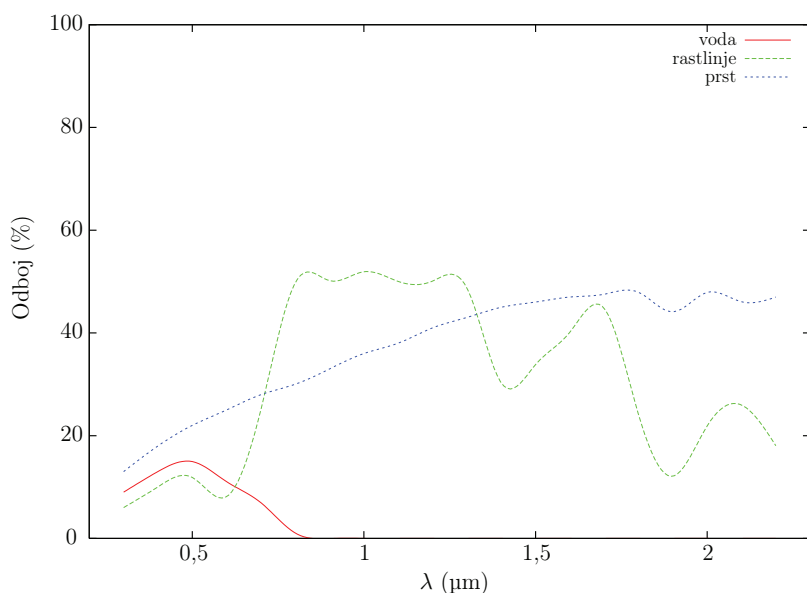
¹Rumena je mešanica zelene in rdeče.

lahko namreč pride v primeru, da je njena površina primerno razgibana, do zapletenega odboja, kar vpliva tako na barvo kot svetlost opazovane površine.

Lastnosti golih tal so močno odvisne od njihove mineralne sestave. Opazimo lahko bolj ali manj enakomerno naraščanje odboja z valovno dolžino, ki je v infrardečem delu spektra več kot dvakrat večji kot v vidnem. Prst je videti rdečkasto rjava, ker je odboj rdeče svetlobe močnejši od odboja zelene in od modre. Absorpcijski pasovi so enaki kot pri vegetaciji, tudi tu so povezani z vsebnostjo vode v prsti, pojavijo pa se pri 1,4 μm in 1,9 μm . Vlaga v prsti v splošnem znižuje odboj v celotnem delu spektra.

5.1 Spektralni podpis

Iz opisanih primerov vidimo, da je dogajanje pri interakciji valovanja s površjem – to je pri absorpciji, transmisiji in odboju – precej zapleteno. Še posebej, če imamo v mislih veliko število različnih predmetov na zemeljski površini, njihovo različno geometrijo in različne valovne dolžine uporabljene svetlobe. Z merjenjem energije, ki se odbije na predmetih zemeljskega površja (ali pa jo ta sevajo), lahko ustvarimo *spektralni podpis* opazovanih predmetov (slika 5.5).



Slika 5.5: Spektralni podpis podaja odvisnost odboja od valovne dolžine.

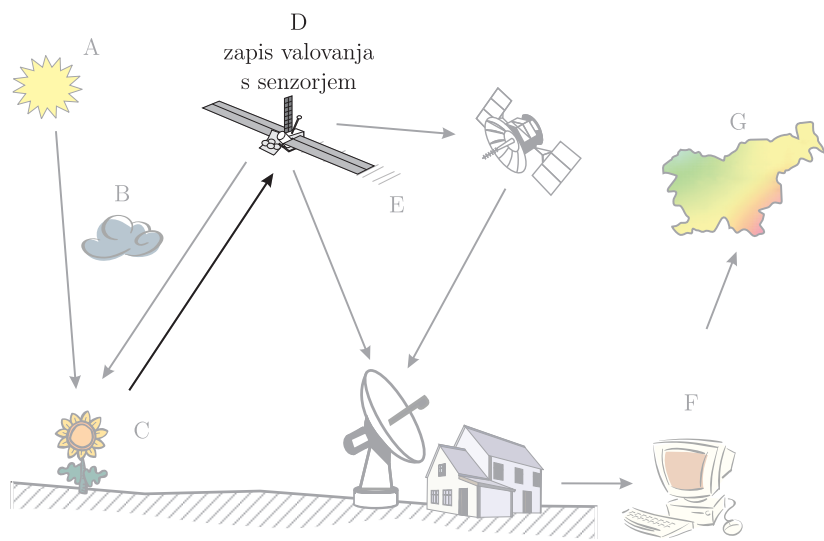
S primerjavo odziva pri različnih valovnih dolžinah lahko predmete med seboj ločimo, kar pri opazovanju z eno samo valovno dolžino pogosto ni mogoče. Tako imata, na primer, voda in rastlinje približno enako odbojnost v vidnem delu spektra, medtem ko ju v infrardečem vedno ločimo med seboj. Spektralni odziv je lahko precej različen, celo za enake predmete, poleg tega pa se spreminja tudi časovno (na primer »zelenost« listov) in prostorsko. Poznavanje spektralno »zanimivih« območij in razumevanje dejavnikov, ki vplivajo na spektralni podpis, je pomembno za razumevanje načina interakcije valovanja s površjem, kar olajša interpretacijo posnetkov.

Vprašanja

1. Opiši interakcijo elektromagnetnega valovanja s površjem.
2. Kako odbija valovanje vegetacija in kako voda?
3. Kaj je spektralni podpis?

6 Sistemi daljinskega zaznavanja

V prejšnjih poglavjih smo spoznali osnove, potrebne za razumevanje postopka daljinskega zaznavanja. Podrobneje smo se ukvarjali s prvimi fazami tega postopka: virom energije (poglavje 3), interakcijo valovanja z atmosfero (poglavje 4) in interakcijo s površjem (poglavje 5). V tem poglavju si bomo podrobno ogledali zaznavanje in zapisovanje elektromagnetnega valovanja (slika 6.1). Ukvarjali se bomo z lastnostmi platform in senzorjev, ki jih uporabljamo pri daljinskem zaznavanju, in s podatki, ki jih zajemamo.

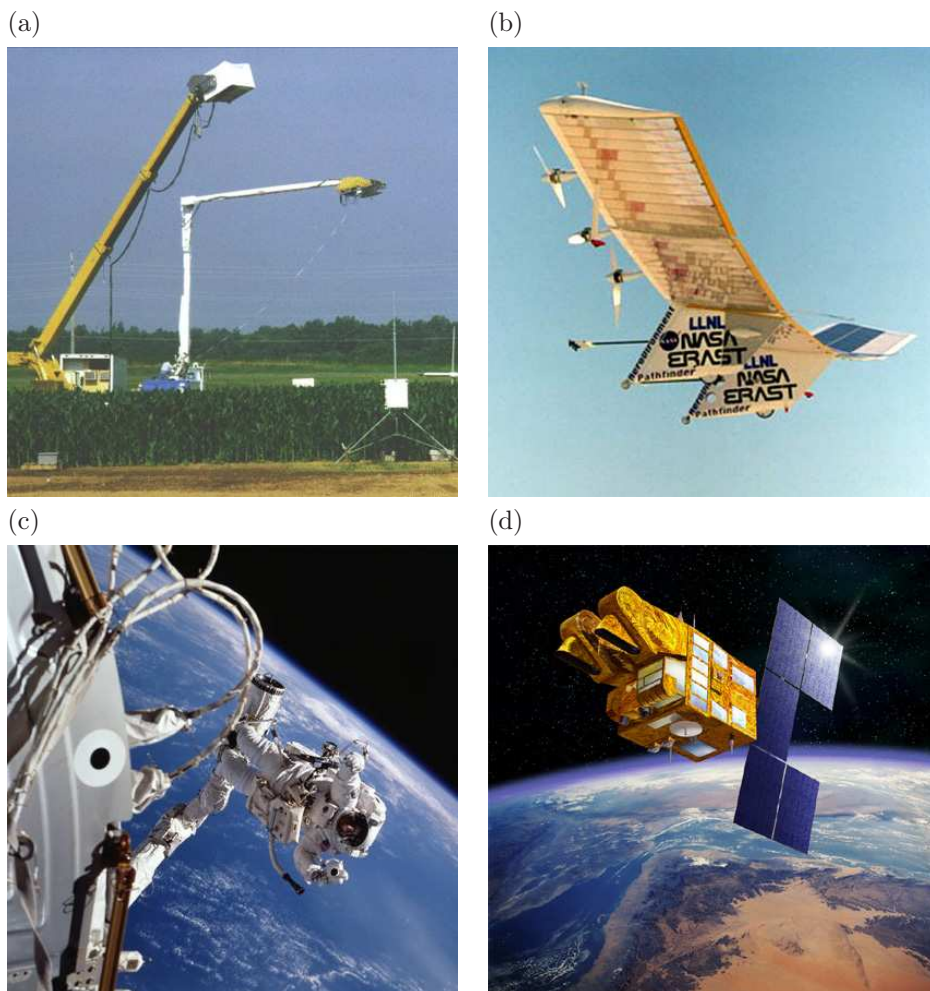


Slika 6.1: Zapis elektromagnetnega valovanja s senzorjem.

6.1 Platforme daljinskega zaznavanja

Senzor, s katerim želimo zaznavati in zapisovati odbito ali sevano elektromagnetno valovanje, se mora nahajati na stabilni platformi oziroma nosilcu. Ta mora biti odmaknjena od predmeta ali površine, ki jo opazujemo (sicer ne gre za daljinsko zaznavanje). Platforme, ki jih uporabljamo, so lahko (slika 6.2):

- na tleh,



Slika 6.2: Senzorji daljinskega zaznavanja so nameščeni na (a) tleh, (b) letalih, (c) vesoljskih plovilih in (d) satelitih.

- letalih ali balonih (oziroma drugih nosilcih znotraj atmosfere) in
- satelitih ali vesoljskih plovilih (oziroma drugih nosilcih zunaj atmosfere).

Talne senzorje ponavadi uporabljamo za primerjavo informacij o površju s podatki, ki jih prinašajo sateliti in letala. Pogosto skušamo z njimi bolje opisati predmete, ki jih opazujemo z drugimi senzorji. Na ta način lahko razumemo informacije, ki jih posredujejo podobe, ustvarjene s sateliti in letali. Talni senzorji so lahko nameščeni na lestvah, posebnih odrih, visokih zgradbah, vozilih s posebnimi rokami, žerjavih ... (slika 6.2 a).

V *zraku* daljinsko zaznavanje ponavadi poteka iz prirejenih letal (slika 6.2 b), včasih pa uporabljamo tudi helikopterje. Z letali lahko pridobivamo zelo natančne podatke o zemeljskem površju. Ob ugodnih razmerah lahko z njimi snemamo kadar koli na katerem koli delu Zemlje.

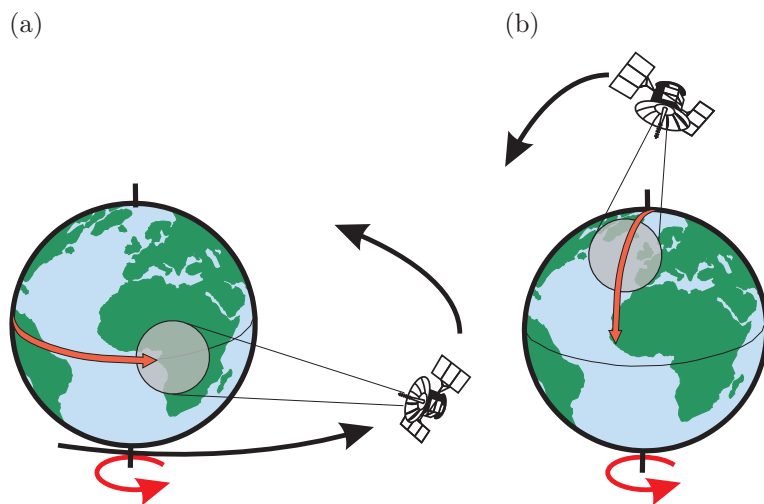
V *vesolju* snemanje opravljamo iz vesoljskih plovil (space shuttle; slika 6.2 c) ali, pogostejše, iz satelitov (slika 6.2 d). Sateliti so telesa (objekti), ki krožijo okrog drugih teles, v našem primeru okrog Zemlje. Primer naravnega satelita je Luna, umetni sateliti pa so tisti, ki jih je ustvaril človek in so namenjeni za daljinsko zaznavanje, telekomunikacije, telemetrijo (določanje položaja in navigacijo). Zaradi svojih značilnih tirnic sateliti ustvarjajo ponovljivo pokritost zemeljskega površja.

Razlogov za izbiro platforme je več. Najpomembnejši so želena ločljivost (merilo), pokritost površja (mesto, država, celina) in cena sistema oziroma zajema.

6.2 Tirnice satelitov

Instrumente za opazovanje Zemlje lahko, kot smo spoznali, namestimo na najrazličnejše platforme. Kljub temu, da včasih uporabljamo sisteme, ki snemajo s tal, in precej pogosto tudi sisteme za opazovanje iz zraka, dandanes večino podob ustvarijo sateliti. Ti imajo kar nekaj pomembnih lastnosti, ki jih z drugimi sistemi ne moremo doseči. Omenimo le pokrivanje večjih površin, dobro poznano geometrijo in sistematično dolgoletno snemanje. Zato so pri opazovanju dogajanja na Zemlji sateliti danes že skoraj nepogrešljivi.

Pot, ki jo satelit opiše, imenujemo *tirnica* ali orbita. Tirnice satelitov so prilagojene namenu in zmogljivosti senzorjev, ki jih ti nosijo. Ločimo jih po višini (nad zemeljsko površino) ter njihovi usmerjenosti in nagnjenosti glede na Zemljo. Sodobni sateliti imajo bodisi *geostacionarno* bodisi *skoraj polarno tirnico*.



Slika 6.3: Geostacionarna (a) in skoraj polarna (b) tirnica satelita.

Geostacionarne tirnice imajo sateliti, ko so zelo oddaljeni od Zemlje in ves čas opazujejo isti del njenega površja (slika 6.3 a). Geostacionarni sateliti krožijo okrog Zemlje na višini približno 36 000 km s hitrostjo, ki ustreza hitrosti kroženja Zemlje. Tako se za opazovalca na Zemlji zdijo navidezno pri miru – in seveda obratno, sateliti ne »opazijo« njenega kroženja in so ves čas nad isto točko. Na ta način lahko ves čas snemajo določen del površja. Geostacionarne tirnice imajo ponavadi vremenski

Geostacionarna tirnica

Na satelite v geostacionarnih tirnicah delujeta gravitacijska sila Zemlje in centrifugalna sila zaradi kroženja. Ker sateliti ne spreminjajo višine kroženja, morata biti obe sili enako veliki

$$\begin{aligned} F_g &= F_c \\ \frac{\kappa M m}{r^2} &= \frac{mv^2}{r}. \end{aligned}$$

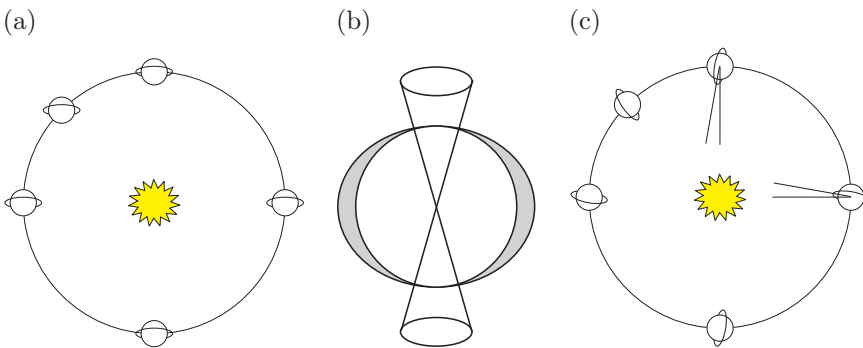
V enačbi je $\kappa = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ gravitacijska konstanta, $M = 5,983 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ masa Zemlje, $v = \omega r$ hitrost gibanja satelita in $\omega = 2\pi/t_o$ kotna hitrost, pri čemer je $t_o = 23 \text{ h } 56 \text{ m} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ s}$ obhodni čas (Zemlja se okoli svoje osi zavrti prej kot v 24 urah, manjkajoče minute pridobi zaradi gibanja okoli Sonca). Za geostacionarne satelite mora torej veljati, da je oddaljenost od Zemlje

$$r = \sqrt[3]{\frac{\kappa M t_o^2}{4\pi^2}} = 42261 \text{ km}.$$

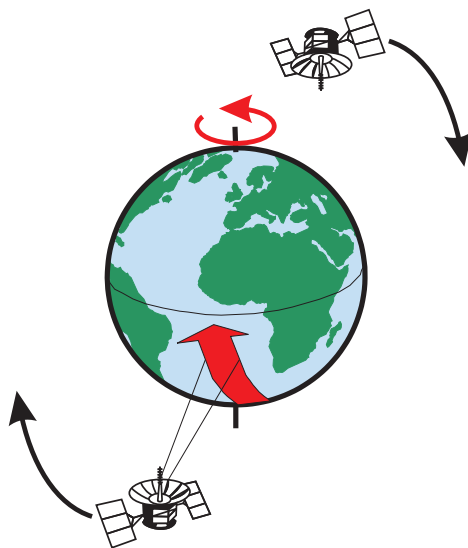
Če od omenjene razdalje odštejemo radij Zemlje, ki znaša 6378 km, dobimo približno 36 000 km.

in telekomunikacijski sateliti. Zaradi velike oddaljenosti od površja, lahko nekateri vremenski sateliti opazujejo celotno zemeljsko poloblo.

Veliko satelitov potuje po razmeroma nizkih tirnicah, ki so ponavadi usmerjene v smeri sever–jug. Z izkoriščanjem vrtenja Zemlje, ki poteka v smeri zahod–vzhod, ti sateliti v določenem času pokrijejo večji del površja. Tirnice takih satelitov se imenujejo *skoraj polarne*, zaradi njihovega rahlega naklona glede na premico, ki poteka med severnim in južnim polom (slika 6.3 b). Veliko skoraj polarnih tirnic je *sončno sinhronih*, kar pomeni, da iste dele površja pokrijejo vedno ob istem krajevnem času. Položaj Sonca je zato na določeni zemljepisni širini ob prehodu satelita v enakih letnih časih enak. S tem poskrbimo za enako osvetlitev površja in primerljivost podob, ki so bile



Slika 6.4: Satelit s polarno tirnico časovno spreminja ravnino kroženja glede na Sonce (a). Na satelite s skoraj polarno tirnico deluje Zemlja zaradi sploščenosti asimetrično (b), zato ostaja – pri pravem naklonu glede na pol – ravnina njihovega kroženja v enakem položaju glede na Sonce (c).



Slika 6.5: Dvigajoča in spuščajoča tirnica satelita.

zajete v različnih letih ali pa v nekaj zaporednih dneh. To je še posebej pomembno, ko želimo opazovati spremembe med posnetki ali ko želimo posnetke sosednjih območij združiti v mozaik. Podob sončno sinhronih tirnic namreč ni treba »popravlјati« zaradi različnih osvetlitvenih pogojev.

Zemlja ni popolna krogla, ampak je zaradi vrtenja sploščena na polih. Na tirnice, ki potekajo natanko od severa proti jugu, sploščenost deluje simetrično. Ravnina kroženja satelitov v takih tirnicah se zato ne spreminja glede na zvezde (slika 6.4 a). Ker pa se Zemlja vrti okrog Sonca, se navidezni položaj slednjega spreminja in glede na oddaljene zvezde v enem letu opiše celoten krog. Če torej v določenem trenutku leži tirnica *polarne*ga satelita v ravnini Sonca, bo zaradi kroženja Zemlje čez tri mesece nanjo pravokotna. Pri nagnjeni ali *skoraj polarni* tirnici satelit ne potuje prek zemeljskega pola, ampak nekoliko zamaknjeno (za približno 1000 km). Sploščenost Zemlje v tem primeru na satelit deluje asimetrično (slika 6.4 b), zaradi česar se ravnina kroženja spreminja glede na os vrtenja Zemlje (slika 6.4 c). S primernim naklonom – približno 8° – od polarne tirnice poskrbimo za sočasno (sinhrono) gibanje ravnine tirnice in Sonca. Satelit v tem primeru kroži ves čas v ravnini Sonca in zato površje vedno opazuje ob enakih krajevnih časih, torej *sončno sinhrono*.

Večina sodobnih satelitov za daljinsko zaznavanje kroži v skoraj polarnih tirnicah. Pri tem potujejo na eni strani Zemlje od juga proti severu in na drugi od severa proti jugu. Dela tirnic, ki temu potovanju ustrezata, imenujemo *dvigajoča* (proti severu) in *spuščajoča tirnica* (proti jugu). Obe vrsti tirnic sta prikazani na sliki 6.5. Pri sončno sinhronih satelitih je dvigajoča praviloma na senčni strani Zemlje in spuščajoča na sončni. Zato senzorji, ki zaznavajo odbito sončno svetlobo, površje snemajo samo v spuščajoči tirnici, ko je prisoten vir svetlobe. Aktivni senzorji, ki sami poskrbijo za svoj vir svetlobe, in pasivni senzorji, ki zajemajo termično (lastno) sevanje, lahko površje opazujejo tudi v dvigajočem delu tirnice.

Ko se satelit giblje okrog Zemlje, senzor »opazuje« določen del na njeni površini. Območje, ki ga satelit snema, imenujemo *pas* ali trak (slika 6.6). Pasovi za vesoljske

Satelitski manevri

Tirnice satelitov za opazovanje Zemlje so relativno stabilne in zelo natančno določene. Nosilna reketi ob izstrelitvi satelit namesti kar se da blizu želenega položaja, za sodobne satelite gre za natančnost nekaj metrov. Zaradi različnih dejavnikov, na primer delovanja »tretjih« teles, atmosferskega trenja, nesferičnosti Zemlje, Sončevega sevanja, pa se sčasoma tirnica spreminja in jo je treba občasno popravljati. Sateliti imajo zato posebne reakcijske motorje, ki s kratkimi sunki (impulzivnimi manevri) spremenijo velikost ali smer hitrosti satelita. Tako lahko spremenijo višino leta ali položaj (ravnino gibanja) tirnice.

Sateliti imajo ob izstrelitvi določeno zalogo goriva, ki omogoča delovanje reaktivnih korekcijskih motorjev. Odvisno od položaja tirnice in števila manevrov je energije dovolj za nekajletno usmerjanje. Ko se zaloge izpraznijo, satelita ni več mogoče usmerjati in je prepuščen naravnim silam. Orbitalni manevri so zato kar se da redki, natančni in energijsko varčni.

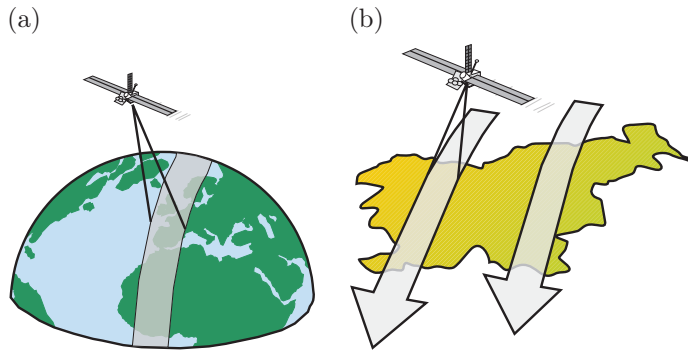
S povečevanjem števila predmetov, ki krožijo okrog Zemlje, se povečuje količina »vesoljskih odpadkov«. Zaradi načrtovanih novih izstrelitev satelite praviloma pred koncem delovanja odstranimo iz »delovnih« tirnic. Pri nizkoletnih satelitih (skoraj polarnih) jih spustimo na višino približno sto do dvesto kilometrov. Na tej višini satelit »iztiri«, pade v atmosfero in zgori v 24 urah. Ker pa premik iz nekaj sto kilometrov na relativno nizko višino zahteva precej energije, pogosto satelite spustimo le nekoliko nižje, na višino približno 600 km. Ta višina poskrbi za naravno iztiranje v približno 25 letih.

Geostacionarni sateliti krožijo na velikih višinah in jih ni mogoče preusmeriti v atmosfero. Ob koncu njihovega delovanja jih zato za približno 300 km oddaljimo od Zemlje v tako imenovano »pokopališko« tirnico. Tolikšna oddaljenost preprečuje Sončevemu sevanju in drugim majhnim silam, da bi satelit ponovno potegnile v geostacionarno tirnico.

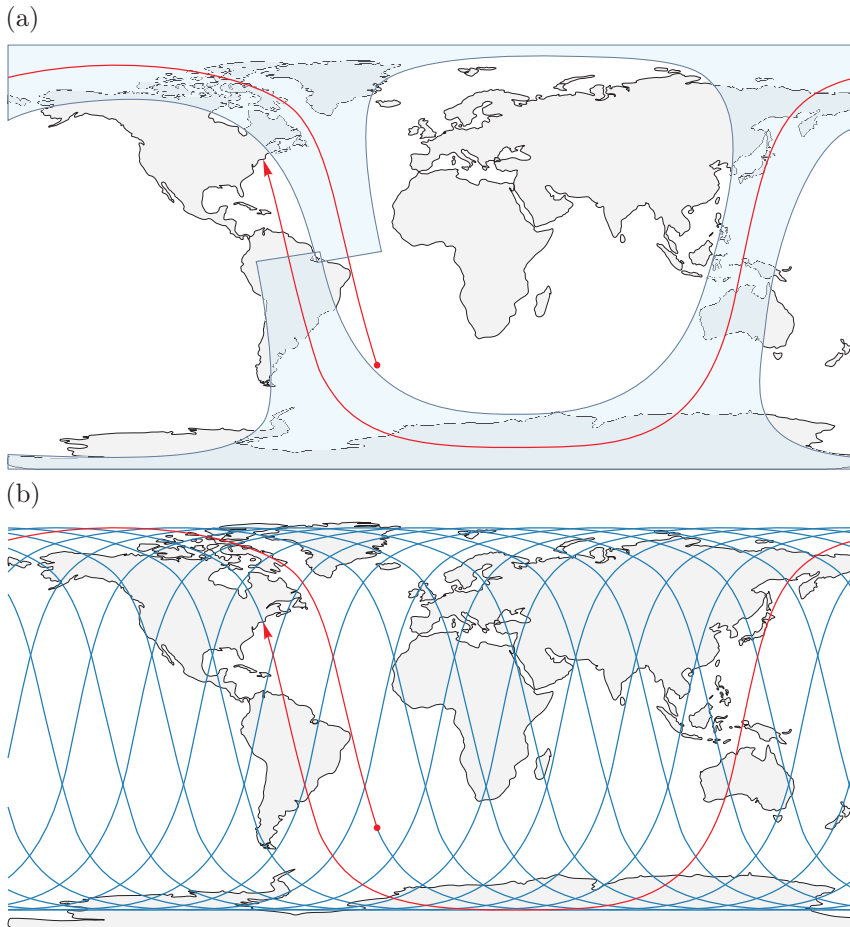
sisteme so široki od nekaj deset do nekaj tisoč kilometrov (IKONOS 11 km, QuickBird 16 km, SPOT 60 km, Landsat 180 km, AVHRR 2800 km). Satelitov položaj v smeri vzhod–zahod se med njegovim potovanjem okrog Zemlje ne bi spreminjal, če se ta ne bi pod njim vrtela. Za opazovalca na površju Zemlje se zaradi njenega kroženja – v smeri od zahoda proti vzhodu – zdi, da se satelit pomika proti zahodu. Zaradi tega navideznega premikanja satelit s svojim pasom ob zaporednih obhodih pokrije sosednja območja (slika 6.7).

Kombinacija kroženja satelita v smeri sever–jug in vrtenja Zemlje v smeri zahod–vzhod omogoča popolno pokritost njenega površja s podobami. Takšno pokritost satelit doseže s celotno *periodo tirnic* v času, ki ga imenujemo *čas ponovnega obiska*. Recimo, da pričnemo opazovati satelit v nekem naključno izbranem delu njegove tirnice. Satelit opiše eno periodo takrat, ko se ponovno vrne v začetno tirnico. Pri tem gre prek iste točke na zemeljski površini (to je nadirja ali podnožišča). Časovni interval, ki je potreben za takšno pokritje, je različen od satelita do satelita in traja od nekaj ur do nekaj tednov.

Praviloma moramo čas ponovnega obiska (ene periode) ločiti od *časa ponovnega snemanja*, to je časa, v katerem satelit lahko opazuje isto območje. Pri satelitih s premičnimi senzorji lahko opazujemo tudi območja, ki niso v podnožišču (iz sosednjih tirnic). Na ta način dosežemo čas ponovnega snemanja, ki je krajši od časa ponovnega



Slika 6.6: Območje, ki ga satelit posname na zemeljski površini, se imenuje pas (a). Z več sosednjimi pasovi satelit posname večjo površino (b).

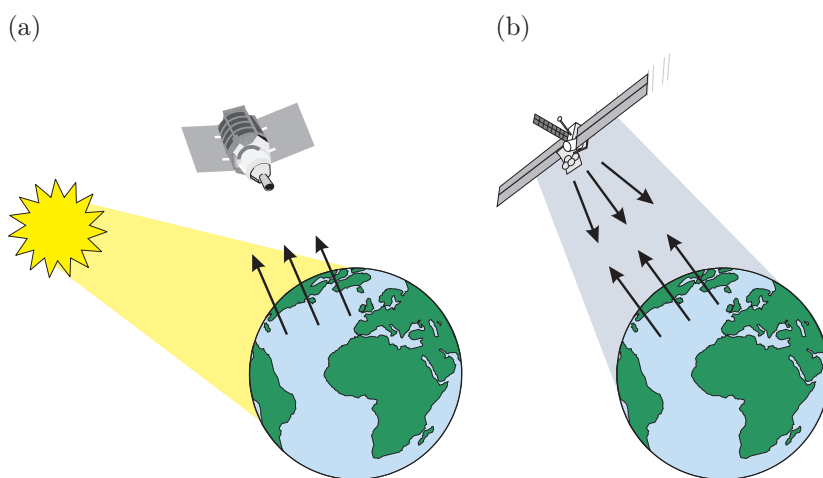


Slika 6.7: Pokritost površja z eno tirnico (a) in dnevna pot satelita (b).

obiska. Pri skoraj polarnih tirnicah so področja na višjih zemljepisnih širinah snemana pogostejše od tistih ob ekvatorju (slika 6.7). Razlog za to je prekrivanje med sosednjimi pasovi, ki je ob polih izrazitejše, saj se tam tirnice »križajo«. Ponovitveni čas snemanja je zelo pomemben pri opazovanjih, kjer je treba snemati pogostejše, na primer v primerih naravnih in drugih nesreč, kot so poplave, zemeljski plazovi, razlitja nafte ...

6.3 Pasivni in aktivni senzorji

Do sedaj smo kot vir elektromagnetnega valovanja oziroma energije za daljinsko zaznavanje že večkrat omenili Sonce. Energija, ki iz Sonca pride na Zemljo, se bodisi odbije v vidnem in bližnjem infrardečem delu spektra bodisi absorbira in nato znova izseva v obliki termičnih infrardečih valov. Senzorji daljinskega zaznavanja, ki »merijo« tako, v naravi obstoječo energijo, se imenujejo *pasivni senzorji* (slika 6.8 a). Z njimi lahko zaznavamo samo takrat, ko je vir energije prisoten. Za odbito Sončevo svetlobo to pomeni, da lahko snemamo samo, kadar Sonce osvetljuje Zemljo – torej podnevi, saj ponoči vira energije ni. Lastno termično infrardeče sevanje zemeljske površine pa lahko opazujemo tako podnevi kot ponoči. Edini pogoj je, da je sevanja dovolj za zaznavo z merilnimi instrumenti. Pasivne optične senzorje opisuje poglavje 8.



Slika 6.8: Aktivni (a) in pasivni (b) način opazovanja zemeljskega površja.

Aktivni senzorji za snemanje uporabljajo lastni vir elektromagnetnega valovanja oziroma energije (slika 6.8 b). Tovrstni senzorji oddajajo valovanje v smeri proti opazovanemu predmetu, nato pa merijo intenziteto odbitega valovanja. Prednost aktivnih senzorjev je zmožnost snemanja kadar koli, ne glede na dnevni ali letni čas. Poleg tega lahko z aktivnimi senzorji opazujemo površje v spektralnih pasovih, pri katerih je Sončeve energije premalo, na primer v področju mikrovalov. Ne nazadnje lahko z aktivnimi instrumenti bolje vplivamo na način osvetlitve površja. Aktivni senzorji za svoje delovanje potrebujejo razmeroma velik vir energije, saj morajo ustvariti dovolj močan signal. Primera aktivnih senzorjev sta radar in laser, ki ju opisujemo v poglavjih 9 in 10.

Vprašanja

1. Kakšne platforme uporabljamo pri daljinskem zaznavanju? Katere so njihove prednosti in slabosti?
2. Kakšne tirnice imajo sateliti za opazovanje Zemlje? Katere so njihove najpomembnejše lastnosti?
3. Opiši geostacionarno tirnico.
4. Opiši skoraj polarno tirnico.
5. Kakšna je razlika med dvigajočo in spuščajočo tirnico?
6. Kaj je čas ponovnega obiska in kaj čas ponovnega snemanja?
7. Kakšni so aktivni in pasivni senzorji? Kakšna je razlika med njimi?

7 Ločljivost snemalnih sistemov

Senzorji daljinskega zaznavanja so namenjeni opazovanju različnih predmetov in pojavov. Z nekaterimi spremljamo hitre spremembe, praviloma na velikih območjih, z drugimi želimo zaznati kar se da majhne podrobnosti, s tretjimi skušamo ločevati podobne predmete. V nadaljevanju poglavja bomo obravnavali pojem *ločljivosti*, ki opredeljuje zmogljivost sistema. Ločimo več vrst ločljivosti, in sicer:

- *prostorsko*, ki določa velikost najmanjših opazovanih predmetov,
- *spektralno*, ki pove, kako dobro ločimo različne valovne dolžine,
- *radiometrično*, ki podaja razpon in število opazovanih vrednosti, ter
- *časovno*, ki določa pogostost snemanja.

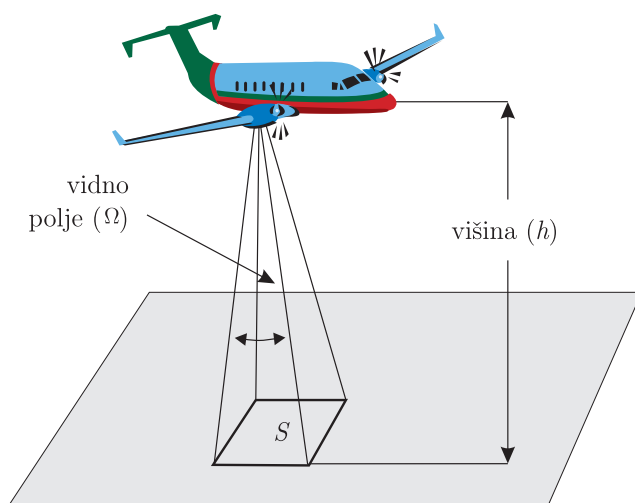
7.1 Prostorska ločljivost

Razdalja med opazovanimi predmeti in snemalnimi napravami določa natančnost (podrobnost) opazovanj in površino, ki jo »naenkrat« zajamemo. Senzorji na platformah, ki so bolj oddaljene od opazovanih predmetov, praviloma »vidijo« večje območje, vendar ne morejo razločiti majhnih podrobnosti. Podobno, na primer, astronavt na vesoljskem plovilu naenkrat vidi mnogo večjo površino kot potnik na letalu. Prvi lahko opazuje celotno državo ali celo kontinent, pri čemer pa ne more zaznati posameznih hiš. Ob potovanju z letalom pa lahko opazujemo ne le hiše, ampak celo posamezne manjše predmete, kot so, denimo, avtomobili in ljudje. Seveda pa iz letala vidimo mnogo manjše območje, ponavadi le del mesta ali pokrajine. Podobna je razlika med snemanjem iz letala in satelita.

Podrobnosti, ki jih na podobah opazimo, so odvisne od *prostorske ločljivosti* senzorja. Povezane so z velikostjo najmanjših predmetov, ki jih na posnetkih še prepoznamo. Prostorska ločljivost (spatial resolution) pasivnih senzorjev¹ je odvisna od *trenutnega vidnega polja* (instantaneous field of view, IFOV), ki je prikazano na sliki 7.1. V idealiziranem smislu gre za zelo »raztegnjeno« piramido (Ω , oglat »stožec«), ki določa površino na Zemlji (S), »vidno« z določene višine v določenem trenutku. Velikost območja, ki ga lahko opazujemo, je določena z množenjem vidnega polja (kota) z razdaljo med senzorjem in površjem (h).

$$S = h \Omega. \quad (7.1)$$

¹Z ločljivostjo aktivnih senzorjev se bomo ukvarjali v poglavju 9 (radar) in 10 (lidar).



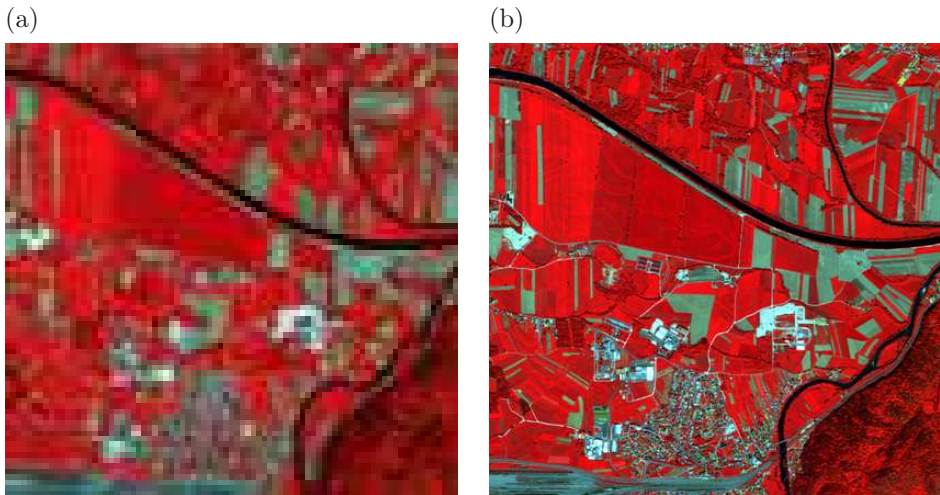
Slika 7.1: Vidno polje določa prostorsko ločljivost.

Opazovano območje na površju imenujemo tudi resolucijska ali *ločljivostna celica*, njegova velikost pa opredeljuje *prostorsko ločljivost* senzorja. Če želimo zaznati neko homogeno telo, mora biti njegova velikost v splošnem enaka ali večja od ločljivostne celice. Če je predmet manjši od nje, ga verjetno ne bomo zaznali, saj senzor zapiše samo povprečno svetlost vseh predmetov znotraj celice. V posebnih primerih take predmete kljub temu zaznamo, predvsem takrat, ko je njihova odbojnost zelo značilna (ponavadi velika). V tem primeru govorimo o podpikselskem prepoznavanju (subpixel detection).

Podobe, ki jih uporabljamo pri daljinskem zaznavanju, so praviloma predstavljene v obliki matrik pikslov. Piksli ali slikovni elementi predstavljajo najmanjše dele podobe. Vendar pikslov ne smemo mešati s prostorsko ločljivostjo. Če ima neki senzor ločljivost 20 m in je njegova podoba prikazana s polno ločljivostjo, vsak piksel predstavlja površino 20 krat 20 m. V tem primeru sta velikost piksla in ločljivost res enaki. Podobe pa lahko prikazujemo tudi s piksli, ki so različni od ločljivosti. Veliko satelitskih kart in drugih slik ima piksele, ki so povprečeni in predstavljajo večja območja, pri čemer velikost piksla ni enaka ločljivosti senzorja. Slednje je še posebej očitno pri radarskih senzorjih, pri katerih s povprečenjem več pikslov surove podobe dobimo posnetek z manjšim šumom, ki pa ima slabšo prostorsko ločljivost.

Podobe, na katerih lahko vidimo in prepoznamo samo velike predmete, imajo grobo ali *nizko ločljivost* (slika 7.2 a). Pri drobno- ali *visokoločljivih* podobah pa lahko prepoznamo veliko podrobnosti in s tem tudi manjše predmete (slika 7.2 b). Vojaški vohunski senzorji so, na primer, načrtovani tako, da vidijo kar se da majhne predmete in imajo torej zelo visoko ločljivost. Komerčni satelitski sistemi ponujajo podobe z ločljivostjo od nekaj metrov do več kilometrov. Visokoločljiva satelita QuickBird in IKONOS, na primer, imata pankromatsko ločljivost (črno-belo oziroma enobarvno) 0,61 m oziroma 1 m in večspektralno (večbarvno oziroma večkanalno) 2,44 m oziroma 4 m.² Srednje-ločljiva SPOT in Landsat imata ločljivost 10 m oziroma 15 m pankromatsko ter 20 m

²Prostorska ločljivost senzorja satelita IKONOS v nadirju je dejansko 0,82 m pankromatsko in 3,20 m večspektralno, vendar so vse podobe prevzročene na 1 m in 4 m.



Slika 7.2: Podoba nizke (a) in visoke (b) ločljivosti.

oziroma 30 m večspektralno. Nizkoločljivi sateliti snemajo mnogo večje površine in imajo zato slabšo prostorsko ločljivost, kot je, na primer, 1,1 km za AVHRR.

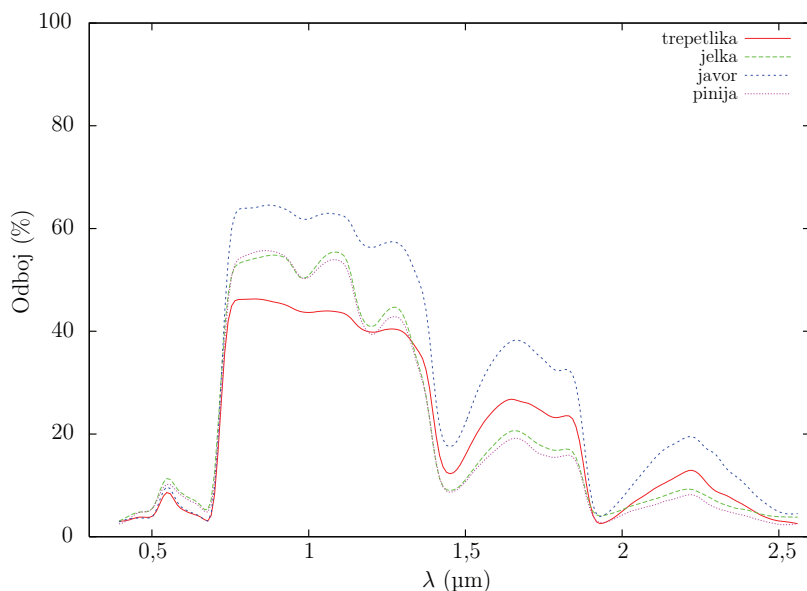
Zaključimo lahko, da s podobami večje ločljivosti opazujemo manjše dele površja z boljšo natančnostjo, s podobami nizke ločljivosti pa večje dele z manjšo natančnostjo.

7.2 Spektralna ločljivost

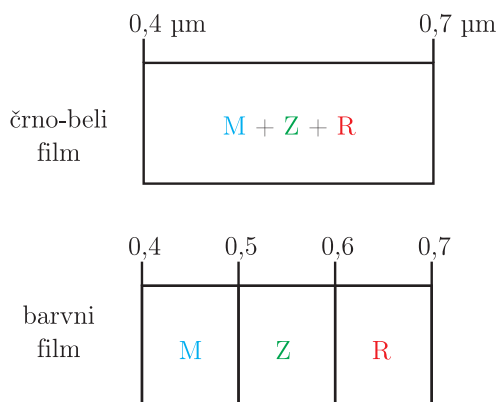
V poglavju 5 smo spoznali spektralni odziv (odboj) predmetov in lastnosti lastnega termičnega sevanja. Ogledali smo si lastnosti predmetov na površju Zemlje v odvisnosti od valovne dolžine. Različne predmete ali njihove skupine lahko na podobah pogosto razlikujemo s primerjavo njihovega spektralnega odziva pri različnih valovnih dolžinah. Široke razrede, kot sta na primer voda in rastlinje, ločimo z uporabo širokega področja valovnih dolžin – na primer vidne in infrardeče svetlobe. Bolj specifičnih razredov, na primer različnih vrst rastlin (slika 7.3; trepetlika, jelka, javor, pinija), pa s širokim pasom valovnih dolžin ponavadi ne ločimo. Ločevanje slednjih je mogoče šele z zelo ozkimi območji valovnih dolžin. Z drugimi besedami, potrebujemo sisteme z veliko *spektralno ločljivostjo*. Spektralna ločljivost pove, kako dobro senzor določa različne valovne dolžine. Boljša ko je, ožji so spektralni pasovi oziroma kanali in večje je njihovo število.

S črno-belim filmom zaznavamo svetlobo večjega ali celotnega vidnega elektromagnetnega spektra (slika 7.4 a). Spektralna ločljivost tovrstnega filma je precej slaba, saj posameznih valovnih dolžin vidne svetlobe med seboj ne moremo ločiti in zapisujemo samo njihovo povprečje. Običajni barvni film je prav tako občutljiv na vse valovne dolžine vidnega dela spektra (slika 7.4 b). Vendar je njegova spektralna ločljivost večja, ker so posamezni sloji filma občutljivi na modro, zeleno in rdečo svetlobo. Zato lahko lastnosti predmetov prikaže v različnih barvah, odvisno od intenzitete odboja pri posameznih valovnih dolžinah.

Sodobni sistemi za daljinsko zaznavanje merijo odbojnost, lastno sevanje ali odbito umetno valovanje pri več različnih območjih valovnih dolžin. Tem senzorjem pravimo



Slika 7.3: Spektralni podpis podobnih predmetov.

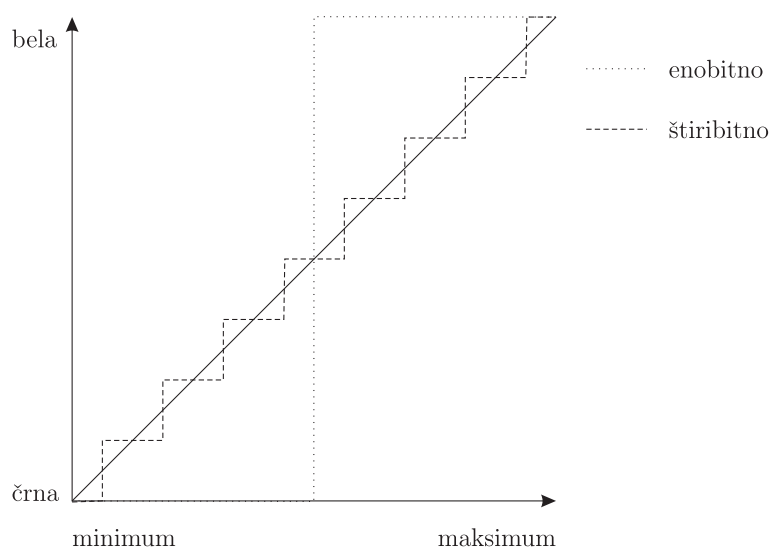


Slika 7.4: Spektralna ločljivost fotografij.

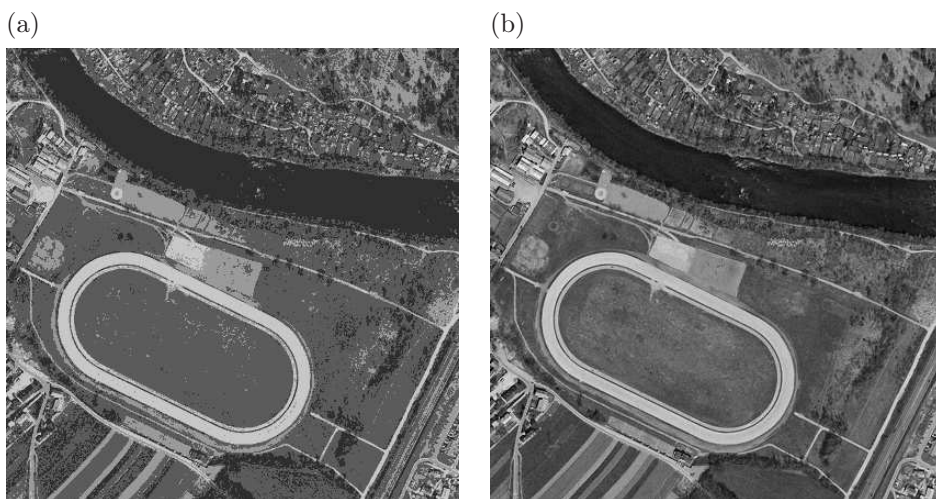
več- ali *multispektralni*, z njimi pa se bomo podrobneje ukvarjali v razdelku 8.2. Naprednejši večspektralni senzorji, ki so zmožni zaznati več sto zelo ozkih pasov valovnih dolžin vidne, bližnje in srednje infrardeče svetlobe, se imenujejo *hiperspektralni*. Zaradi zelo visoke spektralne ločljivosti omogočajo hiperspektralni senzorji ločevanje zelo podobnih predmetov, saj lahko z njimi spektralni podpis opišemo praktično zvezno.

7.3 Radiometrična ločljivost

Razporeditev pikslov določa prostorsko ločljivost podobe, *radiometrična ločljivost* pa opiše njeno informacijsko vrednost (to je količino informacij, ki jo lahko poda). Ko



Slika 7.5: Zapis linearne krivulje z enobitno in štiribitno radiometrično ločljivostjo.



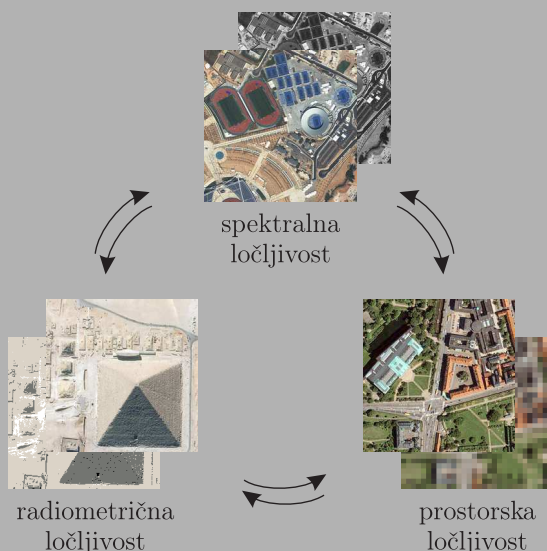
Slika 7.6: Primerjava dvo- (a) in osembitne (b) radiometrične ločljivosti.

ustvarimo podobo s filmom ali elektronskim senzorjem, je njena radiometrična ločljivost določena z občutljivostjo glede na intenziteto elektromagnetnega valovanja. Tovrstna ločljivost snemalnega sistema pove, kako dobro sistem ločuje majhne razlike v energiji valovanja. Boljša ko je ločljivost senzorja, manjše razlike intenzitete odbite ali seane energije lahko ta loči.

Signal, ki ga senzor zajame, zapišemo v obliki matrike pikslov oziroma podobe. Pri tem analogne vrednosti pretvorimo v digitalne oziroma jih predstavimo s pozitivnimi celimi števili. Zaradi načina delovanja računalnikov so te med vrednostma 0 in ena manj kot izbrana potenca števila 2 (0 do $2^n - 1$). Tak razpon ustreza številu uporabljenih bitov pri dvojiškem zapisu – vsak bit namreč v končno število prinese faktor 2 ($1 \text{ bit} = 2^1 = 2$).

Iskanje najboljše ločljivosti

Pri načrtovanju senzorja moramo poiskati najboljše razmerje med prostorsko, spektralno in radiometrično ločljivostjo. Če želimo imeti veliko prostorsko ločljivost (majhne piksele), mora imeti senzor ozko trenutno vidno polje. To pa zmanjša količino zaznane energije, saj opazujemo majhen del površja, ki odbija ali seva malo valovanja. Posledica je slaba radiometrična ločljivost oziroma omejena zmožnost zaznavanja razlik v energiji. Količino zaznane energije (in s tem radiometrično ločljivost) lahko povečamo tako, da opazujemo širši pas valovnih dolžin v posameznem kanalu. S tem pa zmanjšamo spektralno ločljivost (zmožnost ločevanja valovanja več valovnih dolžin) senzorja. Po drugi strani slabša prostorska ločljivost poveča količino energije, ki pade na detektor, in s tem poveča tako spektralno kot radiometrično ločljivost.



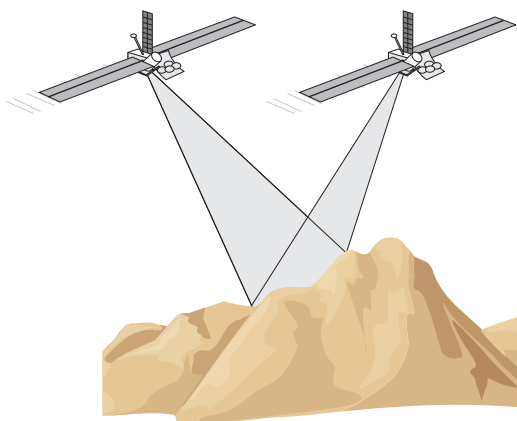
Pri iskanju najboljše ločljivosti se moramo torej odločiti za ravnovesje med želenimi prostorskimi, spektralnimi in radiometričnimi lastnostmi senzorja.

Celoten razpon vrednosti na podobi ustreza dinamičnemu razponu senzorja – najmanjša vrednost ustreza najmanjšemu zaznanemu odboju, največja pa največjemu (kalibracijo senzorjev obravnava razdelek 15.5).

Največje število svetlostnih stopenj, ki jih podoba lahko zabeleži, je odvisno od števila bitov, uporabljenih za zapisovanje. Če senzor, na primer, zaznava energijo z razponom 8 bitov, lahko prikaže $2^8 = 256$ različnih vrednosti med 0 in 255. Senzor, ki ima samo 4 bite, pa lahko zazna le $2^4 = 16$ vrednosti med 0 in 15. To pomeni, da ima tak senzor precej manjšo radiometrično ločljivost, saj namesto 256 loči le 16 vrednosti energije, kar je manj kot desetina. Podatke, ki jih vsebujejo podobe, ponavadi prikažemo z razponom sivih vrednosti, pri čemer črni ustreza vrednost 0, beli pa največja mogoča vrednost (na primer 255 pri 8-bitnih podatkih). Slika 7.6 primerja podobo z dvo- (a) in osembitno (b) radiometrično ločljivostjo. Na osembitni podobi zaradi večjega števila sivin opazimo veliko več podrobnosti.

7.4 Časovna ločljivost

Poleg prostorske, spektralne in radiometrične, moramo pri daljinskem zaznavanju upoštevati tudi *časovno ločljivost*. Časovna ločljivost pove, kako pogosto lahko snemamo iste dele Zemlje oziroma koliko časa preteče med dvema zaporednima snemanjema. Časovne ločljivosti smo se dotaknili že v poglavju 6.2, ko smo se ukvarjali s časom ponovnega obiska, to je časom, v katerem satelit opravi celoten ciklus tirnic, in časom ponovnega snemanja, to je časom, ki mine med dvema zajetjema istega območja. Čas ponovnega obiska satelitskih sistemov je ponavadi dolg več dni ali celo tednov, odvisno od načina snemanja.



Slika 7.7: Časovno ločljivost lahko povečamo s sistemi, ki lahko senzorje zasukajo.

Časovna ločljivost je odvisna od veliko dejavnikov, od katerih so najpomembnejše lastnosti snemalnega sistema, predvsem možnosti zasuka, ter stopnja prekrivanja tirnic, ki je odvisna od geografske širine. Absolutna časovna ločljivost sistema, pri kateri sistem isto območje opazuje pod enakimi pogoji (kot gledanja), je enaka času ponovnega obiska. Pasovi snemanja, ki jih satelit posname iz sosednjih tirnic, pa se delno prekrivajo, še posebej v višjih geografskih širinah. Zaradi prekrivanja lahko določene dele zemeljskega površja opazujemo pogosteje.

Nekateri satelitski sistemi, na primer QuickBird, IKONOS ali SPOT, lahko senzorje zasukajo za kot, ki meri od nekaj stopinj do nekaj deset stopinj (slika 7.7). Tako lahko opazujejo isti del površja iz različnih tirnic, ki so tipično med seboj oddaljene od enega do pet dni. Pri takšnih satelitih je časovna ločljivost, to je čas ponovnega snemanja, precej krajša od časa ponovnega obiska.

Možnost pridobivanja podob istega dela zemeljskega površja ob različnih časih je eden najpomembnejših elementov pri uporabi podatkov daljinskega zaznavanja. Spektralne lastnosti predmetov se namreč spreminjajo in z uporabo *veččasovnih* ali *multi-temporalnih* podob lahko te spremembe zaznamo. Lastnosti rastlin, na primer, se v času rastne dobe spreminjajo zvezno. Ali bomo določen pojav lahko spremljali z daljinskim zaznavanjem, je odvisno predvsem od narave pojava ter časa in pogostosti zajema podob. S stalnim snemanjem ob različnih časih lahko opazujemo spremembe, ki se dogajajo na zemeljskem površju. Te so lahko naravne, na primer spreminjanje stanja rastlinja ali poplave, oziroma umetne, ki jih s svojim delovanjem povzroči človek, na primer širjenje urbanih površin ali krčenje gozdov.

Pogostost snemanja je še posebej pomembna,

- kadar stalna oblačnost omejuje število jasnih podob (zlasti v tropskih krajih),
- ko opazujemo kratkotrajne pojave (poplave, razlitje nafte ...),
- če želimo opazovati ob več časovnih trenutkih (multitemporalno; primerjava razširjenosti bolezni gozdov v več letih) in
- kadar lahko z opazovanjem sprememb določen predmet ločimo od drugih podobnih (razlikovanje pšenice in koruze).

Vprašanja

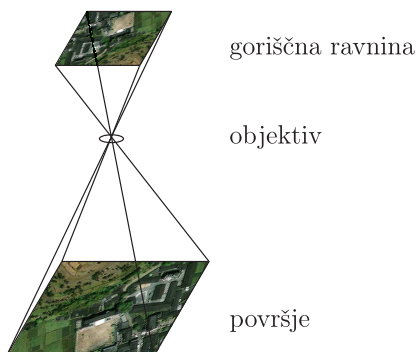
1. Kaj je prostorska ločljivost? Kaj jo določa?
2. Kaj je spektralna ločljivost?
3. Kaj je radiometrična ločljivost?
4. Kaj je časovna ločljivost?

8 Optični senzorji

Optični snemalni sistemi predstavljajo najbolj razširjen in najstarejši sistem daljinskega zaznavanja površine Zemlje. Fotografske kamere so preprost optično mehanski oziroma v zadnjem času praviloma optično elektronski instrument, ki v trenutku ustvari sliko površja. Naprednejše opazovanje z boljšo – predvsem spektralno – ločljivostjo omogočajo skenerji, ki z majhnim vidnim poljem iz zaporedja opazovanj ustvarijo podobo večjega območja.

8.1 Fotografske kamere

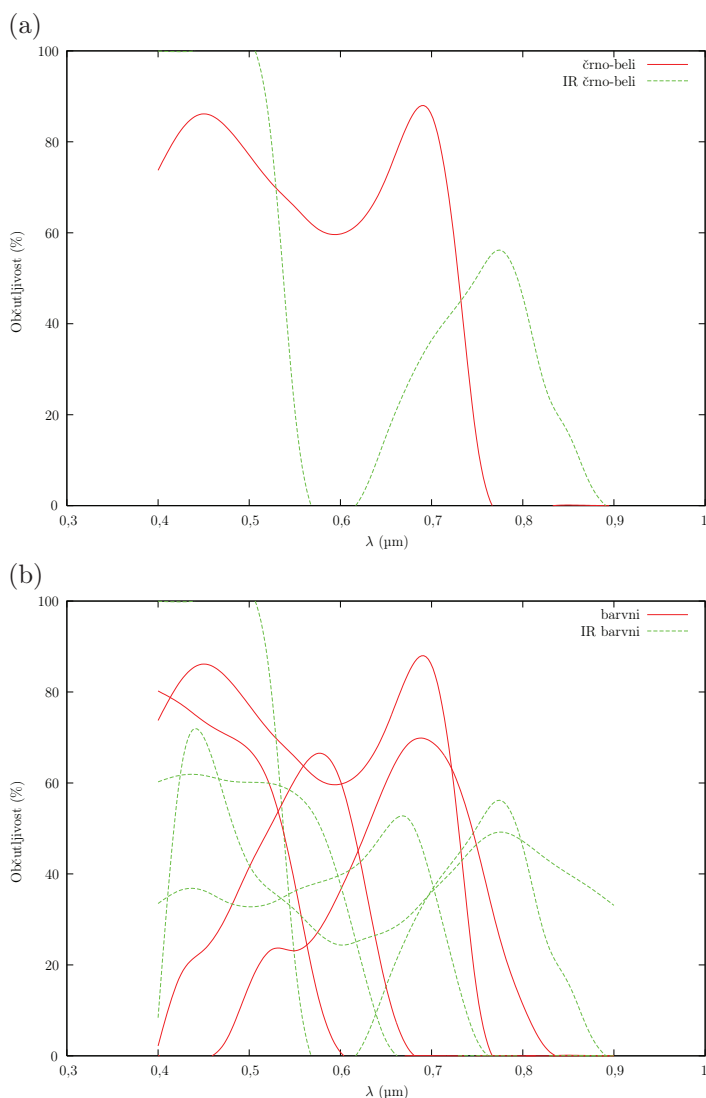
Fotografske kamere so pasivni optični snemalni sistemi, ki z uporabo leč (ali sistema leč) tvorijo podobo v goriščni ravnini, to je ravnini, na kateri je slika ostra (slika 8.1).



Slika 8.1: Snemalni sistem pri fotografranju.

Fotografski filmi so, kot smo že omenili, občutljivi na svetlobo valovnih dolžin med 300 in 900 nm. Temu ustrezajo ultravijolična, vidna in bližnja infrardeča svetloba. Črno-beli ali pankromatski¹ film je običajno občutljiv v območju med 360 in 720 nm, je pa razmeroma slabo občutljiv na zeleno svetlobo (glej sliko 8.2 a), kar predstavlja težave pri fotointerpretaciji vegetacije. Prostorska in radiometrična ločljivost je pri tovrstnih filmih zelo velika. Pankromatski filmi so občutljivi tudi na del ultravijoličnega spektra, zato jih lahko uporabljamo tudi pri ultravijolični svetlobi, če pred kamero damo filter, ki

¹Pankromatski pomeni občutljiv za vse barve.

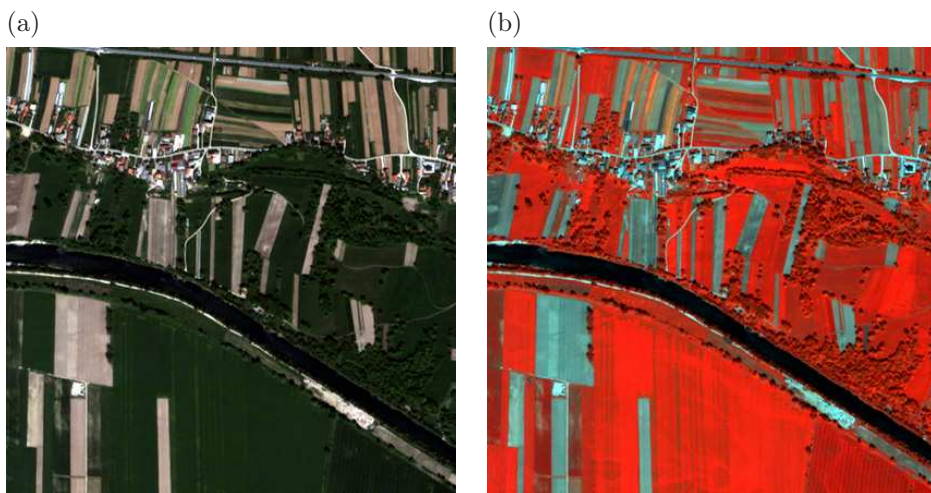


Slika 8.2: Spektralna občutljivost različnih filmskih emulzij pri črno-belem (a) in barvnem filmu (b).

ne prepušča vidne svetlobe. Vendar zaradi močnega atmosferskega sipanja in absorpcije ultravijolične fotografije ne uporabljamo prav pogosto.

Infrardeči črno-beli film je občutljiv na vidni in bližnji infrardeči del elektromagnetnega valovanja (slika 8.2 b). Ta film je slabše ločljivosti kot navadni črno-beli film, poleg tega pa je slabo občutljiv na zeleno svetlobo. Infrardeče filme pogosto uporabljamo pri snemanju z velikih višin, ker so občutljivi na svetlobo, ki lahko prodre skozi meglice.

Barvna in lažno barvna (tudi infrardeča barvna) fotografija uporabljata filme s tremi plastmi, od katerih je vsaka občutljiva za drugo območje valovnih dolžin. Pri običajni barvni fotografiji so plasti občutljive na modro, zeleno in rdečo svetlobo – to je enako



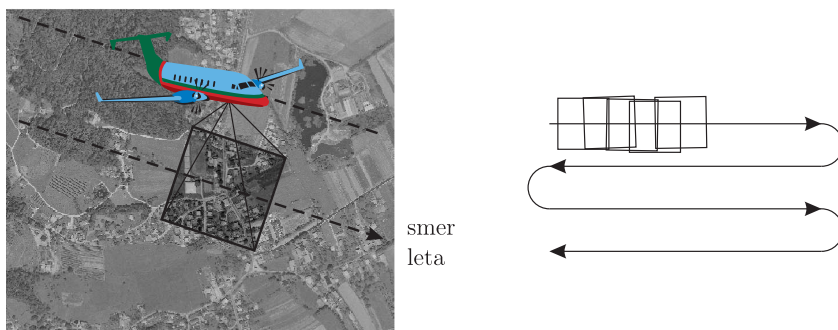
Slika 8.3: Primerjava naravne (a) in lažno barvne (b) podobe.

kakor človeške oči (sliki 8.2 b in 8.3 a). Na takšnih fotografijah je okolica lahko prepoznavna, saj barve ustrezajo »naravnim« – drevesa so zelena, vode modre, ceste sive ...

Pri barvni infrardeči fotografiji pa so emulzije občutljive za modrozeleno, rdečo in fotografski del infrardeče svetlobe (sliki 8.2 b in 8.3 b). Omenjene barve so predstavljene z modrimi, zelenimi in rdečimi toni. Na infrardečih barvnih fotografijah so predmeti, ki imajo visoko odbojnost v infrardečem delu spektra (na primer zdrava vegetacija), videti rdeči, tisti, ki močno odbijajo rdečo svetlobo, so videti zeleni, in tisti, ki odbijajo modrozeleno svetlobo, so videti modri. Na ta način dobimo lažno predstavo o barvah predmetov v naravi.

Digitalne kamere, ki energijo elektromagnetnega valovanja zapisujejo elektronsko, se nekoliko razlikujejo od svojih »klasičnih« sorodnikov. Namesto filma tovrstni sistemi uporabljajo mrežo senzorjev CCD (charge-coupled devices), ki zaznavajo elektromagnetno valovanje. Energija, ki dospe na površino CCD, ustvari električni naboj, sorazmerno »svetlosti« opazovanega površja. Na osnovi naboja pikslov v vsakem spektralnem kanalu priredimo številsko vrednost. Digitalna oblika nastale podobe je primerna za analizo in arhiviranje z računalniki, poleg tega pa lahko iz nje ustvarimo tiskano kopijo, ki je podobna običajni fotografiji. Digitalne kamere omogočajo večjo spektralno ločljivost, poleg tega pa podatke zajemajo ceneje in hitreje od klasičnih kamer. Lastnosti takih sistemov razlikujejo, v splošnem lahko z njimi zbiramo podatke s prostorsko ločljivostjo nekaj decimetrov in spektralno od $0,012\ \mu\text{m}$ do $0,3\ \mu\text{m}$. Pri tipičnih kamerah uporabljamo detektorje z nekaj milijoni pikslov.

Kljub temu, da fotografske kamere lahko uporabljamo na tleh in na vesoljskih plovilih, so najpogostejše nameščene na helikopterje in letala. Zelo natančne letalske fotografije uporabljamo v najrazličnejših aplikacijah, kjer je treba prepoznavati majhne predmete in veliko podrobnosti. Pokritost površja z letalskimi fotografijami je odvisna od več dejavnikov, predvsem od goriščne razdalje objektiva, višine leta platforme in formata oziroma velikosti filma. Goriščna razdalja namreč določa vidno polje sistema leč (poglavje 7.1) in tako določa območje, ki ga kamera »vidi«. Goriščne razdalje kamer, ki se najpogostejše uporabljajo pri letalski fotografiji, so med 90 in 210 mm. Z daljšo



Slika 8.4: Letalo z več preleti posname večje površje.

goriščno razdaljo vidimo manjšo površino na tleh z večjo natančnostjo, to je z večjim merilom.

Velikost opazovanega območja je, kot rečeno, odvisna tudi od višine platforme nad Zemljo. Pri večjih višinah kamera »opazuje« večje dele površja, vendar z manjšo natančnostjo kot pri nižjih. Letalska fotografija omogoča visoko ločljivost, ki je pogosto velikostnega reda nekaaj deset decimetrov, je pa odvisna od geometrije gledanja (predvsem višine leta) in številnih drugih parametrov.

Pri zajemanju navpičnih fotografij letalo ponavadi leti v zaporedju linij, ki se imenujejo *poti leta* (slika 8.4). Fotografije zajema z veliko hitrostjo, pri čemer ves čas snema področje neposredno pod letalom. Med zaporednimi fotografijami je ponavadi 50- do 60-odstotno prekrivanje, s čimer je dosežena popolna pokritost poti leta in hkrati omogočeno stereoskopsko gledanje. Zaporedne fotografije namreč na iste dele površja gledajo pod različnimi koti. Z uporabo posebne naprave, ki se imenuje stereoskop, lahko opazujemo trirazsežne poglede površja oziroma tako imenovani stereo model. Stereoskopija je eden najpogostejših načinov uporabe letalskih fotografij.

Fotografije so najbolj uporabne, kadar želimo visoko prostorsko natančnost in ne potrebujemo velike spektralne ločljivosti. Ta je namreč pri fotografijah, tako barvnih kot črno-belih, praviloma precej slabša kot pri elektronskih skenerjih. Interpretacijo fotografij ponavadi izvajajo izurjeni interpretatorji. Poleg tega jih lahko skeniramo, to je pretvorimo v digitalno obliko, in obdelujemo z računalniki (poglavja 13 do 18).

Geometrijo navpičnih snemanj zelo dobro poznamo, zato je mogoče na fotografijah izvajati natančne meritve. Znanost, ki proučuje in obdeluje metode merjenj dimenzij predmetov na perspektivnih fotografskih in digitalnih posnetkih, se imenuje *fotogrametrija*. Z njo z opazovanjem dveh ali več posnetkov, narejenih iz različnih točk, pridobimo trirazsežne koordinate predmeta. Fotogrametrijo uspešno in v veliki meri uporabljamo že od prvih letalskih fotografij pri topografskem kartiranju, v arhitekturi, gradbeništvu, geologiji, arheologiji ...

Pri *večslikovni* ali *večspektralni fotografiji* uporabljamo sistem z več lečami in različnimi kombinacijami filmov. Tako lahko zajemamo fotografije istočasno v različnih spektralnih območjih. Prednost večslikovnih kamer je njihova zmožnost zaznavanja in zapisovanja odbitega valovanja v različnih pasovih valovnih dolžin. Tako lahko bolje ločimo in prepoznavamo predmete na površju. Seveda pa je hkratna analiza več letalskih fotografij lahko precej zapletena.

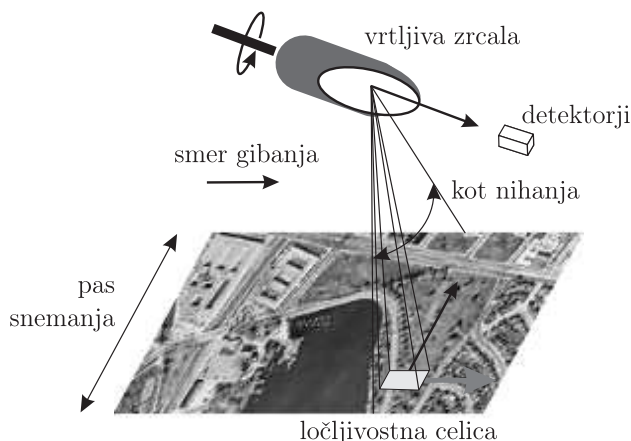
8.2 Večspektralno skeniranje

Večina elektronskih senzorjev daljinskega zaznavanja uporablja snemalne sisteme, ki imajo detektorje svetlobe z ozkim vidnim poljem (instantaneous field of view, IFOV). Senzor s slednjim »pometa« po površini Zemlje in tako ustvarja dvorazsežne podobe. *Skenerji* (scanner), kot imenujemo tovrstne senzorje, so lahko nameščeni tako na letalih kot satelitih, pri čemer imajo skoraj enake lastnosti. Sistem, ki je namenjen zbiranju podatkov v širokem območju različnih pasov valovnih dolžin, se imenuje mutispektralni ali *večspektralni skener* (multispectral scanner, MSS). Danes so to najbolj razširjeni snemalni sistemi. Pri daljinskem zaznavanju poznamo dva glavna načina skeniranja:

- prečno skeniranje (across-track scanning) in
- vzdolžno skeniranje (along-track scanning).

8.2.1 Prečni skenerji

Prečni skenerji (slika 8.5) Zemljo snemajo z zaporedji vrstic, ki so pravokotne na smer gibanja platforme (so torej prečno). Vsako vrstico zabeležijo s premikanjem senzorja z ene strani na drugo, pri čemer uporabljajo nihajoče ali vrteče se zrcalo. Ker se nosilna platforma premika naprej, lahko z zaporednimi vrstami sestavimo dvorazsežno podobo površine Zemlje. Elektromagnetno valovanje, ki vpada na senzor, se razdeli na posamezne dele, ki so zaznani vsak posebej. Senzor ultravijolično, vidno, infrardeče in termično sevanje – podobno kot prizma – razdeli na sestavne dele in jih pošlje zbirki notranjih detektorjev, ki so vsak občutljivi na valovanje določene valovne dolžine. Detektorji zaznajo in izmerijo energijo za pas valovnih dolžin (kanal), jo najprej pretvorijo v električni signal in nato v digitalni zapis. Tega nato dodatno obdelajo in zapišejo v obliki rastrske mreže pikslov (podobe).

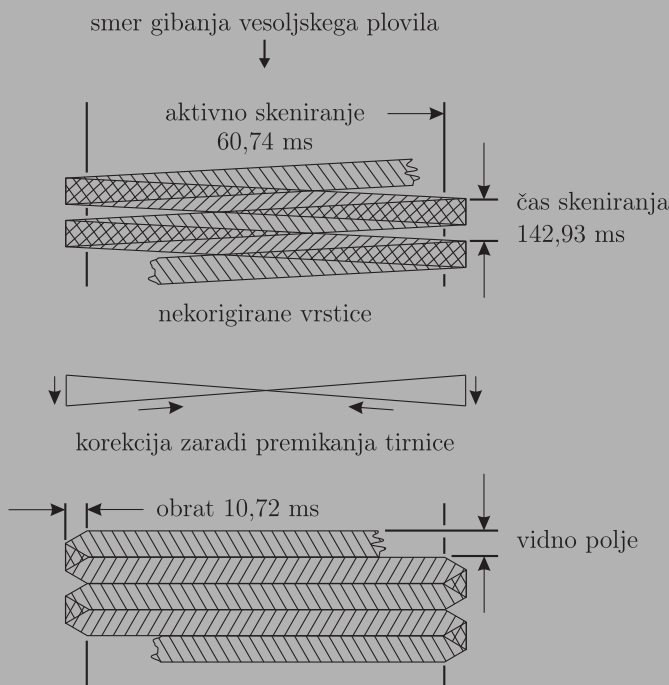


Slika 8.5: Prečni skener.

Prostorsko ločljivost prečnega senzorja, kot smo že omenili, določata vidno polje in višina platforme, ki skupaj določata resolucijsko (ločljivostno) celico. Kot, za katerega se lahko zasuka zrcalo, določa pas snemanja oziroma dolžino ene vrstice. Letalski senzorji snemajo praviloma z velikimi zasuki senzorja – med 90° in 120° – medtem ko je pri satelitih zaradi večje višine leta potreben manjši zasuk – 10° do 20° .

Korekcija snemalnih vrstic

Nihanje snemalnega zrcala skupaj z gibanjem platforme bi ustvarilo vrstice, ki niso poravnane druga glede na drugo. Zato v sistemih, ki uporabljajo tovrstni način skeniranja, uporabljamo tako imenovan korektor snemalnih vrstic (scan line corrector, SLC). Pri satelitu Landsat in senzorju ETM+ gre za optično elektronski mehanizem, sestavljen iz dveh vzporednih zrcal. Zrcali se gibljeta pravokotno na os snemalnega zrcala, sinhrono z njegovim gibanjem in tako kompenzirata premikanje vidnega polja na površju. Namesto snemanja v obliki cikcakaste črte na ta način dobimo vzporedne vrstice.



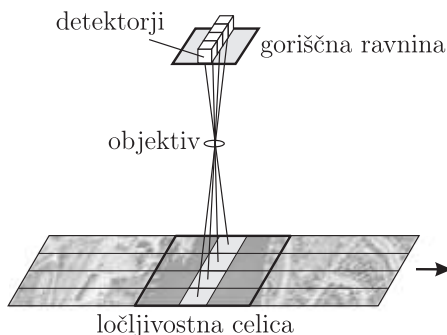
Zaradi povečevanja razdalje med senzorjem in površjem pri naraščajočem kotu gledanja se povečuje tudi velikost ločljivostne celice. S tem postane ločljivost odvisna od položaja znotraj podobe in pride do neželenega geometrijskega popačenja. Velikost območja, ki ga senzor opazuje, je na robovih podobe večja kot v njeni sredini. Pojav je še zaradi nizkega leta še posebej izrazit pri letalskih sistemih. Poleg tega je pri prečnih skenerjih razmeroma kratek tudi čas »opazovanja« ločljivostne celice ali *čakalni čas* (dwell time). To vpliva tako na zgradbo senzorja, kot tudi na njegovo prostorsko, spektralno in radimetrično ločljivost.

Prečne skenerje uporablja veliko sistemov za opazovanje Zemlje, na primer Landsat, IKONOS, QuickBird ...

8.2.2 Vzdolžni skenerji

Vzdolžni skenerji (slika 8.6) naenkrat zajamejo celotno vrstico na Zemlji in z izkoriščanjem gibanja snemalnega sistema ustvarijo podobo v smeri gibanja ali vzdolžno.

Tovrstni senzorji nimajo vrtečega zrcala, ampak vrsto detektorjev, ki se nahajajo v goriščni razdalji sistema leč. Ker njihovo delovanje spominja na pometanje z metlo, vzdolžne skenerje včasih imenujemo tudi pometajoči (pushbroom). Vsak posamezni senzor zaznava energijo točno določene resolucijske celice, zato velikost detektorjev prek njihovega vidnega polja določa prostorsko ločljivost. Vzdolžni sistemi potrebujejo za vsak kanal poseben sistem detektorjev. Ti zaznavajo energijo po vrsticah, jo nato spremenijo v električne impulze in pretvorijo v digitalno obliko.



Slika 8.6: Vzdolžni skener.

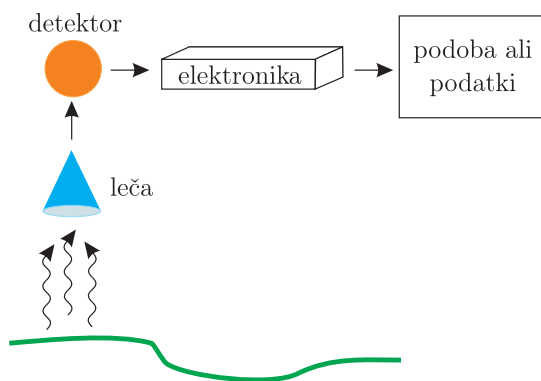
Vzdolžni skenerji z vrsticami detektorjev imajo nekaj pomembnih prednosti v primerjavi s prečnimi z vrtečimi zrcali. Množica detektorjev, v povezavi s pometanjem, omogoča vsakemu detektorju, da dlje časa opazuje površino pod seboj. Tako lahko senzor zazna več energije, kar izboljša radiometrično ločljivost. Podaljšan čakalni čas dovoljuje tudi manjše vidno polje in ožje spektralne pasove, zato lahko s takimi senzorji dosežemo boljšo prostorsko in spektralno ločljivost. Detektorji so ponavadi preproste mikroelektronske naprave, ki so majhne, lahke in zahtevajo malo energije. Poleg tega nimajo gibljivih delov, zaradi česar so prečni skenerji bolj zanesljivi, so manj občutljivi za mehanske okvare in imajo daljšo življenjsko dobo. Po drugi strani pa moramo umeriti več tisoč detektorjev, kar je vse prej kot preprosta naloga. Le z rednim umerjanjem lahko namreč dosežemo enakomerno občutljivost po celotni podobi.

Ne glede na to, kateri snemalni sistem uporabljamo, imajo skenerji precej prednosti v primerjavi s fotografskimi kamerami. Spektralno območje fotografskih sistemov je, na primer, omejeno na vidno in bližnjo infrardečo svetlobo. Večspektralne senzorje pa lahko uporabljamo tudi v področju srednje in termične infrardeče svetlobe. Poleg tega lahko z njimi dosežemo mnogo boljšo spektralno ločljivost. Večkanalni ali večspektralni fotografski sistemi vsak »barvni« pas zajamejo s svojim sistemom leč. To lahko povzroči težave pri primerjavi kanalov, tako prostorsko kot radiometrično, poleg tega pa ustvari nepravilnosti pri koregistraciji podob. Večspektralni senzorji zajemajo vse spektralne kanale hkrati skozi isti optični sistem in se omenjenim težavam v veliki meri izognejo.

Klasični fotografski sistemi beležijo zaznano energijo prek fotokemičnih reakcij, ki jih težko merimo in stabiliziramo. Večspektralni sistemi in digitalne kamere meritve opravljajo elektronsko, zato z njimi lažje določimo količino energije, hkrati pa lahko opazujejo širši spekter odbojnih vrednosti. Ne nazadnje potrebujejo fotografski sistemi stalen vir filma, ki ga je treba razviti na tleh in iz negativov ustvariti fotografije. Digitalni sistemi večspektralnih senzorjev po drugi strani omogočajo prenos podatkov v sprejemno postajo na tleh in takojšnjo obdelavo z računalniki.

8.3 Termično snemanje

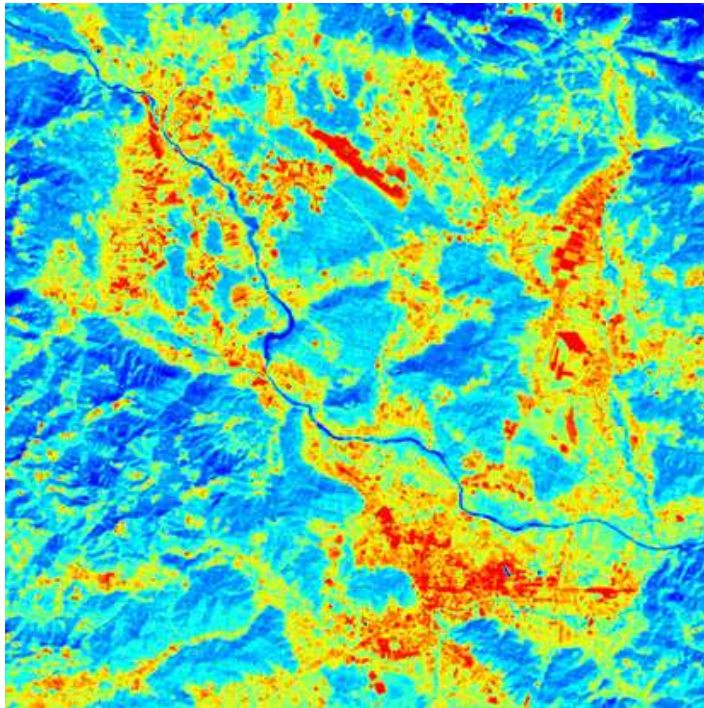
Veliko večspektralnih sistemov zaznava sevanje tako v vidnem in odbitem infrardečem kot tudi v termičnem infrardečem delu elektromagnetnega spektra. Zaznavanje sevanje energije v področju termičnega sevanja (to je od $3\ \mu\text{m}$ do $15\ \mu\text{m}$) je precej drugačno od zaznavanja odbite Sončeve svetlobe. *Termične senzorje*, ki s posebnimi fotodetektorji zaznavajo fotone prave valovne dolžine, je treba močno hladiti (skoraj do absolutne ničle), saj moramo njihovo lastno sevanje zmanjšati na najmanjšo možno vrednost (slika 8.7). Tovrstni senzorji pravzaprav merijo temperaturo površja oziroma termične lastnosti opazovanih predmetov.



Slika 8.7: Termično snemanje.

Termični senzorji praviloma delujejo v prečni smeri, kot je opisano v razdelku 8.2. Taki senzorji zaznajo sevanje valovanje primerjajo z enim ali več lastnimi viri sevanja. Zato lahko vrednosti, ki jih z njimi dobimo, primerjamo z absolutnimi temperaturami. Podatke praviloma zapisujemo v digitalni obliki, natančnost termičnih senzorjev pa lahko doseže do $0,1\ ^\circ\text{C}$. Zaradi lažje analize ponavadi prikazujemo slike relativne temperature v obliki sivih ali navidezno barvnih podob, ki jih imenujemo *termogrami* (slika 8.8). Pri tem so višje temperature podane bodisi s svetlimi toni ali toplimi barvami (rdečo), nižje temperature pa s temnimi toni ali hladnejšimi barvami (modro). V večini primerov lahko s podobami, ki prikazujejo razlike temperatur, opravimo kakovostne analize in le redko nas zanimajo absolutne temperature. Slednje lahko izračunamo iz podob, vendar pa moramo imeti podatke za njihovo kalibracijo (kot je opisano v razdelku 15.5). Z drugimi besedami – poznati moramo temperature nekaterih točk ali referenčnega vira valovanja na satelitu, s čimer določimo prenosno funkcijo senzorja.

Pri termičnem valovanju je zaradi razmeroma velike valovne dolžine učinek atmosfarskega sipanja zanemarljiv (zlasti v primerjavi z vidno svetlobo). Kljub temu pa absorpcija v plinih ozračja omejuje termično opazovanje na dve okni – od 3 do $5\ \mu\text{m}$ in od 8 do $14\ \mu\text{m}$. Ker se gostota elektromagnetnega sevanja zmanjšuje s povečevanjem valovne dolžine, imajo termični senzorji veliko vidno polje. Le tako lahko namreč poskrbijo, da senzor prejme dovolj energije za zanesljive meritve. Zaradi velikega vidnega polja je prostorska ločljivost termičnih senzorjev sorazmerno majhna v primerjavi s senzorji vidne in bližnje infrardeče svetlobe. Termograme lahko zajemamo tako podnevi kot ponoči, saj ne zaznavamo odbite Sončeve svetlobe, ampak lastno sevanje Zemlje. Termično daljinsko zaznavanje uporabljamo v najrazličnejših aplikacijah, od vojaškega



Slika 8.8: Termogram območja med Kranjem in Ljubljano, posnet s satelitom Landsat.

opazovanja, prek spremljanja naravnih nesreč (na primer gozdnih požarov) do opazovanja toplotnega onesnaženja.

Vprašanja

1. Kakšne vrste fotografskih filmov uporabljamo pri daljinskem zaznavanju?
2. Kaj je večspektralna fotografija?
3. Kaj je večspektralno skeniranje? Kakšne vrste skenerjev uporabljamo?
4. Opiši prečni skener.
5. Opiši vzdolžni skener.
6. Opiši termično snemanje.

9 Radar

Senzorji, ki delujejo v mikrovalovnem delu elektromagnetnega spektra, postajajo v zadnjem času vedno bolj pomemben vir podatkov o okolju. Glavni razlog za to so njihove dobre lastnosti (na primer neobčutljivost na vremenske pojave in možnost snemanja ponoči), ki so vplivale na povečanje števila delujočih radarskih (predvsem satelitskih) sistemov. Način snemanja v mikrovalovnem območju je povsem drugačen kot v optičnem. Daljše valovne dolžine lahko prodirajo skozi oblake, meglice, prah in dež, saj nanje ne vpliva atmosfersko sipanje, ki je izrazito v optičnem delu spektra. Z radarjem lahko torej opazujemo ne glede na vremenske in druge razmere.

V nadaljevanju si oglejmo, kako deluje radar bočnega pogleda, kako z njim zajemamo podobe površja in od česa so te odvisne. Ukvarjali se bomo samo z aktivnim mikrovalovnim daljinskim zaznavanjem, saj se pasivno ne razlikuje od opazovanja v optičnem delu spektra.

9.1 Radar bočnega pogleda

Snemanje z radarjem močno spominja na fotografiranje z bliskavico, saj z mikrovalovnim elektromagnetnim valovanjem »osvetlimo« območje na zemeljskem površju in naredimo njegovo »sliko«. Fotoaparat z bliskovno lučjo povsem enako pošlje svetlobni impulz, nato pa na film zabeleži njegov odboj. Namesto kamere, leč in filma uporablja radar antene in računalniške medije, ki zaznavajo in zapisujejo podobe. Na radarskih posnetkih vidimo samo elektromagnetno valovanje, ki se je odbilo nazaj v smeri antene.

Radar (RADio Detection And Ranging, radijsko zaznavanje in določanje razdalje) meri jakost mikrovalovnega signala, ki ga izseva antena in odbijajo oddaljene površine oziroma predmeti na njih (slika 9.1). Način delovanja je zelo podoben kot pri lidarju, ki ga opisujemo v poglavju 10. Radarska antena v določenih časovnih presledkih oddaja in sprejema impulze, ki imajo značilno valovno dolžino in polarizacijo. Valovne dolžine (λ) so ponavadi v območju med 1 cm in 1 m, kar ustreza frekvenci (ν) med 300 MHz in 30 GHz, valovi pa so polarizirani v navpični ali vodoravni ravnini. Značilni radar odda proti tarči oziroma območju, ki ga snema, vsako sekundo kakih tisoč visokoenergijskih impulzov, trajajočih nekaj deset mikrosekund (do 50 μ s). Vsak izmed njih pokrije ozek pas frekvenc (ponavadi od 10 do 200 MHz) okrog sredinske frekvence radarja.

Na zemeljskem površju se energija mikrovalovnega impulza siplje v vse smeri, torej tudi nazaj proti anteni. To, tako imenovano *povratno sipanje*, se v obliki šibkega odmeva vrne do sprejemne antene, ki ima značilno polarizacijo – vodoravno ali navpično, vendar ne nujno enako kot oddajna antena. Zaznani signali se nato pretvorijo v

Oznaka pasu	Valovna dolžina (λ , cm)	Frekvenca (ν , GHz)
Ka	0,8–1,1	40,0–26,5
K	1,1–1,7	26,5–18,0
Ku	1,7–2,4	18,0–12,5
X	2,4–3,8	12,5–8,0
C	3,8–7,5	8,0–4,0
S	7,5–15,0	4,0–2,0
L	15,0–30,0	2,0–1,0
P	30,0–100,0	1,0–3,0

Tabela 9.1: Najpomembnejši mikrovalovni pasovi.



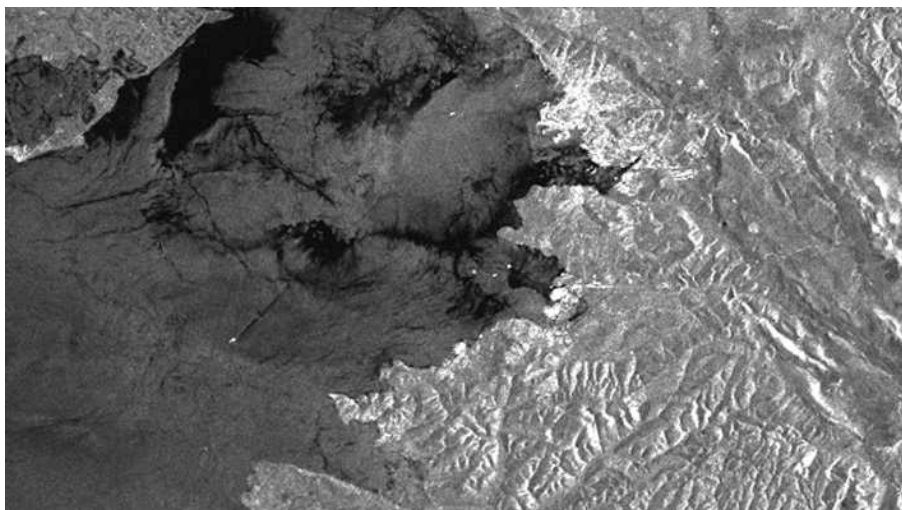
Slika 9.1: Radar usmeri impulz proti površju in meri njegov odboj.

digitalno obliko in zapišejo na ustrezen medij (trdi disk ali magnetni trak). Tak način shranjevanja precej poenostavi kasnejše obdelave in prikaz posnetkov. Ker radarsko valovanje potuje s hitrostjo svetlobe, to pa dobro poznamo, lahko z merjenjem časa od oddaje do sprejema impulza natančno določimo razdaljo do predmeta na površju Zemlje.

Radarski sistem določa položaj opazovanega površja na podlagi časa potovanja mikrovalov do Zemlje in nazaj (oziroma poševne razdalje) in časa zajetja signala. Projekcija prvega na referenčno ploskev določa koordinato pravokotno na smer gibanja (razdalja), drugi pa ob upoštevanju hitrosti sistema določa koordinato v smeri leta (azimut). V primeru »slikajočega« radarja se sistem oddajnih in sprejemnih anten namreč premika skupaj z nosilnim satelitom oziroma letalom in tako opazuje površino, ki jo lahko »osvetli«. Ta, tako imenovani odtis (footprint), z zaporednimi »podobami« pokrije večjo površino na Zemlji in ustvari njen radarski posnetek (slika 9.2).

Zaradi lažjega določanja koordinat in zmanjšanja geometrijskih popačenj sodobni radarski sistemi površje Zemlje »opazujejo« vstran, pravokotno na smer gibanja. Koti gledanja – in s tem oddaljenost opazovanega območja od projekcije tirnice na površje – se gibljejo od približno 10° do več kot 50° . Prav zaradi takšnega načina snemanja tovrstne sisteme imenujemo *radarji bočnega pogleda* (side looking radar, SLR).

Prostorska ločljivost radarskega sistema je odvisna od smeri opazovanja in v splošnem ni enaka v smeri leta (azimut) in v smeri radarskega žarka (razdalja). Frekvenčna »širina« mikrovalovnega impulza določa *razdaljno ločljivost*, to je ločljivost v prečni



Slika 9.2: S premikanjem nosilca in s tem odtisa na površini ustvarimo radarsko podobo. Na sliki je slovenska obala in Tržaški zaliv.

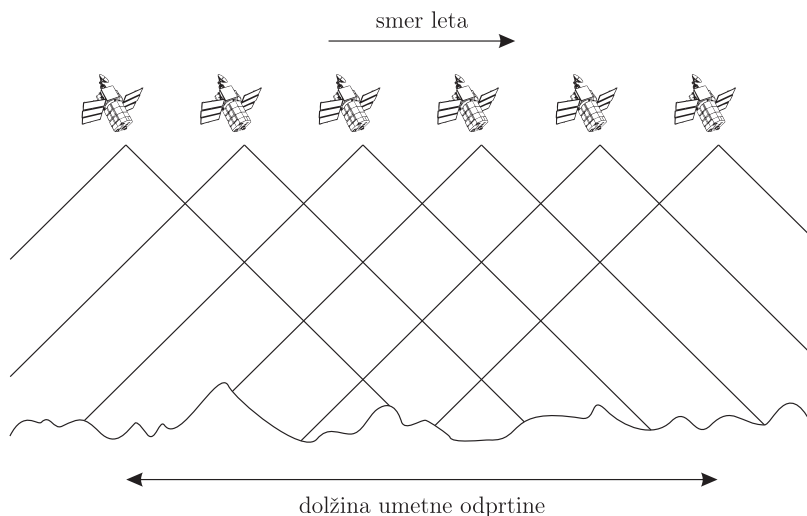
smeri (pravokotno na smer leta). Manjša ko je širina impulza oziroma krajši ko je ta, boljša je razdaljna ločljivost. Dolžina antene vpliva na *azimutno ločljivost* (v smeri leta) – čim daljša je antena, tem boljša je ločljivost v tej smeri.

9.2 Umetno odprtinski radar

Ker velikosti antene na satelitih in letalih ne moremo poljubno povečevati, uporabimo tehniko »navideznega« povečanja njene dolžine. *Umetno odprtinski radar* (synthetic aperture radar, SAR) s posebno tehniko iz razmeroma kratke antene ustvari navidezno zelo dolgo. Pri tem sestavi več zaporednih signalov (odbojev), ki jih radar sprejme med premikanjem v smeri leta. »Odprtina« v tem primeru predstavlja celotno razdaljo, na kateri radar zaznava energijo, odbito z zemeljskega površja, in jo sestavlja v podobo. Umetno odprtino dobimo torej s premikanjem realne odprtine oziroma antene prek več zaporednih položajev v smeri leta (slika 9.3).

Med premikanjem radar na zaporednih položajih oddaja impulze, ki jih sprejema antena zaznava in zapisuje. Ker se sistem premika glede na površje Zemlje, so odmevi zaradi Dopplerjevega pojava frekvenčno premaknjeni. Frekvenca zaznanega valovanja se poveča, ko se radar približuje tarči, in zmanjša, ko se od nje oddaljuje. Če premaknjena valovanja primerjamo z referenčnim signalom, to je tistim, ki ga radar oddaja, ugotovimo, kateri točki na površini ustrezajo. Ker iste dele opazujemo z več zaporednimi impulzi, ustvarimo na ta način navidezno zelo dolgo anteno.

Opisani postopek iskanja in združevanja odziva točk, pogosto ga imenujemo tudi *obdelava SAR*, samodejno izvajajo hitri računalniški sistemi, ponavadi takoj po sprejemu signala s satelita ali letala. Najtežje opravilo pri tem je pravilno določiti frekvenčni premik za vsak slikovni element, saj moramo zelo natančno poznati relativno gibanje senzorjev glede na tarčo. S tehnologijo umetno odprtinskega radarja danes ustvarijo največje število posnetkov, saj je zaradi velike oddaljenosti to edini mogoč način pri



Slika 9.3: Ustvarjanje umetne odprtine s premikanjem antene radarja.

snemanju iz vesolja.

Ker radarji sami skrbijo za »osvetljevanje« površine, jih lahko uporabimo kadar koli, podnevi ali ponoči, povsem neodvisno od sončne osvetlitve. Poleg tega so valovne dolžine, ki jih uporabljamo, veliko večje kot v vidnem ali infrardečem delu spektra. Zato lahko SAR uporabimo tudi za »gledanje« skozi oblake in meglo, kar je v primeru vidnega in infrardečega elektromagnetnega valovanja nemogoče.

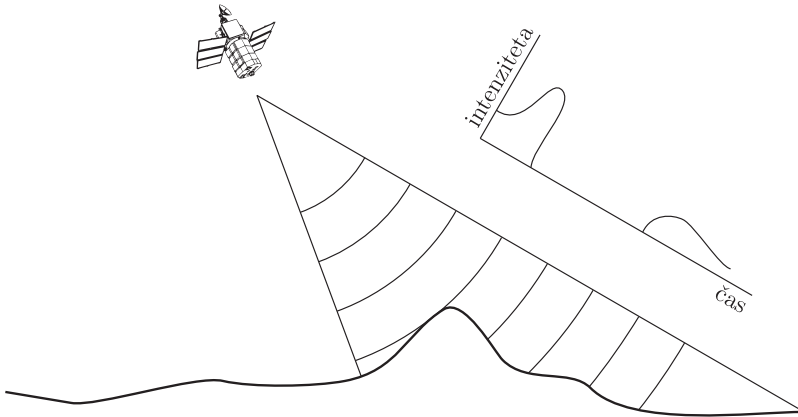
9.3 Interakcija mikrovalov s površjem

Podatki, dobljeni z radarskimi senzorji, se močno razlikujejo od optično zaznanih, zato moramo za njihovo razumevanje poleg osnov delovanja radarskih sistemov poznati tudi način interakcije mikrovalov z zemeljskim površjem. Jakost odbitega radarskega valovanja določa več dejavnikov, med katerimi so najpomembnejši:

- krajevni vpadni kot,
- razgibanost terena ter
- prevodnost in dielektričnost zemeljskega površja.

Krajevni vpadni kot, to je kot, pod katerim valovanje pade na zemeljsko površje, odločilno vpliva na jakost odboja. Vpadni kot določata naklon terena v smeri proti radarju in kot gledanja radarskega sistema. V primeru opazovanja ravnine je vpadni kot enak kotu gledanja radarskega sistema.

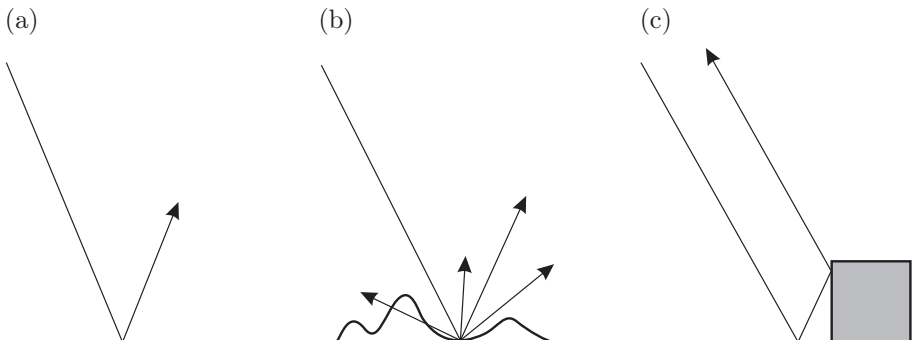
Če radarsko valovanje pade na odbojno ploskev skoraj pravokotno, se precej močneje odbije, kot če pade nanjo pod zelo majhnim kotom. V slednjem primeru se ne glede na tip površja večji del energije radarskih valov odbije proč od sprejemnika, območja na sliki pa so videti »temna« ali le šibko osvetljena. Prav zato je krajevni vpadni kot eden najpomembnejših dejavnikov, ki določajo intenziteto odbitega valovanja in s tem svetlost radarske podobe (slika 9.4).



Slika 9.4: Vpliv vpadnega kota na jakost odbitega mikrovalovanja.

Vpliv razgibanosti terena najlažje razumemo na primeru morske površine, kjer so vsi drugi vplivi enaki in lahko nanje za trenutek pozabimo. Kadar je voda »gladka kot steklo«, je njena odbojnost enaka nič, saj se celotno radarsko valovanje odbije v smeri proč od detektorja. Ta pojav se imenuje *zrcalni odboj*. Zmerni odboj dobimo v primeru, ko je vodna gladina še vedno ravna, na njeni površini pa se zaradi vetra pojavijo drobni valovi z valovno dolžino, ki je primerljiva z valovno dolžino radarskih valov (približno decimeter). Odboj je še nekoliko močnejši, kadar se valovi na površini vode »lomijo«. V obeh primerih govorimo o *razpršenem odboju*.

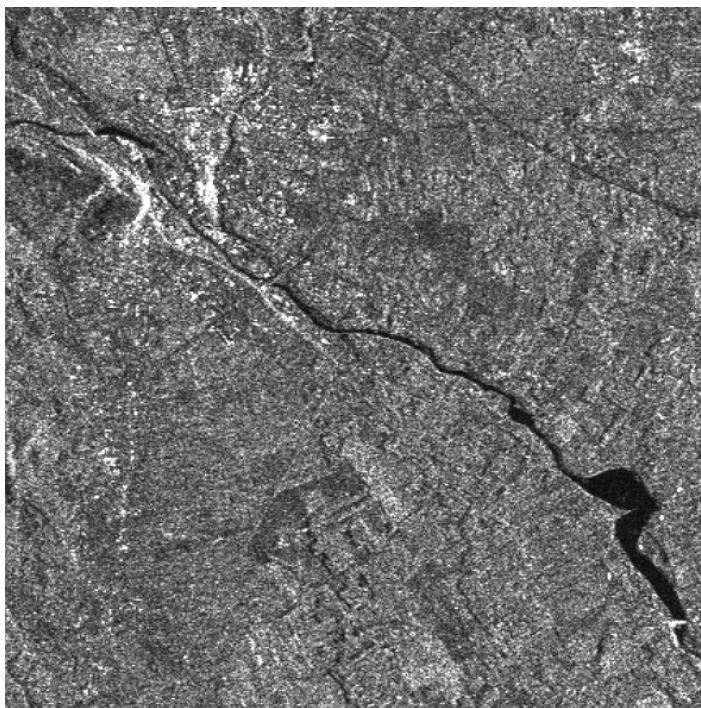
Jakost zaznanega valovanja je najmočnejša pri *pravokotnem odbojniku*, ki ga dobimo s presekom treh med seboj pravokotnih ploskev. Geometrija takega odbojnika poskrbi za to, da se vsak žarek odbije natanko v smer vpada, ne glede na usmerjenost odbojnika. Posebne kovinske odbojnike lahko uporabimo kot kontrolne točke na terenu, saj njihov močan signal preprosto ločimo od okolice (na slikah jih opazimo kot zelo svetle pike). Močan odboj pogosto dobimo tudi na stavbah, katerih stene skupaj z ravnim območjem pred njimi tvorijo »delni« pravokotni odbojnik. Vse opisane tipe odboja prikazuje slika 9.5.



Slika 9.5: Zrcalni (a), razpršeni (b) in pravokotni oziroma popolni (c) odboj radarskih valov.

Kovinski predmeti, kot so, na primer, ladje, pločevinaste strehe ali železniške tirnice, imajo veliko električno prevodnost in zato močno odbijajo radarske valove. Pri delno prevodnih snoveh, na primer vlažni prsti ali zeleni vegetaciji, najmočneje določa odbojnost *kompleksna dielektrična konstanta*. Ta je odvisna tako od »čiste« dielektrične konstante¹ kot tudi od prevodnosti.

Ker ima voda eno največjih dielektričnih konstant med vsemi naravnimi snovmi, je odbojnost prsti in rastlin močno odvisna od vsebnosti vode. Za radarsko valovanje je značilno, da dobro prodira v suha tla in vegetacijo. V izredno sušnih območjih, kot so puščave, lahko z uporabo radarja ustrezne valovne dolžine opazujemo predmete, ki so več metrov pod površino. Po drugi strani pa vlažna prst in vegetacija odbijata mikrovalove že na površini. Intenziteta odboja je v tem primeru odvisna od oblike površine. Zaradi izredne občutljivosti radarskih podob na vlago, je ena najimenitnejših uporab posnetkov SAR ravno merjenje vlažnosti, prek katere lahko, na primer, napovedujemo pridelek.



Slika 9.6: Zrnatosti se pri radarskih posnetkih ne moremo izogniti. Slika prikazuje območje Sorškega polja s Kranjem levo zgoraj in jezom hidroelektrarne Mavčiče desno spodaj.

Pri radarskih posnetkih imamo poleg ostalih virov šuma (merilniki, prenos informacij in tako dalje) opravka še z *zrnatostjo*. Zrnatost povzročijo naključno posejani posamični sipalci, ki se nahajajo znotraj danega slikovnega elementa (piksla). Nekateri izmed teh so razmeroma majhni, na primer velikostnega reda radarskih valov (nekaj

¹Dielektričnost ali dielektrična konstanta (ϵ) je snovna konstanta, ki opisuje obnašanje dielektrika, snovi z zelo veliko specifično upornostjo, v električnem polju. Definirana je kot razmerje med gostoto električnega polja v snovi in gostoto električnega polja v praznem prostoru.

centimetrov). Če je več sipalcev natanko enako oddaljenih od senzorja, se odbito valovanje lahko močno okrepi. Že malo spremenjeno stanje, na primer zaradi gibanja listja v vetru, ustvari drugačne pogoje za odboj in pride lahko do oslabitve. Zaradi konstruktivne interference je na posnetkih nekaj slikovnih elementov videti nesorazmerno svetlih, medtem ko so lahko sosednji slikovni elementi zaradi destruktivne interference zatemnjeni.

Rezultat omenjenega pojava je podoba, ki je videti kot bi bila »posejana s poprom in soljo«, kar lahko povzroči precej neprijetnosti pri ovrednotenju (slika 9.6). Seveda lahko učinek zrnatosti zmanjšamo z uporabo digitalnih filtrov, vendar se moramo zavedati, da s filtriranjem informacije samo izgubljam.

Vprašanja

1. Opiši radarsko daljinsko zaznavanje.
2. Opiši umetno odprtinski radar.
3. Kaj vpliva na intenziteto odbitega radarskega valovanja?

10 Lidar

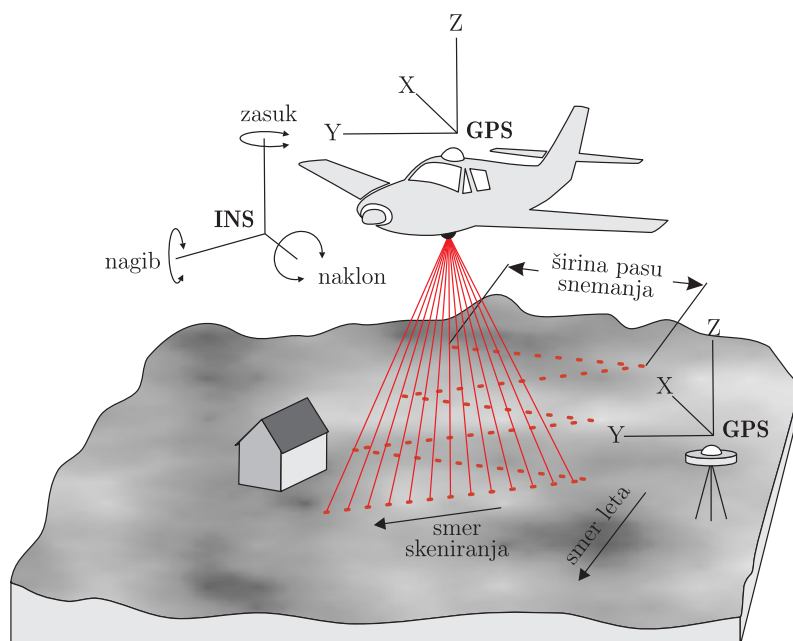
Izboljšanje naprav globalnega pozicioniranja in inercialnih navigacijskih sistemov, ki smo mu bili priča na prelomu tisočletja, je omogočilo razvoj lidarskega snemanja oziroma laserskega skeniranja. Lidar je aktivni instrument, ki proti opazovanim predmetom pošilja kratke laserske pulze in opazuje njihov odboj. Pri tem pridobiva zelo natančne podatke o površju in predstavlja trenutno najbolj natančno tehniko za izdelavo digitalnih modelov višin. Lidarsko daljinsko zaznavanje uporabljamo v geologiji, gozdarstvu, arheologiji, mobilnih telekomunikacijah, atmosferski fiziki ...

Izraz *lidar* je okrajšava za LIght Detection And Ranging oziroma svetlobno zaznavanje in merjenje razdalj ali Laser Imaging Detection And Ranging oziroma lasersko snemanje, zaznavanje in merjenje razdalj. Gre za tehnologijo, ki omogoča določanje razdalje do objektov ali površin z uporabo laserskih pulzov. Način delovanja lidarja je močno podoben delovanju radarja (poglavje 9). Razdaljo med senzorjem in opazovanim predmetom namreč določimo z merjenjem časa potovanja elektromagnetnega impulza. Pri radarskem snemanju uporabljamo mikrovalove, pri lidarju pa laserje, ki delujejo v vidnem in bližnjem infrardečem delu elektromagnetnega spektra.

10.1 Delovanje lidarja

Lidar je – enako kot radar – aktivni senzor, ki deluje v vidnem in infrardečem delu spektra (radar uporablja mikrovalove ali radarske valove). Signal lidarja je odvisen od razmer v atmosferi, medtem ko radar skozi slednjo potuje bolj ali manj neodvisno (poglavje 4). Lidarski sistemi opazujejo površje navpično navzdol, radarski pa vstran (tako imenovani radar bočnega pogleda, ki je opisan v razdelku 9.1), poleg tega pa lidar praviloma zaznava diskretne točke in ne zveznih površin, to je pikslov v rastrski mreži, kot radar in večino ostalih senzorjev daljinskega zaznavanja.

Laserski skenerji uporabljajo optično mehanske snemalnike, ki so zelo podobni tistim pri vrstičnih skenerjih (na primer Landsat TM, razdelek 8.2.1). Od njih se ločujejo po dveh pomembnih podrobnostih – aktivnem snemanju in zelo ozkem vidnem polju. Lidar ne zaznava odbite svetlobe Sonca, ampak proti Zemlji pošlje lastno valovanje, zato imamo opravka z oddanim in sprejetim impulzom. Druga razlika je ozko vidno polje, saj sta oddani in odbiti žarek zaradi narave laserske svetlobe zelo usmerjena. Intenziteta laserske svetlobe je pravilno razporejena po preseku žarka, slednji pa ima zelo majhno divergenco (razpršenost). Divergenca znaša le nekaj miliradianov (tipično med 0,3 in 2 mrad), kar pomeni majhno trenutno vidno polje. Laser na površju opazuje odboje s površine velikostnega reda metra, odvisno od višine leta snemalnega sistema. Podobe



Slika 10.1: Delovanje lidarskega sistema.

večje površine ustvarimo le z gibanjem snemalnega sistema v vzdolžni (let platforme) in prečni smeri (nihanje levo desno), kot je prikazano na sliki 10.1.

Laserski snemalni sistem sestavlja več delov:

- laserski razdaljemer,
- optično mehanski skener,
- sistem pozicioniranja ter
- krmilno procesna enota.

Razdaljemer je sestavljen iz oddajnega laserja in sprejemnika signalov. Obstajata dva glavna načina delovanja, in sicer:

- diskretni in
- valovni.

Diskretni lidar ali pulzni lidar oddaja kratke pulze elektromagnetnega valovanja in meri njihove odboje (vsaj enega, lahko tudi dva ali več). Nekateri sistemi so sposobni zabeležiti tudi intenzivnost odboja, kar omogoča ustvarjanje podobe odbojev. Diskretni lidar ima nekaj pomembnih prednosti, predvsem visoko prostorsko ločljivost ter možnost povečevanja gostote moritev. Sistemi, ki delujejo na ta način, so zelo razširjeni in zato je snemanje relativno poceni. Največja pomanjkljivost pa so zapleteni algoritmi obdelave velike količine podatkov.

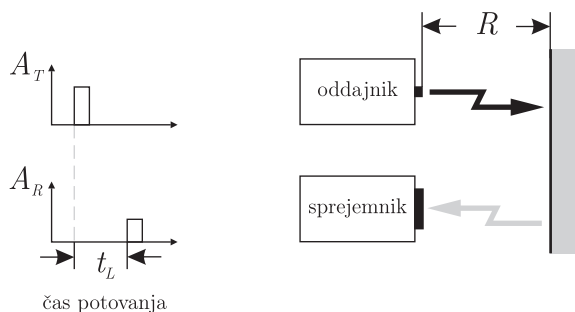
Valovni lidar ali zvezni lidar signal oddaja ves čas in meri odboj glede na fazni zamik med oddanim in sprejetim signalom. Glavna prednost valovnega lidarja v primerjavi z diskretnim je zmožnost beleženja vertikalnega profila predmetov, na katerih je prišlo do

odboja. Pomembno poenostavitev pa predstavlja tudi preprostejša podatkovna struktura, tako z vidika shranjevanja kot tudi obdelave. Največja pomanjkljivost valovnega lidarja je manjša prostorska ločljivost.

Najnovejši sistemi v glavnem uporabljajo diskretne lidarje s trdninskimi laserji z zelo veliko močjo. Laser Nd:YAG, na primer, ki ima dolžino pulza med 10 in 15 ns in valovno dolžino 1,06 μm , ima moč več megawattov. Ker so valovni lidarji zelo redki, so v nadaljevanju obravnavani le diskretni.

Najpomembnejše tehnične lastnosti, po katerih se lidarji med seboj ločijo in ki določajo njihov namen oziroma zmogljivost, so naslednje.

- *Valovna dolžina laserja* za terestrično rabo je ponavadi v pasu med 800 nm in 1100 nm, kjer je odbojnost rastlinstva največja, nevarnost za človekov vid pa najmanjša. Glavna pomanjkljivost omenjenega dela spektra je znatna absorpcija v atmosferi.
- *Frekvenca laserskih pulzov* – navadno med 5 in 100 kHz – skupaj s kotom skeniranja ter višino in hitrostjo leta določa gostoto pulzov (na kvadratni meter).
- *Premjer laserskega žarka* ali tudi odtis (footprint) je lahko od nekaj centimetrov do sto metrov, odvisno od višine leta. Premer žarka določa prostorsko ločljivost zabeleženih podatkov.
- *Moč laserja* določa največjo mogočo višino leta (praviloma velikostnega reda kilometra) in s tem širino snemalnega pasu (tipično od nekaj sto metrov do več kot kilometer).



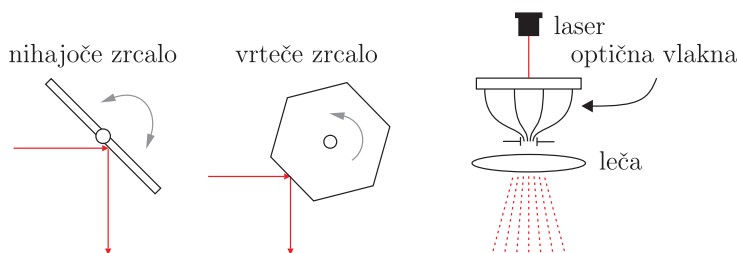
Slika 10.2: Lidar določa razdaljo med senzorjem in površjem z merjenjem časa potovanja valovanja.

Osnovni podatek, ki ga lidar meri, je čas potovanja elektromagnetnega impulza med senzorjem in opazovanim predmetom (tarčo). Ker poznamo hitrosti svetlobe, lahko razdaljo iz časovne razlike med oddajo laserskega pulza in prejemom odboja izračunamo (slika 10.2)

$$t_L = \frac{2R}{c}. \quad (10.1)$$

Pri tem je t_L čas potovanja valovanja, c hitrost svetlobe in R razdalja med senzorjem in površjem. Natančnost merjenja razdalje (ΔR) je povezana s časovno ločljivostjo (Δt_L)

$$\Delta R = \frac{1}{2} c \Delta t_L. \quad (10.2)$$



Slika 10.3: Skenerji pri lidarskih sistemih za usmerjanje laserja uporabljajo nihajoča zrcala, vrteča zrcala in optična vlakna.

Ločljivost meritve razdalje je torej neposredno povezana z ločljivostjo meritev časa oziroma posredno z dolžino pulza oziroma njegovo obliko. Z diskretnimi lidarji lahko razdaljo merimo na približno centimeter natančno, s posebnimi postopki obdelave in dodatno opremo celo natančneje.

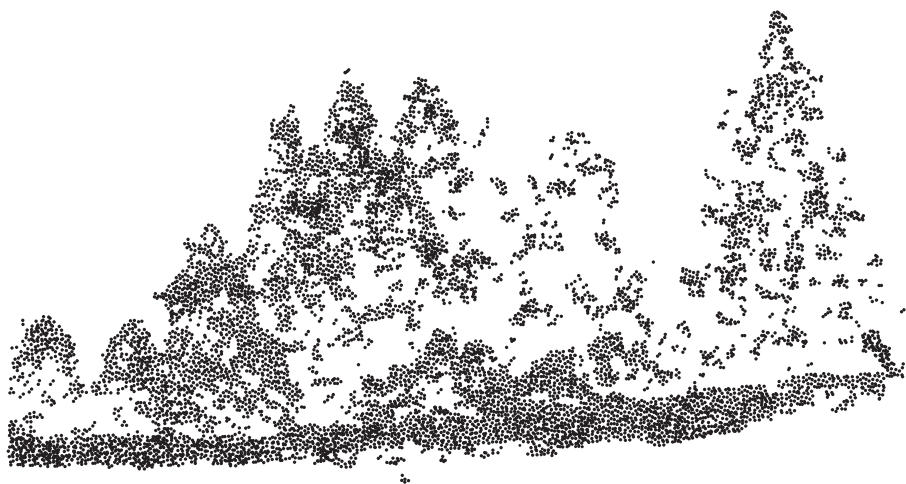
Lidar pri snemanju, kot smo že omenili, z relativno majhnim odtisom laserskega žarka točkovno meri čas potovanja in vedno pogosteje tudi jakost odboja na površju. Slednja je odvisna od deleža energije žarka, ki ga določena ovira prestreže, od njenih odbojnih lastnosti (reflektivnost, površinska morfologija) ter od absorpcije v atmosferi. *Skeniranje* lahko poteka v eni ali obeh smereh, odvisno od zgradbe snemalne naprave (slika 10.3). Najpogosteje se uporabljajo nihajoča ali vrteča zrcala, obstajajo pa tudi sistemi z optičnimi vlakni. Oblika snemalnega vzorca – to je položaj meritev na površju – ni odvisna le od delovanja skenerja, ampak tudi od višine in hitrosti leta ter oblike reliefa. Točke lidar praviloma zajema v enakih kotnih intervalih, razdalja med njihovimi odtisi na površju pa ni konstantna. Zaradi različne geometrije znotraj pasu snemanja (izrazito predvsem pri letalskem snemanju), ustavljanja in pospeševanja na robovih pasu, so lahko točke razporejene zelo »nepravilno«, zato pri lidarju ne govorimo o značilnih razdaljah, ampak le o gostoti točk (meritev) na kvadratni meter.

Laserski skener meri samo razdalje, pravi položaj odbojnikov pa lahko določimo, če poznamo položaj in usmerjenost senzorja. Za vsak poslani impulz moramo v izbranem koordinatnem sistemu, na primer WGS 84, poznati natančen položaj senzorja in kot gledanja skenerja. Ker z laserjem razdalje brez večjih težav merimo z natančnostjo enega decimetra, mora imeti tolikšno natančnost tudi *sistem pozicioniranja*. Kot je prikazano na sliki 10.1, so lidarski sistemi opremljeni z diferencialnim sprejemnikom globalnega pozicioniranja (differential global positioning system, DGPS) in inercialnim navigacijskim sistemom (inertial navigation system, INS). Za uspešno geokodiranje lidarskih meritev je treba oba sistema natančno sinhronizirati s skenerjem.

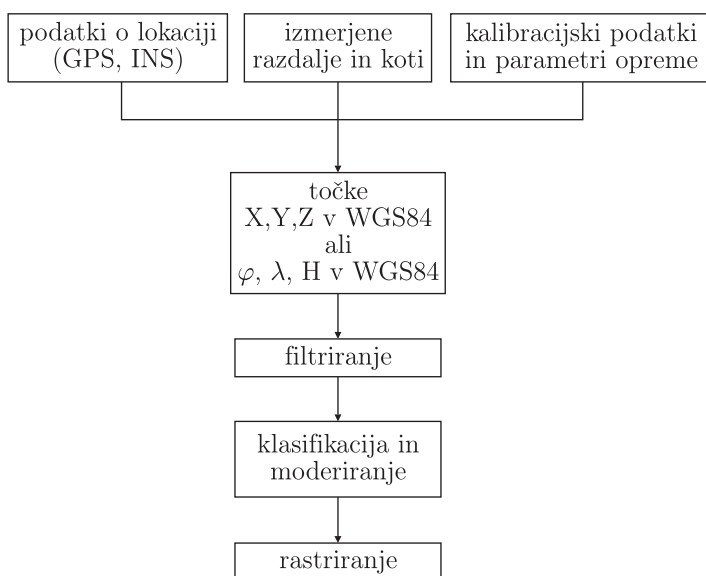
10.2 Obdelava podatkov

Po snemanju z lidarjem dobimo dve podatkovni zbirki, in sicer podatke o položaju sistema in podatke o odbojih oziroma razdaljah. Iz obeh podatkov lahko izračunamo položaje točk odboja na površju. Ponavadi jim kot atribut pripišemo red odboja (prvi, drugi, ..., zadnji) in če je mogoče tudi njegovo jakost. Končni rezultat je torej oblak točk, ki predstavljajo odboje na različnih predmetih (slika 10.4).

Oblak lidarskih točk je zapisan s tremi prostorskimi koordinatami in praviloma več atributi. Taka oblika zapisa pa ni najbolj primerna za analize, zato je treba lidarske



Slika 10.4: Oblak lidarskih točk. Slika prikazuje gozd, v katerem jasno vidimo obliko drevesnih krošenj.

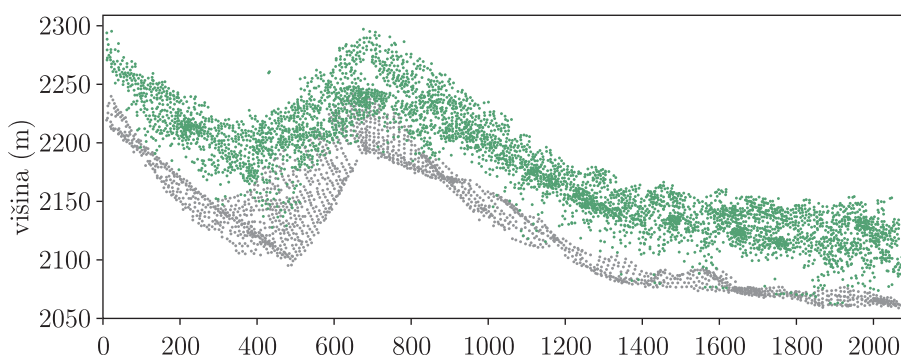


Slika 10.5: Postopek obdelave lidarskih meritev.

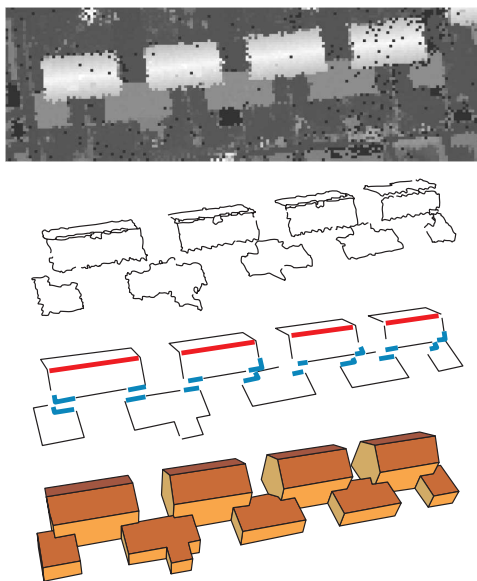
podatke dodatno obdelati. Postopek obdelave lidarskih podatkov podaja slika 10.5, najpomembnejši koraki pa so:

- filtriranje,
- klasifikacija in
- rastriranje.

Pri *filtriranju* skušamo izločiti vse neželene odboje. Oblak lidarskih točk namreč vsebuje pulze, ki so se odbili na različnih predmetih (slika 10.6). Pri tem gre lahko za



Slika 10.6: Lidarski podatki vsebujejo informacijo o točki odboja valovanja. Ta je lahko na golih tleh ali pa nad njimi, odvisno od predmeta, na katerem je do odboja prišlo. Pri filtriranju poiščemo točke, ki nas zanimajo, na primer talne točke, če želimo dobiti digitalni model višin.



Slika 10.7: S klasifikacijo in modeliranjem iz oblaka točk dobimo trirazsežne modele (Brenner, 2006).

odboje na zunanji ovojnici površja, to je na vrhovih vegetacije in stavb, s čimer dobimo tako imenovani digitalni model površja (digital surface model). Do odboja pa lahko pride tudi znotraj predmetov, predvsem vegetacije ali vode, in na tleh. Talni odboji, če do njih seveda pride, podajajo obliko reliefa in omogočajo izdelavo digitalnega modela višin (digital elevation model).

Za odstranjevanje »neželenih« točk – pri meritvah topografskih lastnosti površja so to vsi odboji, ki ne prihajajo od golih tal – uporabljamo različne algoritme, ki temeljijo na matematični morfologiji, iterativnem izločanju točk, segmentaciji ali modeliranju reliefa s celotnim oblakom. Filtriranje je eno najbolj intenzivnih področij raziskav, saj še

vedno ne obstaja univerzalna tehnika, ki bi bila primerna tako za urbane površine kot gozdove, tako za ravna kot za strma območja. Kakovost končnih rezultatov je namreč močno odvisna od načina obdelave in zato operaterji lidarskega snemanja poleg nekaterih izdelkov, na primer modelov površja in višin, praviloma posredujejo uporabnikom tudi »surove« podatke.

Rezultat filtriranja je digitalni model višin ali površja, zapisan v vektorski, na primer v obliki mreže TIN, ali v rastrski obliki, to je v matriki z višino (in jakostjo odboja) kot atributom. Pomemben korak pri interpretaciji lidarskih podatkov je *klasifikacija*, pri kateri prepoznamo določene geometrijske strukture ali objekte, na primer zgradbe, ceste, drevesa in podobno. Klasifikacija rastrskih podatkov poteka z enakimi postopki kot obdelava drugih podob daljinskega zaznavanja (poglavja 15 do 18), upoštevati moramo le veliko ločljivost lidarskih podatkov. Zadnji korak obdelave je *modeliranje* oziroma posplošenje (generalizacija) klasificiranih predmetov. Z modeliranjem, na primer, dobimo model stavb ali navpične profile vegetacijskega pokrova (slika 10.7).

Meritve, ki jih zagotavlja lidar, omogočajo ustvarjanje natančnih modelov višin in površja. Surove ali obdelane lidarske podatke lahko uporabimo v najrazličnejših aplikacijah – v gozdarstvu za opazovanje višine dreves in meritve parametrov biomase, v telekomunikacijah za načrtovanje širjenja valovanja, v geologiji in seizmologiji za zaznavanje prelomov, pri opazovanju urbanih površin za pridobivanje trirazsežnih modelov stavb, v arheologiji za odkrivanje in kartiranje najdišč ...

Vprašanja

1. Kaj je laser in kako deluje?
2. Kateri so sestavni deli lidarskega sistema?
3. Kakšne vrste lidarjev poznamo?
4. Katere podatke meri lidar?
5. Kako poteka obdelava podatkov?

11 Satelitski sistemi za opazovanje Zemlje

Spoznali smo osnovne značilnosti platform (letal, satelitov, vesoljskih plovil, poglavje 6) in senzorjev (prečnih, vzdolžnih, fotografskih, elektronskih in termičnih, poglavja 8 do 10), v naslednjih razdelkih pa se bomo lotili posameznih snemalnih sistemov. Podali bomo izbor pomembnejših satelitskih sistemov, ki delujejo v vidnem, infrardečem in mikrovalovnem (radarskem) delu elektromagnetnega spektra.

Zaradi velike množice senzorjev daljinskega zaznavanja je nemogoče podati njihov popoln pregled. Ne nazadnje je ta v trenutku objave, tako elektronske kot tiskane, že zastarel. Verjetno najboljšežnejši opis snemalnih sistemov je v svoji knjigi na več kot 1500 straneh objavil Kramer (2002). Najpomembnejši vir o preteklih, obstoječih in načrtovanih senzorjih pa je svetovni splet, predvsem spletišča vesoljskih agencij in ponudnikov podatkov.

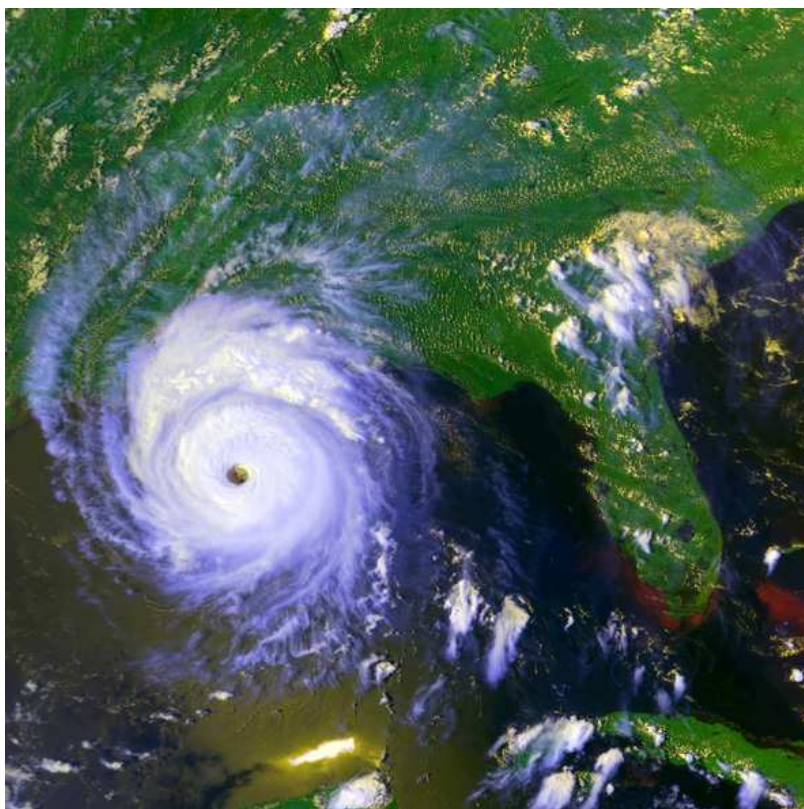
11.1 Vremenski sateliti

Opazovanje in napovedovanje vremena je bil eden prvih civilnih načinov uporabe satelitskega daljinskega zaznavanja. Prvi »pravi« vremenski satelit *TIROS-1* (Television and Infrared Observation Satellite – 1) so Združene države Amerike izstrelile že leta 1960. V naslednjih petih letih so izstrelili še veliko drugih satelitov, ki so vsi iz skoraj polarne tirnice periodično opazovali vremensko dogajanje. Leta 1966 je NASA (National Aeronautics and Space Administration, Ameriška letalska in vesoljska agencija) izstrelila geostacionarni satelit *Applications Technology Satellite* (ATS-1), ki je poskrbel za podobe celotne zemeljske poloble (hemisfere). ATS je naredil sliko oblačnosti vsake pol ure, s čimer je omogočil opazovanje nastajanja in premikanja vremenskih sistemov. Danes imajo svoje vremenske ali meteorološke satelite številne države. Z njimi sistematično opazujejo vremenske pojave na celotni zemeljski obli.

Meteorološki sateliti imajo, splošno rečeno, senzorje s precej slabo prostorsko ločljivostjo (vsaj v primerjavi s sistemi za opazovanje kopnega), omogočajo pa opazovanje velikih površin. Njihova časovna ločljivost je praviloma zelo dobra, saj zelo pogosto, tudi večkrat na uro, zaznavajo površje Zemlje, atmosfersko vlago in oblačnost. Tako omogočajo skoraj zvezno spremljanje globalnih vremenskih razmer in torej tudi napovedovanje vremena.

11.1.1 GOES

GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) je neposredni naslednik satelitov serije *ATS*. Satellite *GOES* je razvila NASA za National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Ameriška uprava za oceane in atmosfero). Njihov namen je zagotavljanje pogostih podob Zemlje in njene oblačnosti v majhnem merilu, predvsem za potrebe ameriških hidrometeoroloških ustanov. Satellite omenjene skupine uspešno uporabljajo vremenoslovci že več kot 20 let.



Slika 11.1: Hurikan Andrew, ki ga je 25. avgusta 1992 posnel satelit GOES-7.

Sateliti *GOES* so del svetovnega omrežja satelitov, ki so med seboj razmaknjeni v približno 70° intervalih v geografski dolžini, s čimer dosežejo skoraj globalno pokritost. Dva satelita *GOES* sta nameščena v geostacionarni tirnici, na višini približno 36 000 km nad ekvatorjem, pri čemer vsak izmed njiju opazuje dobro tretjino Zemlje. Prvi je na geografski dolžini 75° zahodno in opazuje Severno in Južno Ameriko ter večji del Atlantskega oceana. Drugi pa na 135° zahodno opazuje Severno Ameriko in Pacifiški ocean. Skupaj satelita pokrivata površje med 20° zahodno in 165° vzhodno. Slika 11.1 prikazuje del Združenih držav, skupaj z delom Atlantskega oceana, kjer nastane veliko resnih viharjev. Sliko hurikana Andrewa, ki je avgusta 1992 opustošil jugovzhod ZDA, je posnel satelit GOES-1.

Do sedaj so izstrelili več kot deset satelitov *GOES* v dveh generacijah, ki sta merili tako sevano kot odbito elektromagnetno valovanje, z njihovimi podatki pa lahko

<i>Kanal</i>	<i>Valovna dolžina (μm)</i>	<i>Spektralni pas</i>	<i>Ločljivost (km)</i>	<i>Uporaba</i>
1	0,52–0,72	vidna	1	zaznavanje oblakov, onesnaženja in meglic; opazovanje velikih neurij
2	3,78–4,03	kratko-valovna IR	4	opazovanje megle ponoči; ločevanje oblakov vode in snega ali ledu podnevi; zaznavanje požarov in vulkanov; nočno določanje površinske temperature morja
3	6,47–7,02	IR pas vodne pare	4	določanje območij srednje vlažnosti; sledenje srednjih atmosferskih gibanj
4	10,2–11,2	dolgovalovna IR	4	določanje vetrov, ki premikajo oblake, večjih viharjev in močnega dežja
5	11,5–12,5	IR pas vodne pare	4	določanje šibke vlažnosti; določanje temperature morske površine; opazovanje zračnih delcev in vulkanskega prahu

Tabela 11.1: Kanali satelitov GOES.

pridobivamo informacije o atmosferski temperaturi, vetrovih, vlagi in oblačnosti. Prvo generacijo so sestavljali sateliti GOES-1 (izstreljen leta 1975) do GOES-7 (izstreljen leta 1992). Drugo generacijo satelitov je pričel GOES-8 (izstreljen leta 1994). Sateliti nove generacije imajo številne tehnične izboljšave v primerjavi s prvimi. Omogočajo skoraj zvezno opazovanje Zemlje, saj podobe zajemajo v intervalih po 15 minut. Poleg tega imajo izboljšano prostorsko ločljivost, ki skupaj z izboljšano radiometrično ločljivostjo omogoča boljšo kakovost podatkov in s tem natančnejše napovedovanje vremena. Trenutno zemeljsko površje opazujeta satelita GOES-12 (GOES-East, 75° zahodno) in GOES-10 (GOES-West, 135° zahodno).

GOES-8 in ostali sateliti druge generacije imajo poseben slikovni in sondirni instrument. Slikovni instrument ima pet kanalov, s katerimi zaznava vidno in odbito infrardečo sončno svetlobo. Senzor je mogoče usmeriti, tako da lahko z njim opazujemo celotno poloblo ali pa izbrane dele v manjšem merilu. Z usmerjanjem se lahko osredotočimo na vremenske »vroče točke« in izboljšamo kakovost kratkotrajnih napovedi. Podatki slikovnega senzorja imajo desetbitno radiometrično ločljivost, meritve pa lahko prenesemo neposredno na terminale uporabnikov. Tabela 11.1 podaja kanale satelita in primere njihove uporabe.

11.1.2 NOAA AVHRR

NOAA je odgovorna še za eno skupino zelo pomembnih satelitov, ki so uporabni tako za meteorološke kot tudi druge namene. Gre za sončno sinhrono satelite v skoraj polarnih tirnicah na višini 830 do 870 km nad Zemljo. Sateliti so nasledniki skupine Advanced TIROS, katere začetki segajo v leto 1960. Z njimi pridobivamo podatke, ki dopolnjujejo geostacionarne meteorološke satelite. Dva satelita serije NOAA, ki imata oba globalno pokritost, delujeta skupaj in tako poskrbita, da podatki katerega koli dela zemeljske površine niso starejši od šest ur. Eden od satelitov prečka ekvator zgodaj zjutraj v smeri sever jug, drugi pa popoldne.

Najpomembnejši senzor na satelitih NOAA je *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR). AVHRR uporabljamo tako v meteorologiji kot tudi pri opazovanju Zemlje v majhnem merilu. Senzor zaznava valovanje v vidnem, bližnjem, srednjem in termičnem infrardečem delu elektromagnetnega spektra v pasu širine 3000 km. Spektralne pasove senzorja AVHRR podaja tabela 11.2.

Podatke senzorja AVHRR lahko dobimo v štirih načinih delovanja, odvisno od ločljivosti in načina prenosa. Podatke lahko prenesemo neposredno do uporabnikov in jih

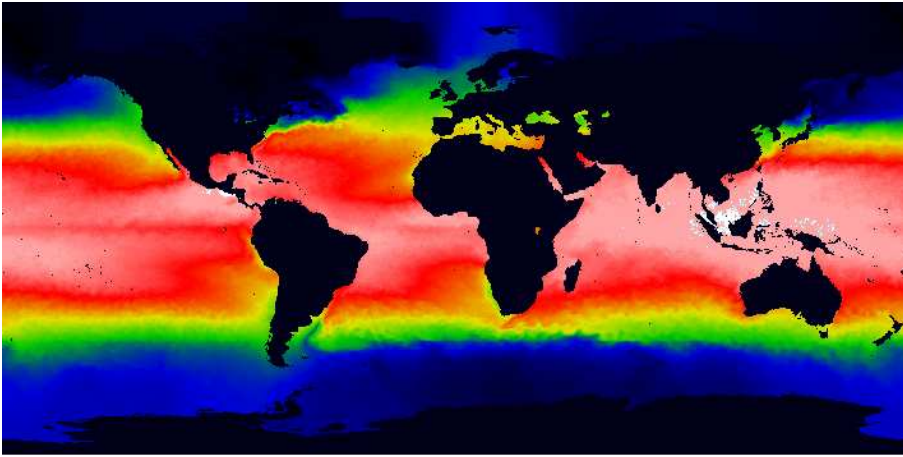
Kanal	Valovna dolžina (μm)	Spektralni pas	Ločljivost (km)	Uporaba
1	0,58–0,68	rdeča	1,1	opazovanje oblakov podnevi, opazovanje kopnega
2	0,725–1,1	bližnja IR	1,1	analiza vodnih površin, določanje meje med kopnim in morjem
3A	1,58–1,64	srednja IR	1,1	zaznavanje snega in ledu
3B	3,55–3,93	srednja IR	1,1	opazovanje oblakov ponoči, merjenje temperature morja
4	10,3–11,3	termična IR	1,1	merjenje temperature morja
5	11,5–12,5	termična IR	1,1	merjenje temperature morja

Tabela 11.2: Kanali senzorja AVHRR.

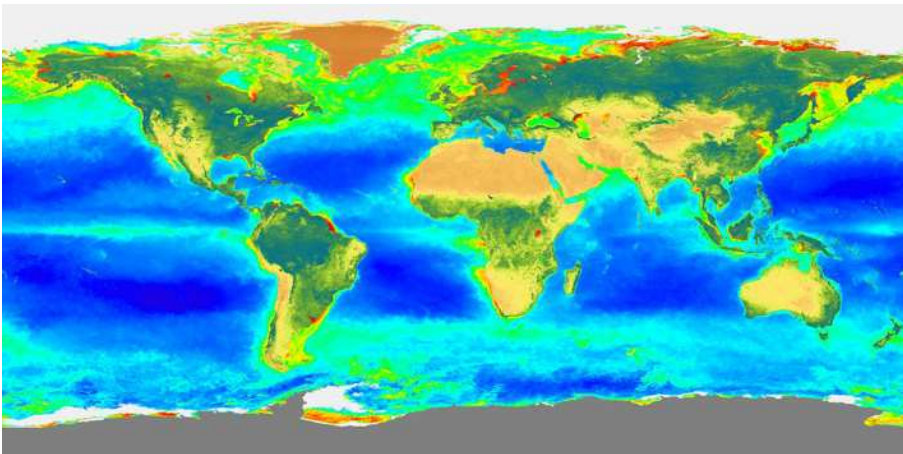
Ločljivost	Prenos	
	Neposredni	Posredni
1,1 km	HRPT (High Resolution Picture Transmission)	LAC (Local Area Coverage)
4 km	APT (Automatic Picture Transmission)	GAC (Global Area Coverage)

Tabela 11.3: Načini zajemanja podatkov senzorja AVHRR.

(a)



(b)



Slika 11.2: Temperatura morja (a) in vegetacijski indeks (b), ustvarjen s posnetki AVHRR.

opazujemo med zajemanjem, poleg tega pa jih lahko shranimo v pomnilniku na satelitu in jih na Zemljo prenesemo kasneje. Podobe so lahko višje (1,1 km) ali nižje ločljivosti (4 km). Načine delovanja senzorja AVHRR prikazuje tabela 11.3.

Kljub temu, da so podatki AVHRR široko uporabni za napovedovanje in analizo vremenskega dogajanja, je senzor primeren tudi za opazovanje kopnih in morskih površin. AVHRR ima bolj grobo ločljivost od tipičnih senzorjev za opazovanje kopnega (poglavje 11.2), vendar ga lahko uporabljamo za opazovanje večjih površin v manjšem merilu. Z njim lahko merimo globalno temperaturo morja (slika 11.2 a). Tako imenovani mozaiki, ki jih ustvarimo iz več podob AVHRR, so uporabni za kartiranje in spremljanje stanja vegetacije na večjih površinah. Poleg tega omenjeni senzor pokrbi za dnevne karte stanja vegetacije za celotno zemeljsko oblo. Razmerje vidnega in infrardečega kanala lahko uporabimo za določanje vegetacijskega indeksa NDVI, ki podaja »zelenost«, to je stanje vegetacije (slika 11.2 b, razdelek 17.2).

Kanal	Valovna dolžina (μm)	Spektralni pas	Ločljivost (km)	Uporaba
1	0,6–0,9	vidna svetloba	1	tekstura oblakov, vetrovi
2	0,56–0,71	vidna svetloba	3	oblaki nad kopnim, vetrovi
3	0,74–0,88	vidna svetloba	3	oblaki nad vodo, vegetacija
4	1,50–1,78	bližnja IR	3	oblaki nad snegom
5	3,48–4,36	srednja IR	3	nizki oblaki
6	5,35–7,15	daljna IR	3	visoka vodna para
7	6,85–7,85	daljna IR	3	srednja vodna para
8	8,30–9,10	daljna IR	3	skupna visoka vodna para
9	9,38–9,94	daljna IR	3	skupno ozon
10	9,80–11,80	daljna IR	3	temperatura vrhov površinskih oblakov
11	11,00–13,00	daljna IR	3	temperatura površja, popravki
12	12,40–13,40	daljna IR	3	visoki oblaki

Tabela 11.4: Kanali senzorja SEVIRI na satelitih Meteosat.

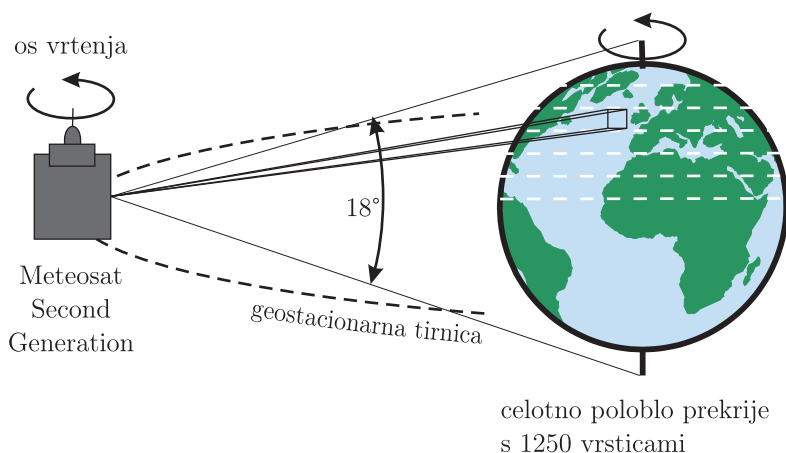
11.1.3 Meteosat

Meteosat je v naših krajih dobro poznan vremenski satelit, ki ga skupaj upravljajo številne evropske države, njegove podatke pa uporabljamo za napovedovanje vremena tudi v Sloveniji. Sateliti so rezultat razvoja Evropske vesoljske agencije (European Space Agency, ESA), ki se je začel že leta 1972 na pobudo Francije. Prvi satelit iz skupine Meteosat so izstrelili leta 1977, uspešno pa je deloval nekaj let. Drugi satelit mu je sledil leta 1981, nato pa novi vsakih nekaj let, do satelita Meteosat-7, ki so ga izstrelili leta 1997. Uspešen niz satelitov nadaljuje *MSG-1* (Meteosat Second Generation), ki je bil z raketo Ariane-5 izstreljen 29. avgusta 2002 iz Kourouja v Francoski Gvajani.

Vsi sateliti Meteosat so geostacionarni, in sicer krožijo okrog Zemlje v ravnini ekvatorja tako, da so ves čas približno nad Evropo na višini približno 36 000 km. *MSG-1* se nahaja v tirnici, ki je na položaju 0° . Satelit ustvarja podobe celotne zemeljske poloble in je uporaben za opazovanje vremena nad Afriko, Evropo in Atlantikom.

Najpomembnejši senzor na satelitu je *SEVIRI* (Spinning Enhanced Visible and Infra Red Imager), ki ima 12 spektralnih kanalov (tabela 11.4). Visokoločljivi vidni kanal, ki je podoben kot pri satelitih prve generacije Meteosat, ima prostorsko ločljivostjo približno 1 km, vsi ostali kanali pa 3 km. Trije vidni in bližnji infrardeči kanali satelita ustrezajo lastnostim senzorja AVHRR na satelitih NOAA. Poleg tega ima *SEVIRI* še osem kanalov v srednjem in termičnem delu infrardečega spektra, ki so namenjeni merjenju temperature oblakov in površja ter koncentracije vodne pare v ozračju.

Senzor posname Zemljo s kombinacijo vrtenja satelita in gibanja zrcala, kot prika-



Slika 11.3: Način snemanja s sistemom Meteosat.

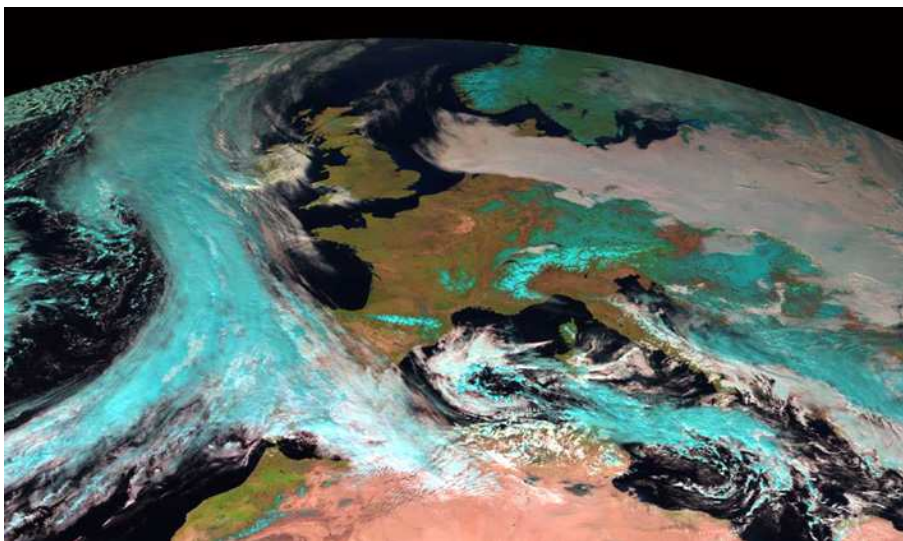
zuje slika 11.3. Satelit se vrti s hitrostjo sto obratov na minuto okrog svoje osi, ki je pravokotna na ravnino gibanja satelita, to je praviloma v smeri sever-jug. Snemalni mehanizem poskrbi za počasno premikanje usmerjevalnega zrcala v smeri od juga proti severu. Slednje se z vsakim premikom premakne za 125,8 μ rad in s približno 1250 vrsticami posname celotno zemeljsko poloblo. Ciklus snemanja traja približno 12 min, nato pa se zrcalo vrne v prvotni položaj, posebni mehanizem pa poskrbi za kalibracijo senzorjev. Po petnajstih minutah satelit prične z zajemom nove podobe. Relativno kratek čas med zaporednimi snemanji omogoča spremljanje vremenskega dogajanja v realnem času in s tem njegovo napovedovanje.

Meteosat lahko podatke pošlje uporabnikom, ki se nahajajo kjer koli znotraj njegovega vidnega polja. Prenos lahko poteka v dveh oblikah, in sicer *LRIT* (Low Rate Information Transmission) in *HRIT* (High Rate Information Transmission). Podatki senzorja SEVIRI so vključeni v obeh načinih prenosa, vendar le *HRIT* poskrbi za podobe polne ločljivosti. *LRIT* poleg informacij satelita Meteosat prenaša tudi podatke drugih vremenskih satelitov, to je ameriških GOES (zahodni Atlantik in vzhodni Pacifik), japonskega GMS (zahodni Pacifik) in ruskega GOMS (Indijski ocean).

Slika 11.4 prikazuje posnetek Evrope, ki ga je 18. februarja 2003 naredil MSG-1. Lažno barvna podoba je sestavljena iz bližnjega infrardečega kanala (1,6 μ m) v rdeči barvi ter dveh vidnih kanalov (0,8 μ m in 0,6 μ m) v zeleni in modri. Turkizna barva predstavlja sneg in oblake s kristali vode, v belih oblakih je voda tekoča. Vegetacija na površju je zelena zaradi absorpcije v vidnem delu spektra, peščene in kamnite površine pa so v rožnati barvi.

11.2 Sateliti za opazovanje kopnih površin

Razvoj opazovanja Zemlje je pospešil uspeh prvih vremenskih satelitov sredi šestdesetih let prejšnjega stoletja. Veliko vremenskih satelitov, na primer NOAA AVHRR (razdelek 11.1.2), lahko uporabimo tudi za opazovanje zemeljskega površja. Kljub temu pa tovrstni sateliti niso prirejeni za natančno kartiranje zemeljske površine, zato obstaja cela skupina satelitov s senzorji, posebej primernimi za opazovanje kopnih površin.



Slika 11.4: Posnetek Evrope, ki ga je 18. februarja 2003 ustvaril MSG-1.

11.2.1 Landsat

Leta 1972 je NASA izstrelila *ERTS-1* (Earth Resources Technology Satellite), prvi satelit, ki je bil namenjen izključno opazovanju kopnih površin. Satelit se je kasneje preimenoval v *Landsat 1*. Landsat je bil preizkus pridobivanja večspektralnih podatkov o Zemlji iz satelitske platforme brez človeške posadke (slika 11.5). Od leta 1972 je bilo v okviru izredno uspešnega programa zbranih ogromno podatkov, ki so jih zajeli različni sateliti Landsat. Program je na začetku vodila NASA, leta 1983 pa ga je prevzela NOAA. Dve leti kasneje so ga komercializirali in tako ponudili podatke za najrazličnejše civilne in raziskovalne aplikacije.

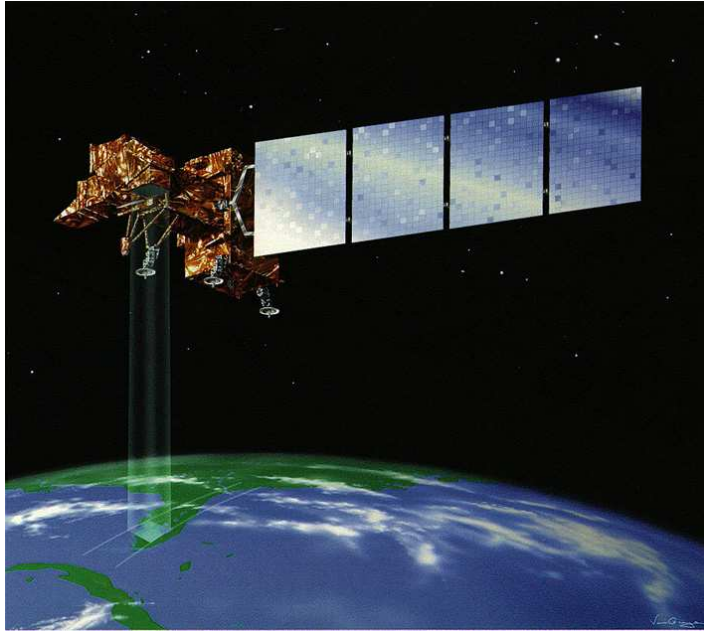
Landsat je uspel zaradi različnih razlogov. Omenimo le najpomembnejše:

- zanimiva kombinacija senzorjev s kanali, ki so posebej primerni za opazovanje Zemlje,
- dobra prostorska ločljivost,
- odlična pokritost površja (širna pasu snemanja in čas ponovnega snemanja) in
- obsežen, več kot tridesetleten arhiv posnetkov.

Dolžina trajanja programa (tabela 11.5) je poskrbela za ogromen arhiv razpoložljivih posnetkov, ki omogočajo veččasovna opazovanja in »zgodovinske« primerjave. Vsi sateliti Landsat se nahajajo v skoraj polarnih, sončno sinhronih tirnicah. Prvi trije sateliti (Landsat 1 do 3) so krožili okrog Zemlje na višini približno 900 km, s časom ponovnega obiska 18 dni. Vsi naslednji sateliti pa letijo (oziroma so leteli) nižje, in sicer na višini približno 700 km, njihov čas ponovnega obiska pa je 16 dni. Ekvator prečkajo dopoldne, s čimer skušajo doseči najbolj ugodne razmere za snemanje.

Sateliti so bili opremljeni z različnimi senzorji, po vrsti so to:

- Return Beam Vidicon (RBV),
- MultiSpectral Scanner (MSS),



Slika 11.5: Satelit Landsat 7 pri opazovanju Zemlje.

<i>Satelit</i>	<i>Datum izstrelitve</i>	<i>Konec delovanja</i>
Landsat 1	23. julij 1972	1978
Landsat 2	22. januar 1975	1981
Landsat 3	5. marec 1978	1983
Landsat 4	16. julij 1982	1993
Landsat 5	1. marec 1984	še delujoč
Landsat 6	5. oktober 1993	ni dosegel tirnice
Landsat 7	15. april 1999	še delujoč, leta 2003 okvara korektorja snemalnih vrstic
Landsat 8	predvidoma 2010	

Tabela 11.5: Kronologija izstrelitev satelitov Landsat.

- Thematic Mapper (TM) in
- Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+).

Najbolj priljubljeni instrument v prvih dneh Landsata je bil MultiSpectral Scanner (MSS), kasneje pa Thematic Mapper (TM), ki je na najnovejšem Landsatu 7 v izpopolnjeni različici Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Tako MSS kot TM sta prečna skenerja (razdelek 8.2.1), ki podatke zajemata v pasu, širokem 185 km, pri čemer je polna scena velika 185 km krat 185 km.

Skener MSS je zajemal elektromagnetno valovanje, odbito z zemeljske površine v

štirih kanalih. V vsakem izmed njih je imel prostorsko ločljivost 60 krat 80 m in 6-bitno radiometrično ločljivost (zapisal je torej lahko 64 sivih vrednosti). Snemanje je opravljala vrstična naprava z vrtečim zrcalom. Sistem je v vsakem prehodu zrcala v smeri vzhod–zahod hkrati zajel šest vrstic. Kanale in valovne dolžine skenerja MSS prikazuje tabela 11.6.

<i>Kanal</i>		<i>Valovna dolžina (μm)</i>	<i>Spektralni pas</i>
<i>Landsat 1, 2, 3</i>	<i>Landsat 4, 5</i>		
MSS 4	MSS 1	0,5–0,6	zelena
MSS 5	MSS 2	0,6–0,7	rdeča
MSS 6	MSS 3	0,7–0,8	bližnja IR
MSS 7	MSS 4	0,8–1,1	bližnja IR

Tabela 11.6: Kanali senzorja MSS na satelitih Landsat.

Rutinsko zajemanje podatkov s senzorjem MSS se je končalo leta 1992. Senzor TM, ki so ga vpeljali s satelitom Landsat 4 in nadgradili z Landsatom 7, je namreč nasledil in v celoti nadomestil MSS. Thematic Mapper ima kar nekaj prednosti v primerjavi s starejšim MultiSpectral Scannerjem. Glavne med njimi so:

- boljša prostorska ločljivost,
- natančnejša radiometrična ločljivost,
- ožji kanali,
- sedem za razliko od štirih kanalov in
- večje število senzorjev na kanal.

Senzor TM hkrati zajame šestnajst vrstic za vsak netermični kanal (v termičnem pa štiri). Pri tem uporablja nihajoče zrcalo, ki snemanje opravlja v obeh smereh, to je tako pri poti od vzhoda proti zahodu kot tudi v obratni smeri, pri tem zajema hkrati 16 vrstic za netermične kanale. Prav v snemanju v obeh smereh se TM razlikuje od senzorja MSS in ta razlika omogoča daljši *čakalni čas* (ali čas opazovanja istega območja). Slednji vpliva na boljše geometrične in radiometrične lastnosti podob (poglavje 8.2). Prostorska ločljivost senzorja TM je 30 m za vse kanale razen termičnega, v katerem je slednja nekoliko slabša, in sicer 120 m. Vrednosti vseh kanalov so podane v razponu med 0 in 255, čemur ustreza 8-bitna radiometrična ločljivost. Spektralne in prostorske značilnosti, skupaj z nameni uporabe, podaja tabela 11.7.

Najnovejši satelit iz skupine, to je Landsat 7, ima nekoliko izboljšan skener ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Senzor ima vse kanale svojega predhodnika, poleg tega pa tudi pankromatski kanal z ločljivostjo 15 m. Pankromatski kanal pokriva valovne dolžine med 0,52 in 0,90 μm , čemur ustreza zelena, rdeča in bližnja infrardeča svetloba. Izboljšana je prostorska ločljivost termičnega kanala na senzorju ETM+, in sicer na 60 m.

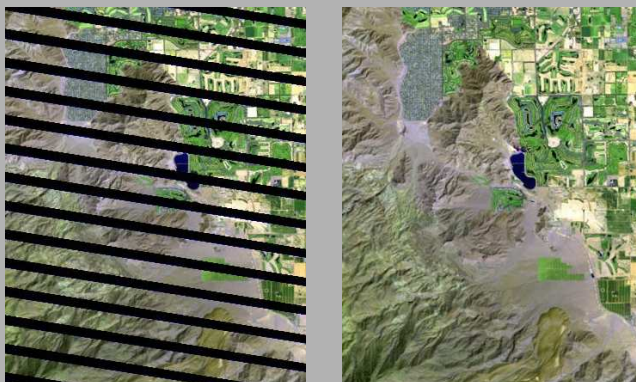
Podatke senzorjev ETM+, TM in MSS uporabljamo v najrazličnejših aplikacijah, od upravljanja z naravnimi viri, prek kartiranja, opazovanja okolja do zaznavanja sprememb (na primer gozdov, kmetijskih in urbanih površin, poplav, požarov, nahajališč mineralnih surovin ...). Arhivi posnetkov Landsat so obsežni in le manjši delež posnetkov je bil do sedaj izkoriščen. Slika 11.6 prikazuje delto reke Geba v Gvineji Bissau. Na sliki je lepo viden vzorec, ki ga ustvarja mešanje morske in rečne vode, bogate z rudninskimi snovmi.

<i>Kanal</i>	<i>Valovna dolžina (μm)</i>	<i>Spektralni pas</i>	<i>Ločljivost (m)</i>		<i>Uporaba</i>
			TM	ETM+	
TM 1	0,45–0,52	modra	30	30	ločevanje prsti in vegetacije; merjenje globine voda in kartiranje obal
TM 2	0,52–0,60	zelena	30	30	kartiranje zelene vegetacije (meri vrh odboja)
TM 3	0,63–0,69	rdeča	30	30	ločevanje vegetacije in nevegetacije, prepoznavanje posameznih vrst rastlin (absorpcija klorofila)
TM 4	0,76–0,90	bližnja IR	30	30	določanje vrst rastlin, zdravosti in količine biomase; označevanje vodnih teles; merjenje vlage
TM 5	1,55–1,75	bližnja IR	30	30	merjenje vlage v prsti in vegetaciji; ločevanje snega in oblakov
TM 6	10,4–12,5	termična IR	120	60	termično kartiranje (urbane in vodne površine); stanje vegetacije, določanje vlažnosti prsti v povezavi s termičnim sevanjem
TM 7	2,08–2,35	bližnja IR	30	30	določanje mineralov in tipov kamnin; merjenje vlažnosti vegetacije
PAN	0,52–0,90	pankromatsko	/	15	izboljšanje ločljivosti; prepoznavanje vegetacije

Tabela 11.7: Kanali senzorjev TM in ETM+ na satelitih Landsat.

Okvara v delovanju senzorja ETM+

Maja leta 2003 je senzor ETM+ na satelitu Landsat 7 doživel okvaro v delovanju sistema za kompenzacijo snemalnih vrstic (razdelek 8.2.1). Zaradi nedeľujoče korekcije se snemalne vrstice prekrivajo na sredini in imajo velike vrzeli na robovih podobe.



Manjkajočih podatkov ni mogoče nadomestiti, mogoče pa je spremeniti algoritme obdelave in ohraniti skoraj 80 % pikslov. Analize so pokazale, da je mogoče doseči geometrijsko in radiometrično dobre podobe in s primerno interpolacijo celo zapolniti manjkajoče dele. Seveda pa interpolacija ne nadomesti pravih vrednosti in je primerna le za določene namene.

11.2.2 SPOT

SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre) je skupina satelitov za opazovanje Zemlje, ki jo je pripravil in izstrelil francoski Centre National d'Études Spatiales (CNES), z njimi pa upravlja podjetje Spot Image (slika 11.7). Pri razvoju satelita so jim pomagali strokovnjaki iz Švedske in Belgije. Prvi satelit iz skupine, to je SPOT 1, so izstrelili leta 1986, temu pa so vsake tri do štiri leta sledili nasledniki. Zadnji – SPOT 5 – je bil izstreljen 3. maja 2002.

Vsi sateliti krožijo okrog Zemlje na višini 822 km v sončno sinhronih skoraj polarnih tirnicah. Višina leta določa čas ponovnega obiska, ki znaša 26 dni. Sateliti prečkajo ekvator približno ob pol enajstih dopoldne po krajevnem sončnem času. SPOT je bil eden prvih sistemov, ki je uporabil tehniko snemanja površja z vzdolžnim skenerjem (razdelek 8.2.2), poleg tega pa je bil med prvimi komercialnimi satelitskimi sistemi.

Vsak od satelitov SPOT ima dva senzorja, ki vsak zase ali skupaj opazujeta površje bodisi v pankromatskem načinu z visoko ločljivostjo oziroma v večspektralnem načinu z nekoliko slabšo ločljivostjo. Sateliti SPOT imajo po vrsti naslednje senzorje:

- HRV (High Resolution Visible, SPOT 1 do 3),
- HRVIR (High Resolution Visible and Infrared, SPOT 4) in
- HRG (High Resolution Geometry, SPOT 5).

Pri satelitih SPOT 1 do 3 je so bili večspektralni kanali trije, medtem ko so pri novejših satelitih SPOT 4 in 5 štirje. Najnovejši satelit ima poleg tega izboljšano prostorsko ločljivost, saj lahko pankromatske podobe ustvari z ločljivostjo 5 oziroma 2,5 m.



Slika 11.6: Delta reke Geba v Gvineji Bissau, ki jo je 12. februarja 2000 posnel satelit Landsat 7. V rdeči, zeleni in modri barvi so prikazani infrardeči, rdeči in modri kanal (4, 3 in 1).

Vsak od vzdolžnih senzorjev je sestavljen iz štirih (oziroma petih) vrstic detektorjev. Ena izmed njih ima 6000 elementov, namenjena pa je pankromatskemu snemanju z ločljivostjo 10 m. Tri oziroma štiri vrstice s po 3000 elementi pa snemajo večspektralne kanale z ločljivostjo 20 m. Pri satelitu SPOT 5 ima pankromatski detektor 12 000 elementov, večspektralni pa 6000, čemur ustrežata prostorska ločljivost 5 oziroma 10 m. S posebnim skupnim delovanjem obeh senzorjev lahko najnovejši SPOT ustvari podobe ločljivosti 2,5 m. Pri tem oba senzorja opazujeta isti del površja, centri njunih pikslov pa so zamaknjeni za polovico. Z interpolacijo obeh podob dobimo podobo z večjo ločljivostjo. Če je instrument usmerjen proti nadirju, je pas snemanja pri obeh instrumentih enak 60 km. Tabela 11.8 prikazuje spektralne lastnosti različnih načinov snemanja na satelitih SPOT.

Kot gledanja senzorjev lahko spremenimo, tako da so njegovi pogledi usmerjeni na eno ali drugo stran nadirja (slika 11.8 a). S tako imenovanim *stranskim gledanjem* lahko precej zmanjšamo čas ponovnega snemanja, to je čas, ko satelit lahko zaporedoma opazuje isto območje. Senzorje na satelitih SPOT lahko zasukamo do 27° od nadirja, tako da lahko satelit opazuje območje kjer koli v pasu širine 950 km.

Ko senzor usmerjamo proč od nadirja, postane pas snemanja širši. Medtem ko je pri snemanju neposredno pod satelitom širok 60 km, je v skrajnih legah kar 80 km. Z



Slika 11.7: Satelit SPOT.

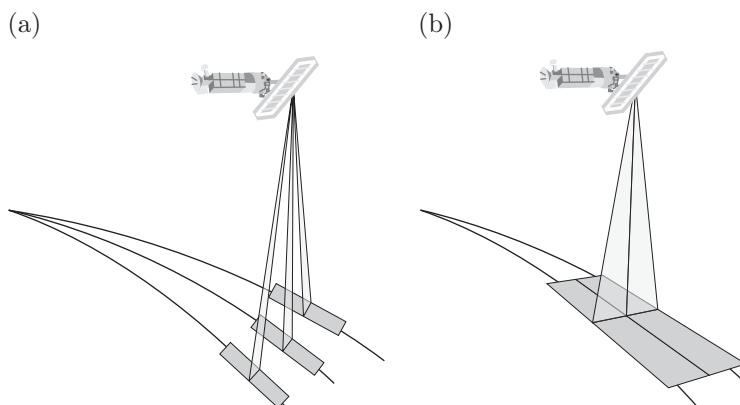
obračanjem senzorjev torej zmanjšamo čas med snemanji istih območij, poleg tega pa lahko ustvarimo tudi tako imenovane stereoskopske pare posnetkov. S snemanjem istega dela površja iz različnih zornih kotov, lahko podobe opazujemo in analiziramo v treh razsežnostih, kar je še posebej pripravno pri študijah površja, kartiranju in simulacijah terena.

Možnost obračanja senzorjev poveča frekvenco ponovnega snemanja v ekvatorialnem pasu na tri dni (sedemkrat v 26 dneh). Zaradi zbliževanja tirnic na polih lahko kraje na geografski širini 45° opazujemo še pogosteje (11 krat v 26 dneh). Če oba senzorja usmerimo tako, da opazujeta sosednja pasova v nadirju, lahko naenkrat snemamo pas širine 117 km (3 km je prekrivanja pasov, slika 11.8 b). S takim načinom lahko zajemamo bodisi pankromatske ali večspektralne podatke, ne pa obojih hkrati.

Najnovejši satelit iz skupine, SPOT 5, je opremljen tudi s posebnim senzorjem HRS (High Resolution Stereoscopic), ki ustvarja pare stereo podob. Pri tem uporablja zanimivo metodo, ki celoten stereopar posname v približno treh minutah. HRS je opremljen z dvema teleskopoma – prvi je usmerjen 20° (glede na nadir) v smeri leta, drugi pa 20° nasproti smeri leta. Satelit najprej posname podobo s prvim teleskopom, po 90 s pa še podobo z drugim teleskopom. Tako sočasno nastane idealen stereopar, saj sta podobi narejeni skoraj hkrati z istim senzorjem ter se skoraj v celoti prekrivata. Če so v času snemanja idealni meteorološki pogoji, lahko s primerno obdelavo pridobimo zelo natančen model višin. HRS stereopar pokriva območje velikosti 600 krat 120 km (72000 km^2). V nekaj letih delovanja je SPOT 5 pridobil arhiv stereoparov in iz njih

<i>Satelit</i>	<i>Kanal</i>	<i>Valovna dolžina (μm)</i>	<i>Spektralni pas</i>	<i>Ločljivost (m)</i>
SPOT 1 do 3	P	0,50–0,73	pankromatsko	10
	B1	0,50–0,59	zelena	20
	B2	0,61–0,68	rdeča	20
	B3	0,78–0,89	bližnja IR	20
SPOT 4	P	0,61–0,68	pankromatsko	10
	B1	0,50–0,59	zelena	20
	B2	0,61–0,68	rdeča	20
	B3	0,78–0,89	bližnja IR	20
	B4	1,58–1,75	srednja IR	20
SPOT 5	P	0,48–0,71	pankromatsko	5 ali 2,5
	B1	0,50–0,59	zelena	10
	B2	0,61–0,68	rdeča	10
	B3	0,78–0,89	bližnja IR	10
	B4	1,58–1,75	srednja IR	20

Tabela 11.8: Kanali senzorja HRV na satelitih SPOT.



Slika 11.8: Stranski pogledi (a) in sosednje gledanje (b) pri satelitu SPOT.

izdelanih DMV, ki pokriva več kot 100 milijonov kvadratnih kilometrov.

SPOT ima nekaj prednosti v primerjavi z drugimi optičnimi senzorji. Za njegovo priljubljenost sta še posebej pomembni dobra prostorska ločljivost in zmožnost usmerjanja senzorjev. Tri ali po novem štirikanalne podatke lahko tudi »izostrimo« z upoštevanjem pankromatskega kanala, kar je uveljavljena tehnika pri vseh sistemih, ki zajemajo podatke pankromatsko z večjo ločljivostjo. S sistemi SPOT lahko opravljamo študije, ki zahtevajo visoko ločljivost, na primer opazovanje urbanih površin, in sistematična snemanja. Poleg tega lahko njegove posnetke uporabljamo v aplikacijah, ki zahtevajo pogosto opazovanje, na primer v kmetijstvu (slika 11.9) in gozdarstvu. Pomembno vlogo pri kartiranju in pridobivanju topografskih informacij (digitalnih modelov višin) imajo tudi stereoskopski posnetki SPOT. Upoštevati moramo tudi obsežen arhiv podatkov, saj sateliti zemeljsko površje opazujejo že od leta 1986.



Slika 11.9: Opazovanje krožnih namakalnih polj v Saudovi Arabiji s satelitom SPOT. Podobo je 17. maja 1992 posnel satelit SPOT 1.

11.2.3 IKONOS

Satelit *IKONOS* je prvi visokoločljivi civilni satelit za opazovanje zemeljskega površja. Iz letalskega oporišča Vandenberg v Kaliforniji ga je septembra 1999 izstrelila raketa Athena II. Satelit ima pankromatsko ločljivost 1 m in večspektralno 4 m. Oba podatka veljata pri naklonu 26° od nadirja.

IKONOS leti s hitrostjo 7 km/s na višini 681 km, kar je nekoliko nižje kot, na primer, Landsat. Njegova tirnica je sončno sinhrona skoraj polarna, z naklonom $98,1^\circ$. Satelit prečka ekvator v spuščajočem letu ob pol enajstih dopoldne po krajevnem času. IKONOS uporablja prečni skener (razdelek 8.2.1), ki pa ga lahko usmerimo proč od nadirja. Čas ponovnega snemanja zato znaša na geografski širini 40° skoraj tri dni pri ločljivosti 1 m oziroma dan in pol pri snemanju pod večjimi koti, kjer znaša ločljivost 1,5 m.

Satelit ustvarja posnetke v pasu širine 11 km, ki so lahko veliki od 11 krat 11 km do 11 krat 1000 km. Poleg tega ponudniki posnetkov ponujajo brezšivne mozaike večjih območij. Za IKONOS je značilno naročanje podatkov na kvadratni kilometer in ne na posnetek (sceno), določimo pa lahko celo ploskev nepravilne oblike. Zagotovljena položajna natančnost podob je 12 m vodoravno in 10 m navpično brez kontrolnih točk. S kontrolnimi točkami in uporabo modela višin, ki ju zagotovi naročnik, pa dosegajo



Slika 11.10: Pankromatski posnetek piramid v Gizi, ki ga je 17. novembra 1999 zajel satelit IKONOS.

<i>Kanal</i>	<i>Valovna dolžina (μm)</i>	<i>Spektralni pas</i>
1	0,45–0,52	modra
2	0,52–0,60	zelena
3	0,63–0,69	rdeča
4	0,76–0,90	bližnja IR
PAN	0,45–0,90	pankromatsko

Tabela 11.9: Kanali sistema IKONOS.

podobe natančnost celo 2 m vodoravno in 3 m navpično. To je primerljivo oziroma le nekoliko slabše od natančnosti, ki jo dosegamo pri letalski fotografiji.

Poleg zelo natančnega pankromatskega kanala, ki podatke zajema pri valovnih dolžinah med 0,45 in 0,90 μm , ima IKONOS tudi štiri multispektralne kanale. Ti povsem ustrezajo prvim štirim kanalom senzorjev Landsat TM in ETM+ (tabela 11.9). Z njimi zajema elektromagnetno valovanje pri modri, zeleni, rdeči in infrardeči svetlobi. Za razliko od senzorja ETM+, pankromatski kanal v celoti pokriva multispektralne. Radiometrična ločljivost sistema IKONOS je 11 bitov, kar pomeni, da lahko loči 2048 vrednosti v vsakem kanalu.

Prvotni lastnik satelita je bil Space Imaging, ki pa ga je leta 2006 kupil Orbimage. Z združitvijo obeh je nastalo podjetje GeoEye, ki poleg satelita IKONOS upravlja še nekaj visokoločljivih satelitov, na primer OrbView-3, ki ima skoraj enake lastnosti kot IKONOS. Možnosti uporabe podob satelita IKONOS je veliko. Z njimi lahko izvajamo natančno kartiranje, ustvarjamo posnetke ortofoto in jih uporabljamo pri različnih analizah okolja. Ne nazadnje so podobe postale zelo priljubljene tudi v elektronskih in tiskanih medijih (slika 11.10).

11.2.4 QuickBird

Trenutno najbolj natančen sistem za opazovanje Zemlje je *QuickBird*, satelit podjetja DigitalGlobe, ki so ga z raketo Delta II izstrelili oktobra leta 2001 iz letalskega oporišča Vandenberg v Kaliforniji. Satelit se nahaja v sončno sinhroni skoraj polarni tirnici z naklonom 98° na višini 450 km. To je precej nižje od ostalih sistemov za opazovanje Zemlje, kar QuickBirdu omogoča doseganje večje ločljivosti.

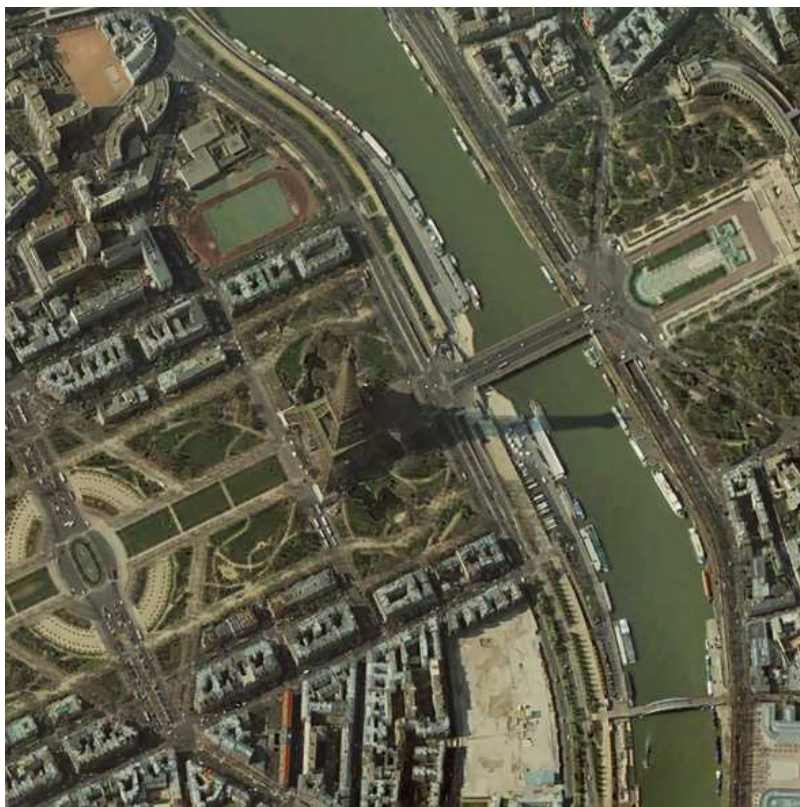
Kanal	Valovna dolžina (μm)	Spektralni pas
1	0,45–0,52	modra
2	0,52–0,60	zelena
3	0,63–0,69	rdeča
4	0,76–0,90	bližnja IR
PAN	0,45–0,90	pankromatsko

Tabela 11.10: Kanali sistema QuickBird.

Tudi QuickBird uporablja prečni skener (razdelek 8.2.1), ki ga je mogoče zasusati. Zemljo opazuje v enakih spektralnih kanalih kot IKONOS in deloma Landsat (tabela 11.10). Ločljivost v pankromatskem kanalu znaša od 61 cm v nadirju do 72 cm pri naklonu 25° . Štirje multispektralni kanali pa podatke zajemajo z ločljivostjo med 2,44 m in 2,88 m. Velikost posnetkov je prav tako odvisna od kota gledanja in znaša od približno 16 km v nadirju do 20 km pri naklonu 25° . Satelit ima, tako kot IKONOS, radiometrično ločljivost 11 bitov, čemur ustreza 2048 sivih vrednosti.

Zelo pomembna lastnost satelita QuickBird je javna objava podatkov o snemalnem sistemu. Posnetki so namreč opremljeni s podatki o letu satelita in optičnih lastnostih senzorja, in sicer v obliki, berljivi z vsemi pomembnejšimi programi za obdelavo podob. To omogoča hitro in preprosto izdelavo posnetkov ortofoto, poleg tega pa tudi izdelavo digitalnih modelov višin.

Podobe QuickBirda je mogoče uporabiti v številnih aplikacijah, od upravljanja z zemljišči, infrastrukturo in naravnimi viri prek opazovanja sprememb v mikro okolju, vse do posodabljanja kart velikega merila (slika 11.11). Satelit zajema podatke v precej širokem pasu, kar omogoča pridobivanje podatkov na relativno velikih površinah. Pomembno je tudi dejstvo, da je QuickBird prvi iz vrste satelitov, ki jih nameravajo v podjetju DigitalGlobe izstreliti v naslednjih letih – s sistemoma WorldView I in II bodo dosegli prostorsko ločljivost pol metra pankromatsko in približno dva metra večspektralno.



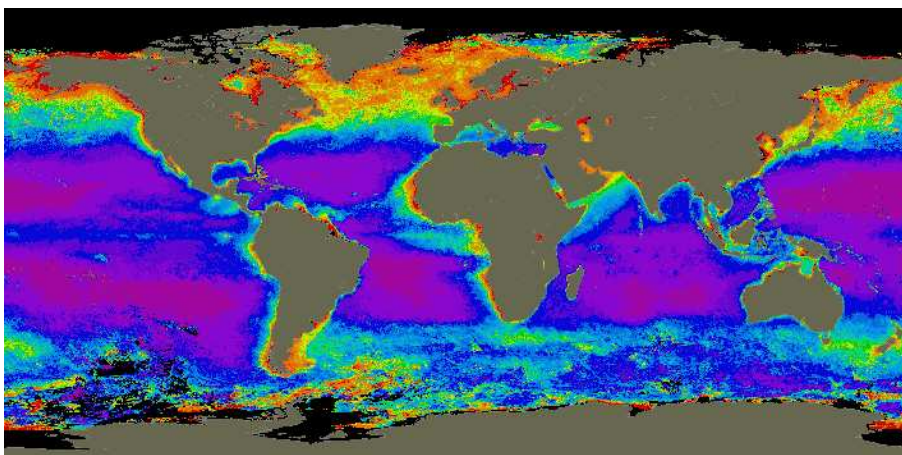
Slika 11.11: Podoba Eifflovega stolpa, ki jo je 27. marca 2002 zajel QuickBird.

11.3 Sateliti za opazovanje morja

Oceani prekrivajo več kot dve tretjini zemeljske površine in imajo pomembno vlogo v globalnem klimatskem sistemu. Poleg tega vsebujejo ogromno živih organizmov in naravnih virov, ki so občutljivi na onesnaženje in druge vplive. Meteorološke satelite in satelite za opazovanje kopnega, o katerih smo govorili v razdelkih 11.1 in 11.2, lahko uporabimo tudi za opazovanje oceanov na našem planetu. Vendar obstaja kar nekaj sistemov, ki so v prvi vrsti namenjeni opazovanju morja. Sateliti za opazovanje oceanov so pomembni za globalno in regionalno opazovanje onesnaženosti morja in njegove »zdravosti«. Hkrati pomagajo znanstvenikom pri razumevanju vpliva oceanov na globalni klimatski sistem.

Satelit Nimbus-7, izstreljen leta 1978, je imel senzor *Coastal Zone Colour Scanner* (CZCS), prvi senzor, namenjen samo opazovanju oceanov in drugih vodnih površin. Glavni namen CZCS je bilo opazovanje barve in temperature oceanov, predvsem v obalnih predelih ter zaznavanje onesnaževalcev v zgornjih plasteh vode. Poleg tega je sistem lahko določal naravo materialov, raztopljenih v vodi. Nimbus je okrog Zemlje krožil v sončno sinhroni skoraj polarni tirnici, na višini približno 955 km. Satelit je deloval do leta 1994, njegove podatke pa uporabljajo še danes.

Senzor CZCS je imel šest spektralnih pasov v vidnem, bližnjem infrardečem in termičnem infrardečem delu spektra. Njegovi kanali so bili zelo ozki, ker je bil optimiziran



Slika 11.12: Koncentracija fitoplanktona, kot jo izmeril senzor CZCS v obdobju med novembrom 1978 in junijem 1986. Podoba je pridobljena iz približno 66 000 posameznih meritev, ki so trajale dve minuti.

za zaznavanje majhnih razlik pri odbojnosti vode. Te so namreč posledica različnih koncentracij fitoplanktona in drugih v vodi raztopljenih delcev (slika 11.12).

11.3.1 SeaWiFS

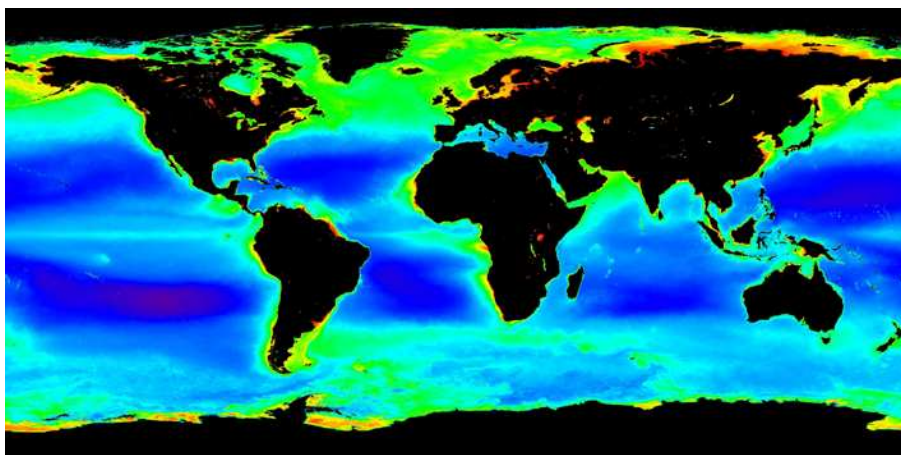
Kanal	Valovna dolžina (μm)
1	0,40–0,42
2	0,43–0,45
3	0,48–0,50
4	0,50–0,52
5	0,55–0,57
6	0,66–0,68
7	0,75–0,79
8	0,85–0,89

Tabela 11.11: Kanali sistema SeaWiFS.

Senzor *SeaWiFS* (Sea-viewing Wide-Field-of View Sensor) na satelitu SeaStar je trenutno najbolj napreden sistem, namenjen opazovanju oceanov. SeaWiFS ima osem kanalov, ki zajemajo zelo ozke pasove valovnih dolžin (tabela 11.11). Sistem je zmožen opazovanja točno določenih pojavov v oceanih, med drugim zaznavanja proizvodnje fitoplanktona v oceanih, vpliva oceanov na klimo (hranjenja toplote in tvorjenja aerosolov) ter opazovanja kroženja ogljika, žvepla in dušika.

Satelit SeaStar leti na višini približno 705 km in lahko opazuje površje Zemlje v dveh ločljivostih. Prva pri pasu snemanja širine 2800 km znaša 1,1 km v nadirju, druga 4,5 km pri pasu 1500 km.

SeaWiFS omogoča opazovanje vpliva fizikalnega in kemičnega dogajanja v oceanih na biološke spremembe. Sistem je omogočil ne le kratkotrajno prostorsko in časovno



Slika 11.13: Povprečna koncentracija klorofila, ki jo je izmeril sistem SeaWiFS ob izstrelitvi avgusta 1997.

spremljanje, ampak tudi dolgotrajne podatke, s katerimi lahko zaznavamo odzive oceanov na globalne spremembe (slika 11.13).

11.4 Radarski sistemi

Optične sisteme so v zadnjem desetletju prejšnjega stoletja pričeli dopolnjevati tudi radarski (poglavje 9). Pri tem imata vodilno vlogo evropska in kanadska vesoljska agencija s sateliti ERS, Envisat in RADARSAT. Obe agenciji sta radarsko daljinsko zaznavanje postavili v ospredje svojega delovanja in optičnih senzorjev skorajda ne razvijata oziroma uporabljata.

11.4.1 ERS-1 in ERS-2

Julija leta 1991 je Evropska vesoljska agencija (European Space Agency, ESA) izstrelila prvega izmed evropskih satelitov za daljinsko zaznavanje Zemlje – *ERS-1* (European Remote Sensing Satellite), ki mu je leta 1995 sledil še *ERS-2*. *ERS-2* še vedno nemoteno deluje, *ERS-1* pa je zaradi napake v sistemu za kontrolo višine v začetku marca 2000 »iztiril«. Sistem ERS posnetke pridobiva z mikrovalovno tehniko, poleg tega pa lahko z njim opazujemo tudi stanje površine morja, tokove v oceanih, premike ledenikov in podobno. Satelit *ERS-2* – tako kot njegov predhodnik *ERS-1* – kroži na višini približno 770 km. Nad isto točko se pojavi vsakih 35 dni, njegova tirnica pa je skoraj polarna (naklon je $98,5^\circ$). Tirnica *ERS-2* je bila nekaj časa, ko sta satelita delovala v paru, v primerjavi z *ERS-1* premaknjena za trideset minut. Ta precejšnja bližina leta omogoča izdelavo digitalnih modelov višin iz podatkov, dobljenih z obeh satelitov v tako imenovanem tandemskega načinu delovanja.

Satelita *ERS-1* in *2* sta bila skoraj enaka in sta vsebovala tudi zelo podobne senzorje. Na obeh so bili:

- AMI (Active Microwave Instrument), ki je sestavljen iz umetno odprtega radarja in merilnika vetrov,



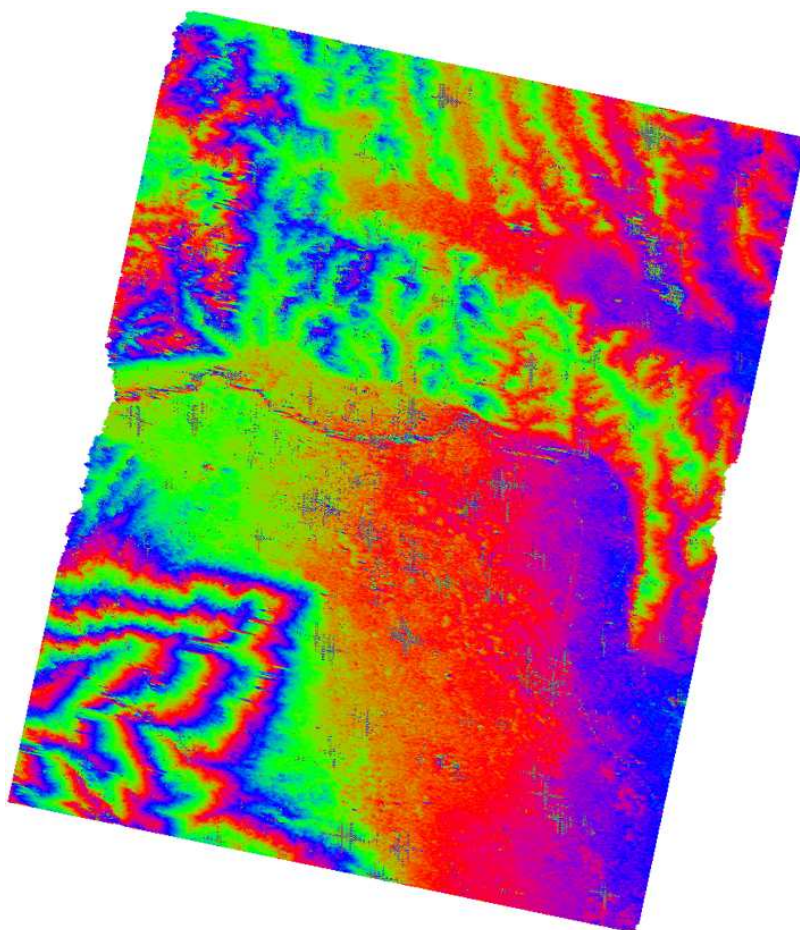
Slika 11.14: Satelit ERS-2 tik pred izstrelitvijo.

- RA (Radar Altimeter),
- ATSR (Along-Track Scanning Radiometer),
- PRARE (Precise Range and Range-Rate Equipment) in
- LRR (Laser Retro-Reflectors).

ERS-2 nosi poleg naštetih tudi instrument za globalno merjenje koncentracije ozona GOME (Global Ozone Monitoring Experiment). Satelit ERS-2 tik pred izstrelitvijo leta 1995 prikazuje slika 11.14.

Aktivni mikrovalovni instrument deluje s frekvenco 5,3 GHz oziroma valovno dolžino 5,6 cm (pas C) in pod povprečnim kotom 23° »slika« 100 km širok pas na Zemlji. Sistem lahko deluje v slikovnem ali v vetrovnem oziroma valovnem načinu. Pri slednjem meri hitrost in smer vetrov nad oceani (v 500 km širokem pasu) ali pa zbira podatke o dolžini in smeri morskih valov (v pasu širine 200 do 300 km). Kadar ERS deluje kot aktivni mikrovalovni instrument, gre za zelo obsežno zbiranje podatkov, zato se ti ne morejo shranjevati v pomnilniku na samem satelitu. Delovanje senzorja AMI je lahko vključeno samo takrat, ko satelit leti nad sprejemno postajo, ki signale zajema neposredno. Oddajanje teh je zaradi velike porabe energije časovno omejeno na deset minut v vsaki tirnici.

Satelitske posnetke ERS uporabljamo, kadar želimo pridobiti informacije v mikrovalovnem delu elektromagnetnega spektra, na primer, če želimo opazovati vlažnost površja. Ker radar skoraj nemoteno prodira skozi oblake, jih lahko uporabimo takrat,



Slika 11.15: Interferogram prikazuje obliko površja in bi ga lahko povezali s plastnicami. Na sliki je prikazano območje Maribora, kjer lahko vidimo bolj ali manj ravno Dravsko polje, ki na robovih počasi preide v vzpetine. Podoba je najbolj »živahna« na območju Pohorja. Enemu barvnemu kolobarju na sliki ustreza višinska sprememba 238 m.

ko optičnih posnetkov ni mogoče uporabiti, na primer ob poplavih in drugih naravnih nesrečah. Posnetki ERS so postali priljubljeni tudi zaradi možnosti interferometrične uporabe, pri kateri s primerjavo dveh ali več posnetkov lahko izdelamo modele višin ali premikov površja (slika 11.15).

11.4.2 Envisat

Envisat (Environmental Satellite) je naslednik satelitov ERS-1 in 2, ki ga je marca 2002 z raketo Ariane 5 izstrelila Evropska vesoljska agencija. Satelit kroži v sončno sinhroni skoraj polarni tirnici na višini 790 km z obhodnim časom približno sto minut in časom ponovnega obiska 35 dni. Envisat je največji in s skupno težo več kot osmih ton tudi eden najtežjih satelitov za opazovanje Zemlje, kar so jih kdaj koli zgradili.

Satelit ima devet instrumentov, ki zbirajo podatke o kopnem, vodi, ledu in atmosferi.

Radarska interferometrija

Radarska interferometrija (InSAR) je razmeroma nova tehnika, s katero lahko iz parov radarskih satelitskih in letalskih posnetkov pridobivamo visokoločljive podatke o zemeljskem površju. Najpomembnejši področji njene uporabe sta izdelava digitalnih modelov višin in opazovanje majhnih premikov, še posebej na območjih, ki so s »klasičnimi« metodami slabo izmerjena. Natančnost, ki jo dosežemo pri izdelavi modelov višin, je približno deset metrov v vodoravni (položaj) in nekaj metrov v navpični (višina) smeri. Zelo uporabna je tudi diferencialna interferometrija, s katero lahko opazujemo premike tal velikostnega reda valovne dolžine uporabljenega radarskega valovanja, kar znaša pri satelitih ERS približno pol centimetra.

Pri interferometriji uporabljamo kompleksne radarske satelitske posnetke, ki poleg podatkov o amplitudi odboja na površju vsebujejo tudi fazo odbitega valovanja. Faza je odvisna od lastnosti opazovane površine in od dolžine poti med oddajno anteno, opazovano površino in sprejemno anteno. V primeru, da imamo posnetka istega območja, ki sta bila narejena iz rahlo premaknjenih tirnic, lahko z upoštevanjem geometrije gledanja določimo zvezo med interferogramom – fazno razliko obeh podob – in višinami na površju. Pri tem moramo paziti, da posnetka ustrezata zahtevam za interferometrično obdelavo, in sicer da sta narejena iz bližnjih tirnic in da se med zajetjema obeh podob ni pretirano spremenila fazna odbojnost oziroma katera od geofizikalnih lastnosti površja.

Podobno lahko pri *diferencialni interferometriji* (DInSAR) z uporabo treh podob določamo majhne relativne premike. Iz treh podob lahko namreč ustvarimo dva interferograma in z njuno primerjavo diferencialni interferogram. Ta je od nič različen samo v primeru, če se je med zajetjem podob znatno spremenila fazna odbojnost oziroma se je premaknilo opazovano površje. Prvi faktor predstavlja motnjo in se mu skušamo izogniti, drugi pa omogoča natančno določanje premikov.

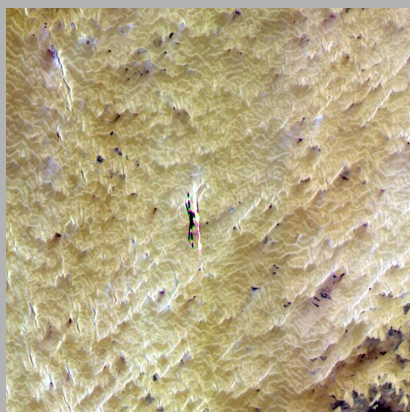
Nadgradnja diferencialne interferometrije je tehnika, ki uporablja *permanentne sipalce* (Permanent Scatterers InSAR ali PSInSAR), to je točke, ki jih zlahka najdemo na več posnetkih in ki ne spreminjajo svojih lastnosti. S tem se izognemo tako imenovani časovni dekorelaciji in lahko opazujemo premike v več zaporednih letih. Žal pa pri tem izgubimo zveznost, saj so tovrstni sipalci točkasti, njihova gostota pa je odvisna od oblike in pokrovnosti površja. Precej preprosto jih namreč najdemo v urbanih območjih, veliko težje pa na območjih, prekritih z vegetacijo.

Teoretične osnove interferometrije poznamo dobri dve desetletji, že več kot petnajst let pa je minilo od prve uspešne interferometrične obdelave. Pravi razcvet je interferometrija doživela po letu 1991, ko so izstrelili prvi evropski satelit za opazovanje Zemlje ERS-1. Od takrat je bila tehnika uporabljena v mnogih študijah, od hidrologije prek vulkanologije in seizmologije do glaciologije in ekologije.

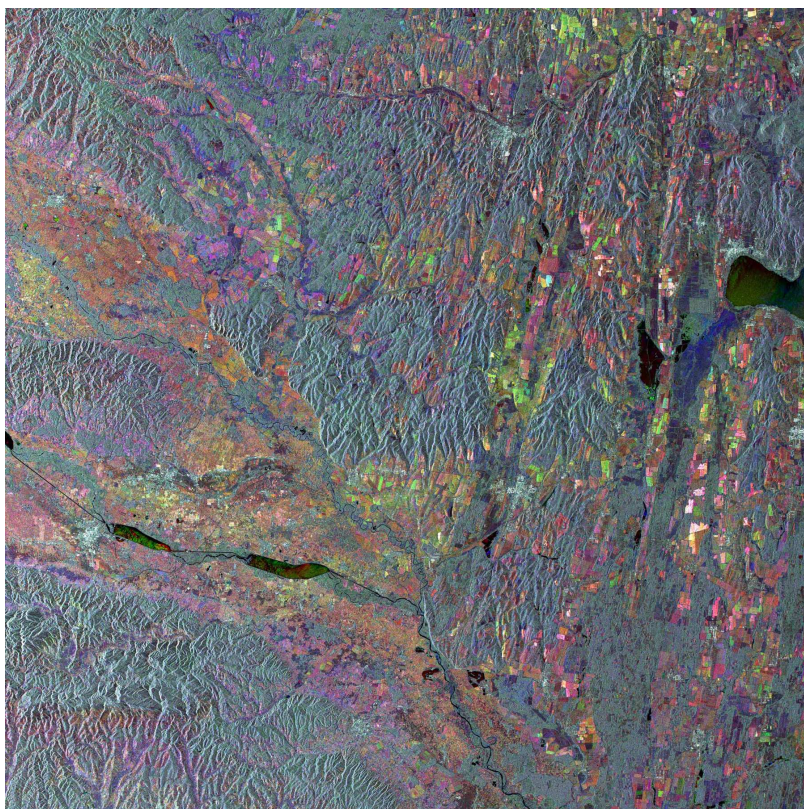
SPOT 4 opazuje ERS-1

Tirnice satelitov, ki letijo na različnih višinah, se občasno križajo. V enem od takih srečanj je SPOT 4 ustvaril podobo satelita ERS-1. Francoski upravljalec satelita (CNES) je z upoštevanjem natančnih podatkov o tirnicah obeh satelitov določil kraj srečanja in 6. maja 1998 ob 9:56 UTC je SPOT 4 nad puščavo Ténéré v Nigerju posnel satelit ERS.

SPOT 4, ki leti na višini 820 km lahko na površju razloči podrobnosti velikosti 10 m. Tirnica satelita ERS-1 je 41 km nižja, kar pomeni, da lahko SPOT razloči podrobnosti velikosti 50 cm na višini ERS-1. Zaradi nižjega leta pa se slednji giblje hitreje, njuna relativna hitrost je približno 250 km/h, zaradi česar je bila surova podoba satelita močno popačena. Z ustrezno obdelavo so obnovili pravo geometrijo in ustvarili pravilno podobo satelita.



Na sliki lahko vidimo obsežne sončne celice na desni strani satelita. Na njegovi levi strani pa je radarska antena, ki meri 10 m krat 1 m, in pod kotom 45° anteni za merjenje hitrosti vetra, velikosti 3,6 m krat 0,25 m. Zelo svetli deli so posledica odboja sončnih žarkov na varovalni oblogi satelita.



Slika 11.16: Veččasovni barvni kompozit posnetkov ASAR, ki zajema vzhodno Slovenijo in Madžarsko. V rdeči, modri in zeleni barvi so prikazane podobe, zajete 4. novembra 2002, 7. julija 2003 in 24. marca 2003.

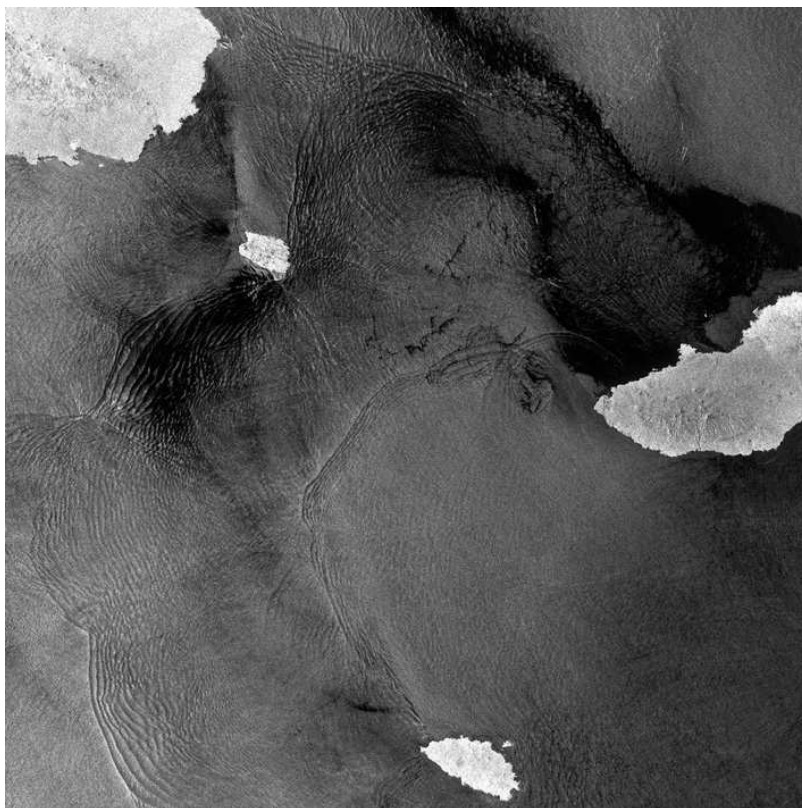
Nekaj izmed njih predstavlja izboljšane različice obstoječih senzorjev, predvsem satelitov ERS, drugi pa so povsem novi. Velika količina različnih instrumentov je predstavljala eno največjih težav pri gradnji in pripravi na izstrelitev. Na satelitu so naslednji senzorji:

- ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar),
- MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer),
- AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer),
- RA-2 (Radar Altimeter 2),
- MWR (Microwave Radiometer),
- DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite),
- GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars),
- MIPAS (Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) in
- SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography).

Izboljšani umetno odprtinski radar ASAR deluje v pasu C (valovna dolžina 5,6 cm) in zagotavlja kontinuiteto snemanje s sistemoma ERS-1 in 2. Senzor ima v najbolj natančnem načinu delovanja prostorsko ločljivost 30 m, deluje pa lahko v petih različnih polarizacijskih načinih. Pomemben instrument je tudi MERIS, večspektralni skener, ki ga je mogoče programirati za opazovanje do petnajstih kanalov v razponu med 390 nm in 1040 m. Od ostalih instrumentov sta zanimiva še višinomer RA-2, ki ima natančnost boljše od 5 cm, in GOMOS, ki omogoča merjenje koncentracije ozona v ozračju in s tem določanje velikosti in položaja ozonske luknje.

11.4.3 RADARSAT

RADARSAT je prvi kanadski satelit za opazovanje Zemlje. Izstrelili so ga leta 1995. Njegova prednost v primerjavi z drugimi radarskimi sateliti je široka paleta posnetkov (različnih načinov snemanja, velikosti in ločljivosti) ter njihova hitra dostopnost (neka ur po zajetju). Njegova tirnica je, tako kot pri večini drugih satelitov za opazovanje zemeljskega površja, sončno sinhrona na višini 798 km. Na vsakem obhodu lahko snema podatke 28 minut, kar ustreza površini več kot milijon kvadratnih kilometrov. Posnetke začasno shranjuje na trakovih in jih na Zemljo pošlje takrat, ko leti nad sprejemno postajo.



Slika 11.17: Posnetek satelita RADARSAT, ki prikazuje naftni madež v bližini otočja Galapagos. Podoba je nastala 21. januarja 2001, štiri dni po nesreči tankerja Jessica.

Kanadski radarski satelit je opremljen z umetno odprtinskim radarjem, ki deluje v pasu C pri eni sami frekvenci (5,3 GHz, valovna dolžina 5,6 cm). Kot gledanja zemeljskega površja lahko spreminjajo, in sicer od malo manj kot 20 do več kot 50°. Z različnimi žarki lahko posname naenkrat pas širine od 35 do 500 km, pri čemer je ločljivost od 10 do 100 m. RADARSAT skrbi za globalno pokritost, ki jo na Arktiki doseže vsak dan, na ekvatorju pa z uporabo 500 km pasu v šestih dneh. Njegova tirnica gre natanko prek iste točke vsakih 24 dni.

RADARSAT je močno prekoračil predvideno življenjsko dobo pet let, a še vedno normalno deluje. Posnetke, ki jih ustvarja, uporabljamo za opazovanje ledenikov, spremljanje nesreč (slika 11.17), v kmetijstvu in gozdarstvu, pri kartiranju arktičnih predelov in podobno. Uspešno zajemanje podatkov bo nadaljeval satelit RADARSAT-2, ki bo s prostorsko ločljivostjo kar 3 m lahko deloval pri različnih polarizacijah, snemalno anteno pa bo mogoče obračati tako na levo kot na desno stran glede na smer leta.

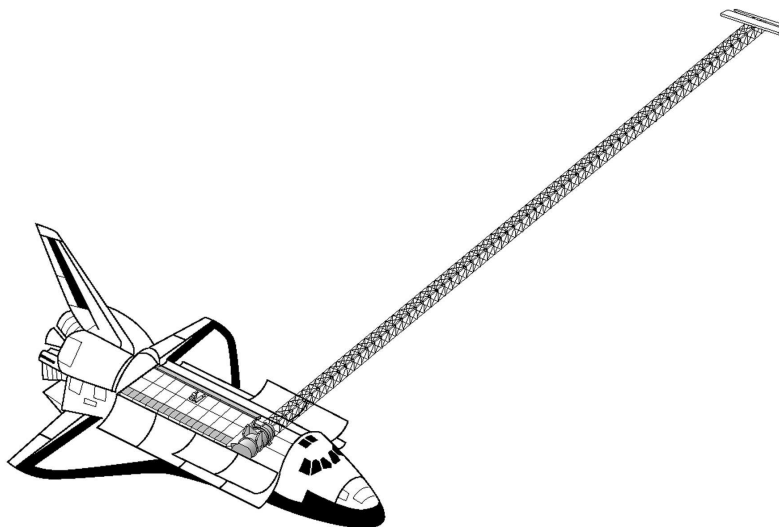
11.4.4 Shuttle Radar Topography Mission

Ameriška vesoljska agencija NASA je skupaj s partnerji pričela leta 1996 izvajati projekt *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Njegov cilj je bil ustvariti visokoločljivi globalni digitalni model zemeljske površine, v pasu med 60° severno in 56° južno od ekvatorja, kar pomeni 80 odstotkov površine Zemlje in skoraj 95 odstotkov prebivalstva. Ločljivost ustvarjenega modela višin naj bi bila 30 m, kar je tridesetkrat bolj natančno od predhodnih višinskih podatkov za tako veliko površino.

SRTM je radarski interferometrični sistem, ki je, nameščen na vesoljskem plovilu Endeavour, od 11. do 21. februarja 2000 zajemal podatke o višinah. Sistem je sestavljen iz dveh anten, od katerih je ena nameščena neposredno na plovilu, druga pa se nahaja na 60 m dolgi gredi. Ena izmed anten je oddajala radarsko valovanje, ki sta ga sprejemali obe. Iz fazne razlike med signaloma, zajetima z eno in drugo anteno, je mogoče izračunati višino površine, od katere se je signal odbil. Hkratno zajemanje podatkov z dvema antenama omogoča visoko ujemanje posnetkov (koherenco) tudi nad območji, ki se časovno hitro spreminjajo (gozdovi, polja ...). Endeavour je podatke zajemal v pasovih širine 225 km in s prekrivanjem dosegel enkratno ali večkratno pokritost v načrtovanem pasu. Sistem SRTM je opazoval Zemljo pri dveh različnih valovnih dolžinah, in sicer v pasu C (s frekvenco $\nu \approx 5,2$ GHz, čemur ustreza valovna dolžina $\lambda \approx 5,8$ cm) in X ($\nu \approx 10$ GHz, $\lambda \approx 3$ cm).

Obdelava podatkov, ki so jih zajeli v desetih dneh snemanj, je trajala več let. Sama tehnologija zajemanja podatkov SRTM je dobro znana in ni predstavljala velike ovire. Že nekaj časa namreč na podoben način delujejo letalski in satelitski sistemi. Najtežje delo je bila izdelava gredi iz plastike in aluminija, ki je z dolžino 60 m predstavljala doslej najdaljši umetni objekt v vesolju. Gred je bilo treba sestaviti in razstaviti, poleg tega pa so morali poskrbeti za natančno merjenje njene dolžine (ta je namreč vhodni podatek pri interferometrični obdelavi). Način delovanja sistema SRTM shematično prikazuje slika 11.18.

Interferometrična misija Endeavourja je bila uspešna, saj ustvarjeni DMV ustreza zastavljenim zahtevam – ima ločljivost 30 m, navpično natančnost 16 m, položajno pa 20 m. Model višin SRTM je brezplačno dostopen prek spleta, in sicer v polni ločljivosti za Združene države Amerike in v nekoliko zmanjšani (približno 90 m) za celotno opazovano območje.



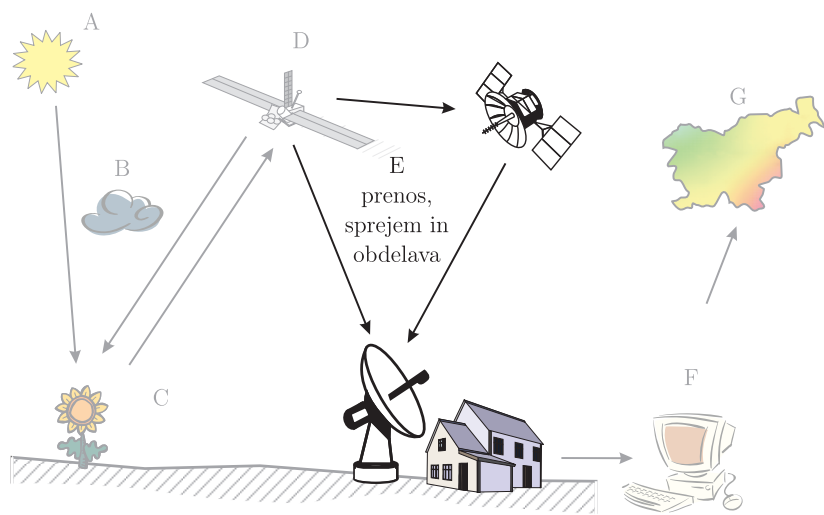
Slika 11.18: Vesoljsko plovilo Endeavour z interferometričnim radarskim sistemom SRTM.

Vprašanja

1. Kakšne so značilnosti vremenskih satelitov?
2. Kakšne so značilnosti satelitov za opazovanje morja?
3. Kakšne so značilnosti satelitov za opazovanje kopnega?
4. Podaj osnovne značilnosti satelitov Landsat.
5. Podaj osnovne značilnosti satelitov SPOT.
6. Podaj osnovne značilnosti satelitov IKONOS.
7. Podaj osnovne značilnosti satelitov QuickBird.
8. Navedi osnovne značilnosti satelitskega sistema ERS.
9. Navedi osnovne značilnosti satelitskega sistema Envisat.
10. Navedi osnovne značilnosti satelitskega sistema RADARSAT.
11. Kaj je Shuttle Radar Topography Mission?

12 Prenos in sprejem podatkov

Podatke, ki jih zajamemo pri opazovanju z letali, pridobimo takoj, ko letalo pristane. Takrat jih arhiviramo, pričnemo z obdelavo in jih posredujemo končnim uporabnikom. Nekoliko drugače pa je s posnetki, ki jih zajamejo sateliti. Te moramo na Zemljo prenesti v elektronski obliki, z uporabo elektromagnetnega valovanja. Sateliti namreč ostajajo v svoji tirnici vso svojo »življenjsko« dobo. Prenos prek radijskih valov lahko uporabimo tudi pri opazovanju iz letala, če podatke potrebujemo takoj, na primer ob naravnih in drugih nesrečah.



Slika 12.1: Prenos podatkov od satelita do sprejemne postaje.

Obstajajo trije glavni načini prenosa podatkov, ki jih zajemajo sateliti, na Zemljo (slika 12.1).

- Podatke lahko *prenesemo neposredno* v sprejemno postajo, in sicer če je ta iz satelita vidna.
- Z *zakasnenim prenosom* podatke začasno shranimo na satelitu in jih na Zemljo pošljemo, ko pridemo v vidno polje postaje.



Slika 12.2: Sprejemne postaje satelitov SPOT in njihovo »pokrívno« območje.

- Podobe lahko do sprejemne postaje pošljemo tudi *posredno*, prek posebnih satelitov, ki so namenjeni prenosu podatkov.

Za vsak satelitski sistem obstaja po vsem svetu več sprejemnih postaj. Ker je gradnja in upravljanje take postaje razmeroma draga, vsaka izmed njih zajema podatke več senzorjev. V Evropi so glavne sprejemne postaje Fucino (Italija), Neustreliz (Nemčija), Tromsø (Norveška), Kiruna (Švedska), Maspalomas (Španija) in Toulouse (Francija). Navedene postaje sprejemajo podatke satelitov ERS, Landsat, SPOT in drugih, predvsem za uporabnike iz Evrope. Sprejemne postaje za satelit SPOT prikazuje slika 12.2.

Podatki, ki pridejo v sprejemne postaje, so v »surovi« obliki. Pogosto jih je treba sistematično in geometrično popraviti, odpraviti atmosferska in druga popačenja in jih na koncu pretvoriti v standardni zapis. Posnetke nato zapišemo na pomnilniški medij, na primer magnetni trak ali trdi disk. Podatke ponavadi arhivirajo neposredno v sprejemnih postajah, ogromne kataloge (knjižnice) obstoječih podatkov – tako imenovane metapodatke – pa upravljajo vladne in nadvladne agencije oziroma komercialna podjetja, ki so zadolžena za posamezni satelit ali senzor.

Nekateri sateliti omogočajo tudi pridobivanje posnetkov nemudoma po zajemu. Skoraj sočasni (near real time) sistemi, ki podatke obdelujejo in posredujejo v realnem času, omogočajo izdelavo nizkoločljivih digitalnih ali tiskanih podob v nekaj urah po zajemu. Njihove posnetke je mogoče hitro prenašati prek interneta ali komunikacijskih satelitov do uporabnikov, na primer ladij v Arktiki, ki lahko s satelitskimi posnetki ledu bolje, predvsem pa varneje načrtujejo plovbo, ali reševalcev, ki z infrardečimi kamerami iščejo pogrešane osebe v primeru naravnih nesreč. Neposredni prenos omogočajo praktično vsi sateliti za opazovanje vremena, ki posnetke pošiljajo med zajemanjem, podobe pa sproti nastajajo na zaslonu prejemnika.

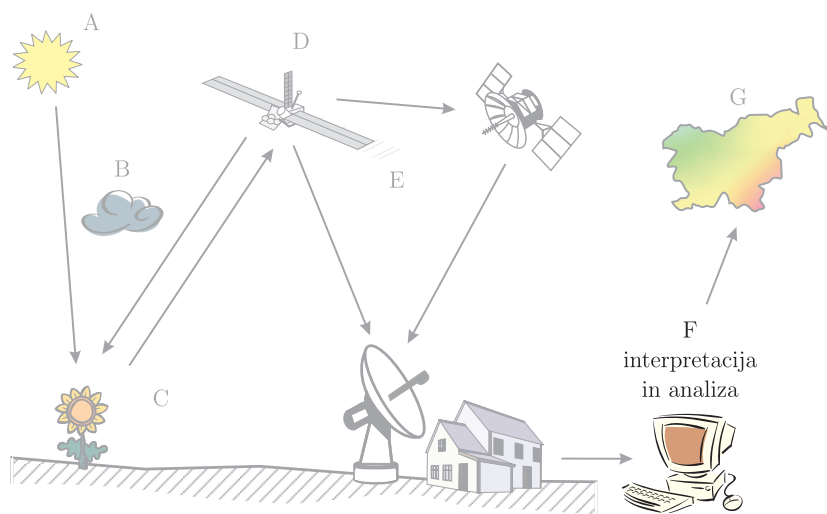
Podobe nizke ločljivosti uporabljamo tudi za preverjanje kakovosti arhiviranih posnetkov pred nakupom. Prostorska in spektralna ločljivost tovrstnih posnetkov sta precej zmanjšani, vendar so tako imenovani hitri pogledi (quicklook) uporabni za oceno primernosti posnetka, določanje stopnje oblačnosti in za preverjanje pokritosti območja.

Vprašanja

1. Kako poteka prenos podatkov od satelita do sprejemne postaje?

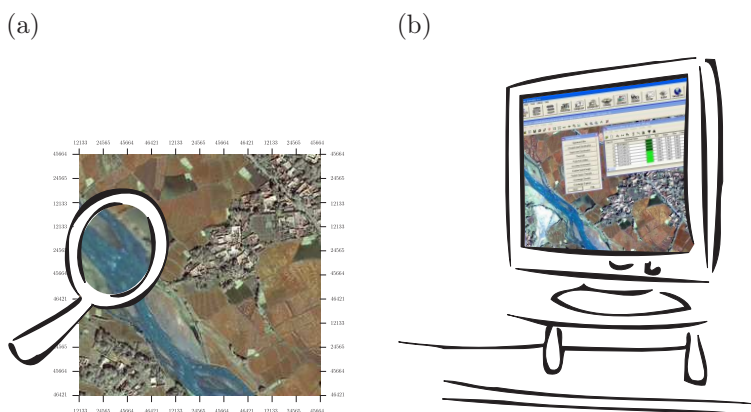
13 Interpretacija podob

Če želimo izkoristiti in pravilno uporabiti podatke daljinskega zaznavanja, moramo iz podob izluščiti pomembne informacije. To pomeni, da se moramo ukvarjati z *interpretacijo in analizo podob*, ki smo ju definirali kot enega od korakov daljinskega zaznavanja (slika 13.1). V tem in naslednjih poglavjih si bomo ogledali načine interpretacije in tehnike, ki jih pri tem uporabljamo. Ločili bomo vizualno interpretacijo, pri kateri ima najpomembnejšo vlogo človek kot opazovalec, in digitalno obdelavo, ki jo omogočajo oziroma izvajajo računalniki.



Slika 13.1: Interpretacija in analiza podob je pomemben korak daljinskega zaznavanja.

Pri interpretaciji in analizi daljinsko zaznanih podob gre za prepoznavanje in/ali merjenje lastnosti predmetov, o katerih želimo pridobiti kar se da veliko uporabnih podatkov. Predmeti na podobah so lahko kateri koli točkovni, linijski oziroma ploskovni objekti ali pojavi. To pomeni, da imajo kakršno koli obliko in razsežnost, od, na primer, avtobusa na postajališču ali letala na vzletni stezi, prek mosta na železniški progi do gozda ali jezera sredi polj. Predmeti morajo biti razločljivi – morajo se jasno ločiti od drugih predmetov v njihovi bližini.



Slika 13.2: Analogni (a) in digitalna obdelava (b) podob.

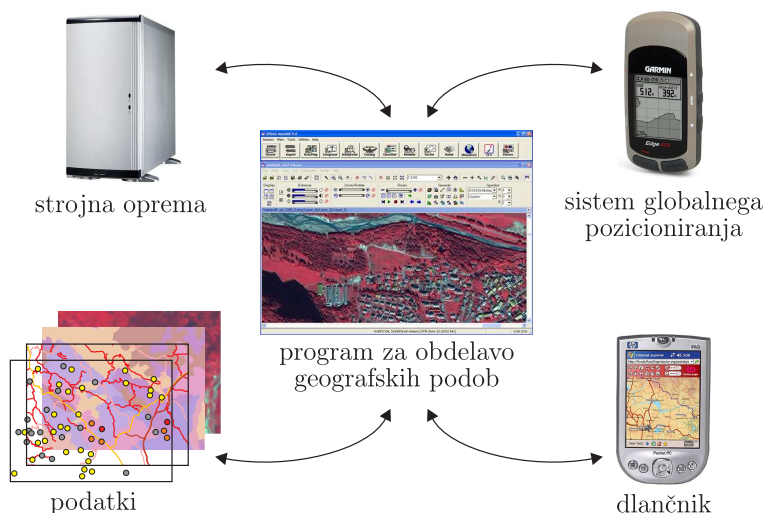
Interpretacijo in prepoznavanje predmetov na podobah mnogokrat opravljajo posebej izurjeni interpretatorji »ročno« ali vizualno. Podobe so pogosto prikazane v slikovni ali fotografski obliki, torej povsem neodvisno od senzorja, ki jih je zajel. Za podatke v tem primeru rečemo, da so v *analogni obliki*. Kot smo že večkrat omenili, pa so podobe daljinskega zaznavanja največkrat podane v *digitalni obliki*. To pomeni, da so zapisane kot matrika pikslov, pri čemer vsakemu izmed njih ustreza vrednost, ki predstavlja svetlost opazovanega območja. Če podobo prikažemo na računalniškem zaslonu, ustvarimo sliko, ki jo lahko vizualno interpretiramo.

Analogne, še lažje pa digitalne podobe lahko prikažemo v obliki črno-belih (monokromatskih, pankromatskih) ali barvnih slik. Pri slednjih uporabimo kombinacijo različnih kanalov, ki ustrezajo različnim valovnim dolžinam. Kadar imamo podobe v digitalni obliki, lahko izvajamo obdelavo in analizo z računalnikom. Pri tako imenovani digitalni obdelavi podobe izboljšujemo in tako olajšamo vizualno interpretacijo. Poleg tega lahko s tovrstno obdelavo samodejno prepoznavamo predmete in pridobivamo informacije, ki na podobi niso prepoznavne. Postopki pri analizah so zelo podobni kot pri »klasični« interpretaciji. Digitalna obdelava zato le redko v celoti nadomesti vizualno interpretacijo – ponavadi jo le dopolnjuje in pomaga človeškemu opazovalcu.

»Ročna« interpretacija sega v same začetke daljinskega zaznavanja in fotointerpretacije. Digitalna obdelava je precej mlajša, saj sta jo omogočila šele razvoj sistemov za elektronsko zajemanje podatkov in izboljšanje zmogljivosti računalnikov. Tako vizualna kot digitalna obdelava podatkov imata svoje prednosti in slabosti. Vizualna interpretacija zahteva le malo opreme, medtem ko pri digitalni potrebujemo namensko, strogo specializirana orodja. Pri vizualni interpretaciji ponavadi analiziramo samo en podatkovni kanal ali eno samo podobo naenkrat, saj je obdelava več podob hkrati za človeka prezahtevna. Računalniki nimajo težav pri shranjevanju in obdelavi podob z več kanali, ki so jih zaznali različni senzorji ob enakih ali različnih časih. Digitalna obdelava je torej uporabna za hkratno analizo več spektralnih kanalov in omogoča zelo hitro obdelavo velikih podob. Vizualna interpretacija je subjektivni postopek, kar pomeni, da različni operaterji ustvarijo različne rezultate. Še več – celo isti operater lahko ob različnih časih podobo različno interpretira. Pri digitalni obdelavi gre za operacije v računalnikih, kar zagotavlja mnogo večjo objektivnost in bolj dosledne rezultate. Seveda pa je določanje zanesljivosti in natančnosti tovrstnih obdelav precej zapleteno.

<i>Vizualna interpretacija</i>	<i>Digitalna obdelava</i>
izurjeni interpretatorji	operaterji računalnikov
sega v same začetke daljinskega zaznavanja	omogočila sta jo razvoj sistemov za elektronsko zajemanje in izboljšanje računalnikov
malo opreme	namenska programska in strojna oprema
en podatkovni kanal	podobe z več kanali
ena sama podoba naenkrat	podatki enakih ali različnih senzorjev ob enakih ali različnih časih
subjektivni postopek	večja objektivnost

Tabela 13.1: Primerjava vizualne interpretacije in digitalne obdelave podob.



Slika 13.3: Sistem za obdelavo geografskih podob sestavlja strojna in namenska programska oprema.

Kljub temu je treba ponoviti, da se vizualna in digitalna analiza podob ne izključujeta. Obe imata namreč svoje prednosti, zato v praksi praviloma uporabimo obe. Ne nazadnje o uporabnosti in pomenu informacij, dobljenih z daljinskim zaznavanjem in obdelavo podob, na koncu vedno odločajo ljudje.

Dandanes praktično vse podatke daljinskega zaznavanja zajamemo v digitalni obliki ali pa jih pred obdelavami pretvorimo vanjo. Obdelava podob torej zajema vsaj nekaj elementov digitalne obdelave. Digitalna obdelava vsebuje veliko postopkov, med katerimi so oblikovanje in korekcija podatkov, digitalno izboljšanje podob z namenom olajšanja vizualne interpretacije, pa tudi samodejna klasifikacija, pri kateri predmete v celoti prepozna računalniški sistem.

Če želimo podobe daljinskega zaznavanja obdelovati elektronsko, jih moramo zapišati v obliko, ki je primerna za hranjenje v računalnikovem pomnilniku ali na njegovem



Slika 13.4: Izboljšanje kontrasta podobe.

trdem disku. Poleg tega potrebujemo sistem za obdelavo podob, pogosto mu pravimo tudi sistem za analizo georeferenciranih podob, ki vsebuje potrebno programsko in strojno opremo (slika 13.3). Obstaja kar nekaj zelo zmogljivih sistemov, ki so namenjeni samo obdelavi geografskih podob ali pa se z njimi ukvarjajo le deloma. Med strogo namenskimi programskimi orodji so najbolj znani *ENVI*, *Erdas Imagine*, *ER Mapper* in *Geomatica*, širši programski paketi pa so ArcGIS, GRASS, IDRISI, MicroStation GeoGraphics, TNTmips in drugi.

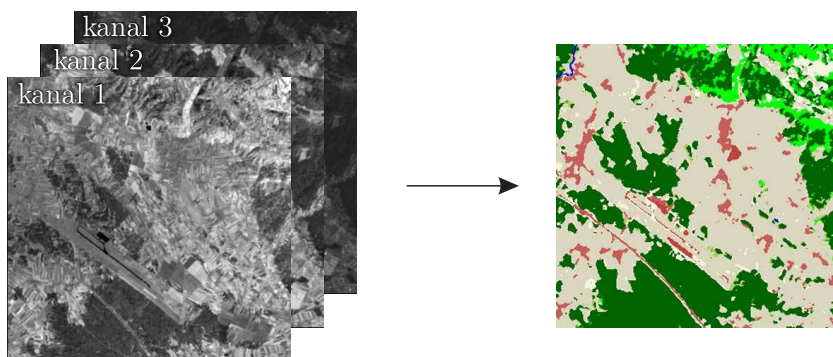
Postopke pri obdelavi digitalnih podob lahko razdelimo v štiri skupine:

- predobdelava,
- izboljšanje,
- transformacija ter
- klasifikacija in analiza.

Z izrazom *predobdelava podob* zajamemo vse operacije, ki jih izvedemo, preden se prične glavni postopek analize in pridobivanja informacij. Običajno gre za dve skupini operacij, in sicer za radiometrične in geometrične popravke. Pri *radiometričnih popravkih* skušamo odpraviti nepravilnosti v delovanju senzorja in odstraniti atmosferske šume. Poleg tega podatke pretvorimo v vrednosti, ki kar se da ustrezajo zaznanemu odbitemu ali oddanemu elektromagnetnemu valovanju. *Geometrični popravki* vključujejo odstranjevanje popačenja zaradi geometrije snemanja (satelit, Zemlja) in zaradi njenega spreminjanja (stabilnost tirnice, zasuk senzorja, vrtenje Zemlje ...). V postopku predobdelave poskrbimo tudi za geokodiranje – pretvorbo podatkov v izbrane koordinate na površju Zemlje, na primer v geografsko širino in dolžino.

Glavni namen funkcij za *izboljšanje podob* je spremeniti njihov videz in tako olajšati vizualno interpretacijo in analizo. Primer postopkov izboljšanja podob je povečanje kontrasta z *raztegovanjem histograma* in s tem povečevanjem razlik v tonu med predmeti na podobi (slika 13.4). Poleg tega v to skupino operacij sodijo tudi različna *filtriranja*, ki poudarijo ali prikrijejo določene prostorske vzorce na podobi.

Transformacije podob so skupina operacij, podobnih postopkom za izboljšanje podob. Za razliko od slednjih, ki jih praviloma izvajamo z enim samim kanalom naenkrat,



Slika 13.5: Klasifikacija satelitskih posnetkov.

pri transformacijah upoštevamo podatke več kanalov. Izvajamo različne aritmetične operacije, na primer seštevanje, odštevanje, množenje ali deljenje, in tako pretvorimo prvotne kanale v »nove« podobe. Te praviloma poudarijo določeno lastnost, ki na podobah ni jasno razločna ali pa sploh ni podana. V to skupino operacij štejemo, na primer, spektralna ali *kanalna razmerja* in postopek tako imenovane *analize osnovnih komponent* (PCA), s katerim učinkoviteje predstavimo informacije večspektralnih podob.

Z operacijami *klasifikacije in analize podob* piksle prepoznamo in jih razdelimo v razrede. Pri klasifikaciji, ki jo ponavadi izvajamo z večspektralnimi podatki, vsakemu pikslu na podobi priredimo določen razred ali temo glede na njegove sive vrednosti in druge statistične značilnosti (slika 13.5). Obstaja veliko načinov razdelitve v razrede, v splošnem pa klasifikacijo delimo na *nadzorovano* in *nenadzorovano*.

V naslednjih poglavjih bomo najprej opisali vizualno obdelavo podob (14), nato pa nekoliko podrobneje vsakega izmed delov digitalne obdelave podob (15 do 18).

Vprašanja

1. Primerjaj vizualno in digitalno obdelavo podob.
2. Opiši postopek pri digitalni obdelavi podob.

14 Vizualna interpretacija

Kot smo omenili v prejšnjem poglavju, pri vizualni interpretaciji na daljinsko zaznanih podobah prepoznavamo najrazličnejše predmete, ki so lahko naravni ali umetni, lahko so točkovni, linijski ali ploskovni. V tem poglavju si bomo podrobneje ogledali elemente, ki omogočajo interpretacijo.

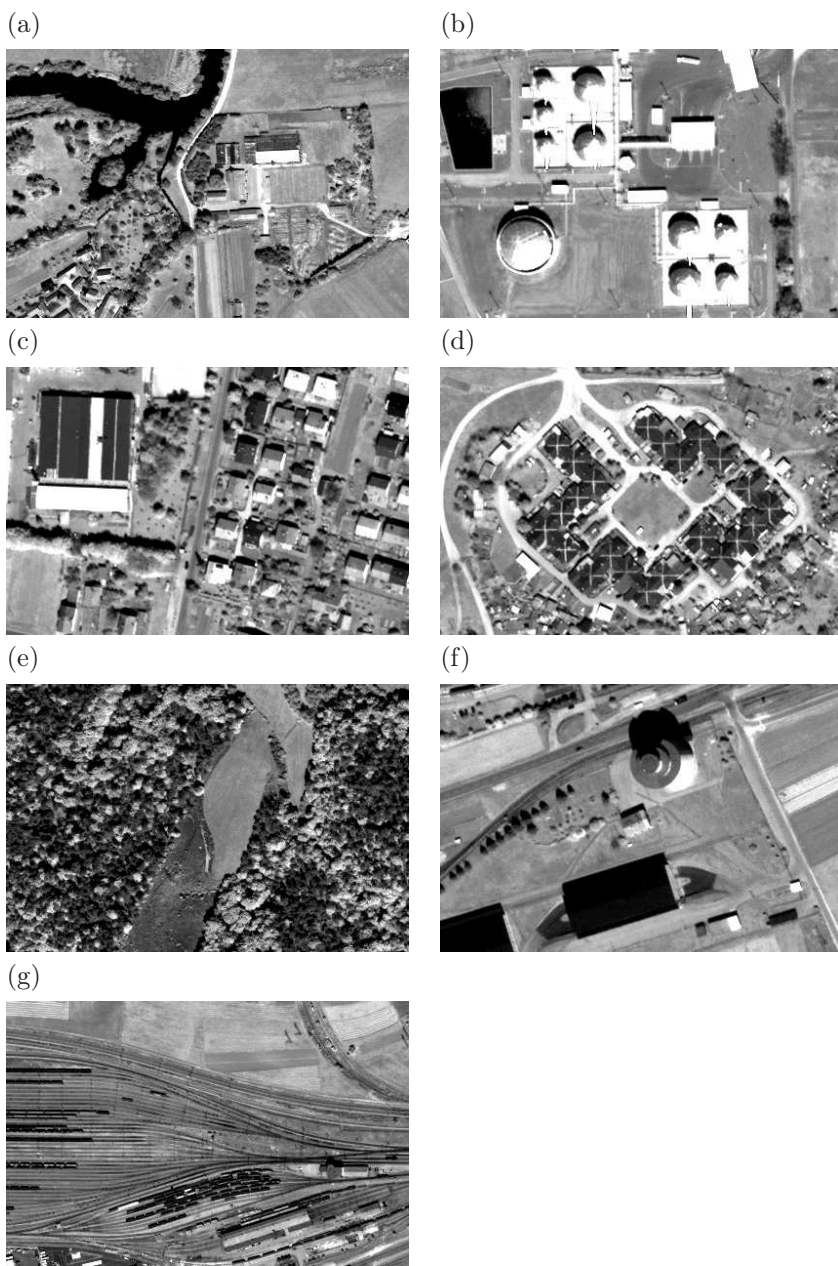
Zakaj je interpretacija daljinsko zaznanih podob bolj zapletena od vsakodnevnega opazovanja naše okolice? Najprej zato, ker pri opazovanju dvorazsežnih podob izgubimo občutek globine, razen če za slednjo poskrbimo s stereoskopskim opazovanjem (to lahko znatno olajša in izboljša prepoznavanje predmetov). Opazovanje »od zgoraj« ustvari tudi precej drugačno perspektivo od tiste, ki smo je vajeni, ko površje opazujemo s tal. Zaradi različnega merila in odsotnosti lahko prepoznavnih podrobnosti je še tako dobro poznane predmete včasih nemogoče določiti. Ne nazadnje, naše oko je občutljivo samo na svetlobo vidnega dela spektra. Opazovanje odboja v valovnih dolžinah zunaj tega dela je za človeka težko in pogosto nerazumljivo. Kljub temu se, zaradi izredne sposobnosti možganov, vizualne interpretacije hitro naučimo in jo izvajamo zelo učinkovito.

Prepoznavanje predmetov je bistvenega pomena za interpretacijo in pridobivanje novih informacij. Opazovanje razlik med predmeti in njihovo okolico vključuje primerjavo glede na enega ali več osnovnih elementov vizualne interpretacije, ki so:

- ton,
- oblika,
- velikost,
- vzorec,
- tekstura,
- senca in
- povezava.

Vizualna interpretacija glede na navedene elemente je del našega vsakdanjega življenja, ne glede ali se je zavedamo ali ne. Opazovanje satelitskih posnetkov pri vremenski napovedi ali fotografij oziroma videoposnetkov iz helikopterja sta, na primer, dobro poznana primera vizualne interpretacije. Prepoznavanje predmetov na osnovi naštetih elementov omogoča nadaljnjo interpretacijo in analizo, zato je v nadaljevanju vsak izmed njih opisan podrobneje.

Ton se nanaša na relativno svetlost ali barvo predmetov na podobi (slika 14.1 a). Svetli toni pomenijo močan odboj ali lastno sevanje, temni pa šibak odboj oziroma



Slika 14.1: Elementi vizualne interpretacije podob. Ton (a) omogoča ločevanje reke od gozda, travnika in stavb. Oblika (b) kaže, da gre za industrijske objekte, verjetno rezervoarje. Velikost (c) loči individualne stavbe od večstanovanjskih. Vzorec (d) prikazuje naselje vrstnih hiš, najbrž novogradnjo. Tekstura (e) opredeljuje različne vrste gozda, jase in različne kmetijske površine. Senca (f) določa višino objekta. Povezava (g) pa omogoča prepoznavo sestavljenega elementa, na primer železniške postaje.

absorpcijo. Ton je glavni element za ločevanje med različnimi predmeti in pojavi. Njegovo spreminjanje omogoča tudi opazovanje oblike, teksture in vzorca predmetov.

Oblika opisuje splošno zgradbo oziroma oris posameznih predmetov (slika 14.1 b). Pogosto predstavlja najpomembnejši element interpretacije. Ostri robovi in pravilne oblike ponavadi predstavljajo urbane ali kmetijske površine, medtem ko so naravni elementi, na primer gozdni robovi, bolj nepravilnih oblik. Pravilne oblike v naravi so praviloma rezultat človekove dejavnosti.

Velikost predmetov na podobi je povezana z merilom (slika 14.1 c). Pri interpretaciji je pomembno poznavanje tako absolutne kot tudi relativne velikosti. Absolutna velikost omogoči natančno določitev razsežnosti predmeta, zelo pomembno za interpretacijo pa je določiti tudi njegovo relativno velikost glede na druge predmete na podobi. Že bežna ocena velikosti interpretacijo usmeri v pravo smer in hitreje zagotovi rezultate. Tako, recimo, interpretator sklepa, da majhne stavbe pomenijo bivalne objekte, velike pa tovarne ali druge poslovne objekte.

Vzorec ustvarja prostorska razporeditev predmetov (slika 14.1 d). Ponavljanje podobnih tonov in tekstur ustvari jasen in razločen vzorec. Sadovnjaki, na primer, imajo drevesa v enakomernih razmikih in pravilni »mreži«, v gozdu pa so ta razporejena naključno. Naselja imajo pogosto geometrijsko razporeditev ulic in hiš, ki je še posebej značilna za načrtno urbanizacijo.

Tekstura je značilna razporeditev in frekvenčno spreminjanje tona na posameznih območjih podobe (slika 14.1 e). Grobe teksture vsebujejo znatno spreminjanje sivih vrednosti, ki se menjajo na majhnih razdaljah, to je z veliko frekvenco. Po drugi strani pa se mehkim ali gladkim teksturam toni le malo spreminjajo. Mehke teksture so praviloma posledica enakomernih, gladkih površin, na primer polj, asfalta in travnikov. Predmeti z močno razgibano in nepravilno površino, na primer gozdne krošnje, imajo precej živahno spreminjanje tonov ali grobo teksturo. Tekstura je eden najpomembnejših elementov za ločevanje predmetov na radarskih podobah.

Sence so prav tako v veliko pomoč pri interpretaciji (slika 14.1 f). Podajajo namreč podatke o višini in višinskem profilu predmetov, kar olajša njihovo prepoznavanje. Za predmete z enakim tlorisom na navpičnem posnetku lahko na osnovi dolžine sence določimo višino in s tem obliko. Seveda sence interpretacijo tudi otežujejo ali celo onemogočajo. V njihovem območju so namreč predmeti mnogo slabše vidni ali v primeru radarskih posnetkov celo nevidni. Po drugi strani sence s pridom uporabljamo pri poudarjanju in določanju topografije, še posebej pri radarskih podobah.

Povezava upošteva medsebojna razmerja med opazovanim predmetom in drugimi prepoznanimi predmeti ali pojavi v njegovi okolici (slika 14.1 g). Opazovanje lastnosti, ki jih povezujemo z določenimi predmeti, je pomemben del interpretacije podob. Tako lahko, na primer, poslovne objekte povežemo z bližino pomembnih prometnic, bivalna naselja pa s šolami, igrišči in športnimi objekti. Sorodno lahko zaliv, različna plovila in spremljevalne stavbe povežemo z marino, kar na osnovi prepoznavne posameznih elementov ne bi bilo mogoče.

Vprašanja

1. Kateri so osnovni elementi vizualne interpretacije podob?
2. Opiši pomen posameznih elementov.

15 Predobdelava podob

Podatki, zaznani iz satelita ali letala, vsebujejo nepravilnosti in pomanjkljivosti, ki jih želimo odstraniti pred nadaljnjo obdelavo. Veliko popravkov opravijo že v sprejemni postaji, precej pa jih mora opraviti vsak uporabnik podob sam. Ker gre pri tem za operacije, ki se izvajajo pred nadaljnjo obdelavo, to je izboljšanjem, analizo in interpretacijo, govorimo o *predobdelavi podob*. V naslednjih razdelkih bomo obravnavali najpomembnejše korake predobdelave, in sicer odpravo napak v delovanju senzorjev, geometrijske popravke in registracijo, atmosferske popravke, popravke osvetlitve in vpliva terena ter kalibracijo podatkov.

Kateri postopki spadajo v predobdelavo, je odvisno od načina uporabe podatkov. Če želimo, na primer, ustvariti natančno vegetacijsko karto, potem so geometrijski popravki zelo pomembni. Ko pa nas zanima samo prisotnost ali odsotnost določene rastlinske vrste in je dovolj vizualna interpretacija, so tovrstni popravki nepotrebni.

V tem poglavju se bomo ukvarjali z najpogostejšimi postopki geometrične, atmosferske in radiometrične korekcije. Pri podobah daljinskega zaznavanja se lahko srečamo z manjkajočimi podatki, na primer posameznimi piksli ali celotnimi vrsticami. Prečni senzorji zajemajo podatke z več detektorji, ki niso povsem umerjeni, zato na njih opazimo pojav prog. Še pomembnejše je vpenjanje posnetkov v koordinatni sistem ali georeferenciranje podob. Večina uporabnikov namreč podatke daljinskega zaznavanja primerja z drugimi kartografskimi podatki ali jih vključi v geografski informacijski sistem (GIS). Pri geometrijskih popravkih lahko upoštevamo model snemalnega sistema ali pa opravimo transformacijo na osnovi kontrolnih točk. Radiometrični popravki pa so potrebni zaradi sprememb v osvetlitvi scene in šuma senzorjev. Opraviti jih je treba, če želimo primerjati podobe, zajete ob različnih časih ali z različnimi senzorji. V postopku skušamo pogosto podatke pretvoriti v poznano absolutno odbojnost ali jih z drugimi besedami kalibrirati, s čimer omogočimo primerjavo podatkov. Z atmosferskimi popravki pa skušamo odstraniti vpliv ozračja, predvsem sipanja in absorpcije, na valovanje.

Vsak izmed popravkov je odvisen od izbranega senzorja, platforme, ki je bila uporabljena za zajem podatkov, in od pogojev med samim zajemom. Navedeni postopki ne vključujejo vseh tehnik predobdelave, poleg tega pa praviloma ne uporabimo vseh.

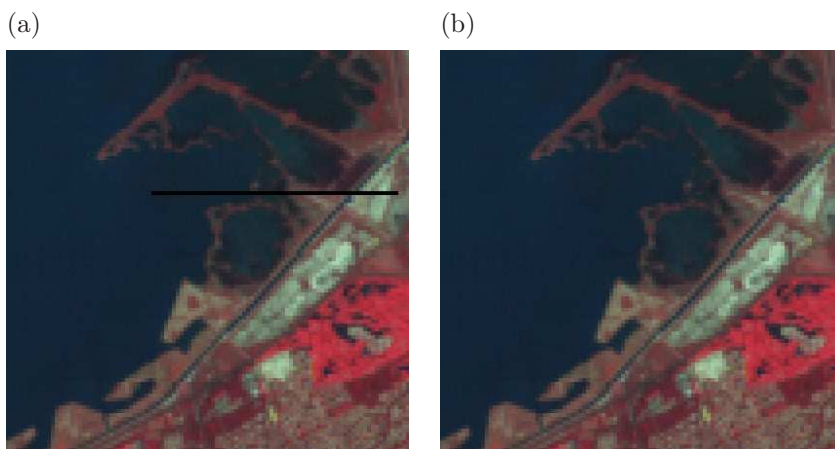
15.1 Odprava napak v delovanju senzorjev

Pri delovanju elektronskih skenerjev prihaja do napak. Opazimo lahko, na primer, manjkajoče vrstice (delno ali v celoti). Pri tem gre za okvaro samega senzorja ali pa za

napake pri prenosu oziroma arhiviranju, ki jih opazimo kot črne linije na podobi. Drugo vrsto pomanjkljivosti srečamo pri senzorjih, ki valovanje zaznavajo z več detektorji (razdelek 8.2). V idealnem primeru bi vsak detektor zaznal enake vrednosti za enake vrednosti seane energije oziroma radiance (ob izstrelitvi satelita je res tako). Zaradi razlik v staranja pa se vrednosti nekoliko razlikujejo in na podobi opazimo sistematičen ponavljajoč se vzorec, ki je še posebej očiten na zelo temnih površinah.

15.1.1 Manjkajoče vrstice

Manjkajočih vrstic, ki se pojavijo na podobah, seveda ne moremo preprosto odpraviti. Lahko pa na osnovi podatkov v okolici (vrstici nad in pod) izpuščene vrstice ocenimo vrednosti v manjkajočih pikslah (slika 15.1). Pristop temelji na prostorski avtokorelaciji, to je dejstvu, da vrednosti na podobi niso neodvisne. Točke, ki so blizu skupaj, imajo namreč podobne vrednosti.



Slika 15.1: Manjkajoče vrstice na podobi (a) lahko nadomestimo z vrednostmi sosednjih pikslor (b).

Najpreprostejši način zapolnjevanja manjkajočih vrstic je povprečenje vrednosti v vrstici nad in pod manjkajočo

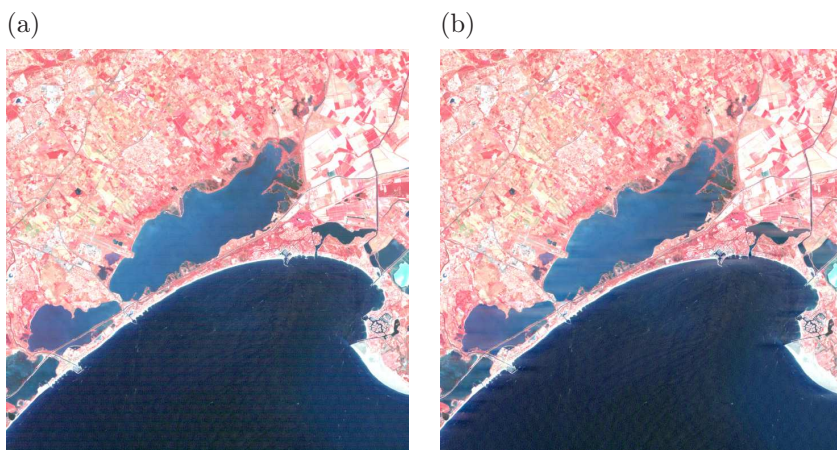
$$I(s, v) = \frac{I(s, v + 1) + I(s, v - 1)}{2}. \quad (15.1)$$

Pri tem je $I(s, v)$ intenziteta piksla v stolpcu s in vrstici v . S tovrstnim izračunom dobimo nove vrednosti pikslor, ki se praviloma razlikujejo od tistih v sosednjih vrsticah. Težave imamo samo v primeru, ko opazujemo mejo dveh zelo različnih območij in dobimo »nenaravne« vrednosti.

Postopek lahko izboljšamo v primeru večspektralnih podob, pri katerih je »pokvarjen« en sam kanal. Takrat lahko opazujemo vrednosti tako v sosednjih pikslah kot tudi v istem pikslu v drugih kanalih, manjkajočo vrednost pa določimo z opazovanjem korelacije med pikslu v različnih kanalih.

15.1.2 Odstranitev prog

Prisotnost sistematičnih vodoravnih prog je najbolj očitna na prečnih skenerjih, od katerih so najbolj poznani tisti na satelitih Landsat (slika 15.2 a). Vzorec je še posebno opazen na zelo temnih, na primer vodnih površinah, nastane pa zaradi neenakomernega delovanja skupine detektorjev posameznega senzorja. Landsat MSS je na primer zajemal šest, Landsat TM in ETM+ pa zajemata kar šestnajst vrstic hkrati. Z drugimi besedami, za vsak posamezni kanal ima satelit šest oziroma šestnajst detektorjev, ki med seboj niso popolnoma usklajeni. Zato so vrednosti v zaporednih vrsticah tudi pri opazovanju homogenih površin nekoliko različne, kar sicer ne vpliva bistveno na vizualno interpretacijo, pomembno pa je pri vsakršni statistični analizi.



Slika 15.2: Vodoravne proge, ki jih opazimo na podobah satelitov Landsat, še posebej v zelo temnih delih (a). Podoba ima zaradi nazornejšega prikaza močno povečan kontrast. Proge lahko deloma odpravimo z upoštevanjem načina delovanja skenerja (b).

Proge na podobah najpogosteje odpravljamo s statistično primerjavo posameznih vrstic. Na dovolj veliki podobi – taki, ki vsebuje vsaj nekaj snemalnih ciklov (prehodov skenerja levo–desno) – lahko pričakujemo, da so intenzitete po posameznih vrsticah porazdeljene enako. V primeru senzorja MSS, ki ima šest detektorjev, mora biti histogram vrstic 1, 7, 13 ... enak histogramu vrstic 2, 8, 14 ... Nepravilnosti posameznih detektorjev odpravimo s preračunom, ki zajete vrednosti popravi oziroma umeri vse detektorje.

Najpreprostejši način odstranjevanja je računanje statističnih vrednosti za vrstice (povprečje, varianca), ki ustrezajo istemu detektorju. Naprednejše tehnike pa uporabljajo tako imenovano *ujemanje histograma*, pri katerem opazujemo celotno porazdelitev vrednosti. Rezultat odstranjevanja prog na podobi Landsat prikazuje slika 15.2 (b). Vidimo, da so proge izginile, težave pa se pojavijo na mejah z visokim kontrastom, na primer med morjem in kopnim.

15.2 Geometrijski popravki in registracija

Podobe, ustvarjene z daljinskim zaznavanjem, kljub pogostemu nasprotnemu mnenju, niso karte. Ne vsebujejo namreč kartografske projekcije in nimajo pravega merila. Na

Geometrijske napake podob

Vsaka podoba daljinskega zaznavanja, ne glede na to, ali je bila ustvarjena z večspektralnim skenerjem na satelitu, fotografskim sistemom na letalu ali katero koli drugo kombinacijo senzorja in platforme, vsebuje različne geometrijske napake. Temu se ne moremo izogniti, saj poskušamo natančno prikazati trirazsežno površino Zemlje na dvorazsežni podobi. Napake imajo – odvisno od načina zajema – lahko veliko različnih vzrokov, med katerimi so najpomembnejši:

- optika senzorja (perspektiva),
- gibanje snemalnega sistema (detektorji, optika),
- gibanje in (ne)stabilnost platforme,
- višina, hitrost in usmerjenost (naklon) platforme,
- oblika reliefa in
- ukrivljenost in vrtenje Zemlje.

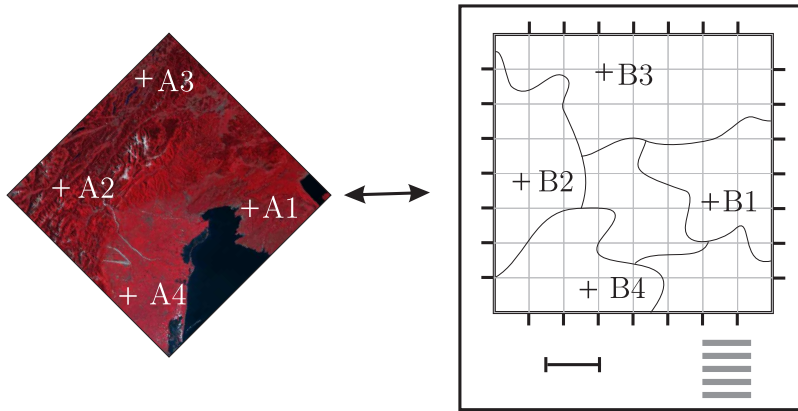
Podobe vseh vrst so tudi občutljive na geometrijska popačenja, do katerih pride zaradi sprememb v položaju in stabilnosti platform. Pri tem so najbolj pomembne spremembe hitrosti, višine in naklona (usmerjenosti glede na površje) v času zajema. Navedeni pojavi so izraziti, kadar imamo opravka z letali, medtem ko so pri satelitih praktično zanemarljivi. Tirnice satelitov so namreč stabilne, še posebej v primerjavi z razdaljo med njimi in Zemljo. Na napake vpliva tudi oblika površja (relief), ki povzroča paralakso, in vrtenje Zemlje pod snemalnim sistemom. Pri satelitskih posnetkih je zaradi slednjega vsaka naslednja vrstica podobe pomaknjena in podoba je zato nekoliko »nagnjena«.

Kot rečeno, geometrijsko popačenje spremlja vse podobe daljinskega zaznavanja. Od primera do primera so različni njegovi vzroki in obseg, vendar lahko v večini primerov napake odstranimo ali pa jih vsaj zmanjšamo. Kljub temu se jih moramo zavedati, še posebej, ko na podobah izvajamo meritve in na ta način skušamo pridobiti nove informacije.

vseh podobah daljinskega zaznavanja opazimo geometrijske nepravilnosti, ki so lahko posledica številnih dejavnikov, na primer optike senzorja, gibanja snemalnega sistema, gibanja in nestabilnosti platforme, višine, hitrosti in usmerjenosti platforme, oblike reliefa ter ukrivljenosti in vrtenja Zemlje.

Če želimo satelitske in letalske posnetke uporabiti kot karte, jih primerjati med seboj veččasovno ali večsenzorsko ali pa jih vključiti v analize z geografskim informacijskim sistemom, moramo najprej opraviti geometrijske popravke in podobe poravnati v izbrani koordinatni sistem ali jih *georeferencirati*. Veliko napak na podobah je sistematičnih oziroma predvidljivih. Zato jih lahko opravimo že z natančnim modeliranjem gibanja senzorja ali platforme ter z upoštevanjem položaja senzorja glede na zemeljsko površje. Druge nepravilnosti so naključne in jih z modeliranjem ne moremo odstraniti.

Visokoločljivi satelitski posnetki, kot so SPOT, IKONOS in QuickBird, so geometrijske korekcije približali fotogrametriji. V slednji že leta uporabljajo natančne modele kamer za odpravljanje nepravilnosti na podobah. Sistem globalnega pozicioniranja (GPS) omogoča dobro poznavanje gibanja satelita, kar skupaj z lastnostmi kamere omogoča



Slika 15.3: Registracija podobe.

uporabo fotogrametričnih metod tudi v daljinskem zaznavanju. Pri tem se uporabljajo bolj ali manj zapleteni orbitalni (tirni) modeli, ki poskušajo poiskati povezavo med slikovnim in geografskim koordinatnim sistemom.

Pri srednjeločljivih satelitskih sistemih lahko uporabimo preprosto transformacijo na osnovi *kontrolnih točk* (slika 15.3). Prepoznati moramo slikovne koordinate (stolpec, vrstica) večjega števila jasno določljivih predmetov in jim poiskati ustrezne položaje v izbranem koordinatnem sistemu. »Prave koordinate« običajno odčitamo iz kart, bodisi analognih ali digitalnih. Pri tem moramo uporabiti karte primernege merila, to je take z natančnostjo, primerljivo velikosti piksla na podobi. V primeru satelitov Landsat TM in ETM+ z ločljivostjo 30 m zadoščajo karte merila 1 : 25 000.

Pari koordinat v slikovnem in geografskem koordinatnem sistemu omogočajo določitev prostorske transformacije, s katero vsakemu paru slikovnih koordinat določimo koordinate na karti

$$(x, y) = T(s, v). \quad (15.2)$$

Pri tem sta s in v slikovni koordinati (stolpec, vrstica), x in y pa geografski koordinati. Transformacija T je lahko poljubna, najpogosteje pa vključuje premik (translacijo), zasuk (rotacijo) in spremembo merila. Praviloma dobimo zadovoljive rezultate s polinomskimi transformacijami nižjih redov (prvega ali drugega). Podobe z velikimi (krajevnimi) nepravilnostmi transformiramo z zahtevnejšimi (lokalnimi) transformacijami, kot sta na primer triangulacija in lokalni razteg (rubber sheeting).

Polinomsko transformacijo prvega reda lahko zapišemo kot

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{xx} & R_{xy} \\ R_{yx} & R_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ v \end{bmatrix}. \quad (15.3)$$

Pri tem so T koeficienti vektorja premikov in R matrike zasukov.

Kakovost transformacije določajo kontrolne točke, ki jih mora biti dovolj, poleg tega pa morajo biti dobro razporejene po podobi (okrog stranic in enakomerno po sredini). Stopnja uporabljenega poligona določa najmanjše število točk, potrebnih za njegovo določitev. Za polinom stopnje n moramo imeti najmanj $(n + 1)(n + 2)/2$ kontrolnih točk (tabela 15.1). Če je točk več, se morebitne napake pri določanju njihovega položaja izpovprečijo, poleg tega pa hitro odkrijemo očitne napake.

<i>Stopnja poligona</i>	<i>Število kontrolnih točk</i>
1	3
2	6
3	10
4	15
5	21
6	28
7	36
8	45
9	55
10	66

Tabela 15.1: Število potrebnih kontrolnih točk v odvisnosti od stopnje polinomske transformacije.

Opisani način registracije imenujemo tudi registracija podobe na karto ali geokodiranje. Registracijo pa lahko izvajamo tudi med dvema podobama, od katerih je ena že referencirana. Tako referenciranje se imenuje registracija podobe na podobo, izvajamo pa ga lahko tako ročno kot s samodejnimi postopki.

15.2.1 Prevzorčenje podob

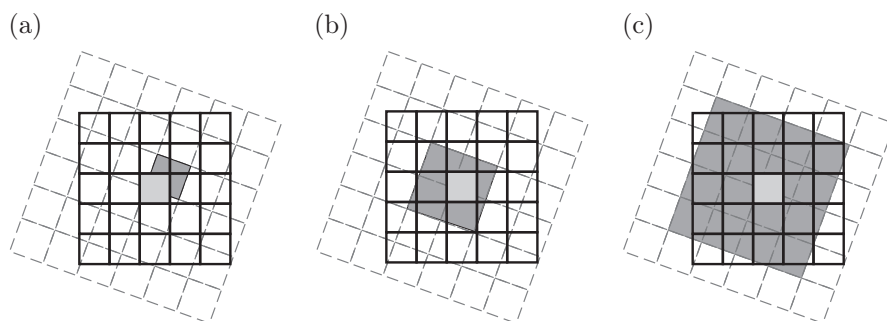
Transformacija, ki jo dobimo iz kontrolnih točk, omogoča določitev geografskih koordinat iz slikovnih. Provotno podobo moramo nato pretvoriti v referencirano, kar storimo s postopkom, ki mu pravimo *prevzorčenje*. Pri prevzorčenju izračunamo vrednosti novih pikslov z upoštevanjem starih. Matriko nove podobe dobimo iz vrednosti na stari, tako da za vsak nov piksel poiščemo njegov položaj v izvorni podobi in izračunamo intenziteto v novi. Ker središča novih pikslov ne ustrezajo središčem starih, uporabljamo različne metode prevzorčenja, od katerih so najpogostejše:

- metoda najbližjega sosedu,
- bilinearna interpolacija in
- kubična konvolucija.

Metoda najbližjega sosedu priredi v novi podobi pikslu vrednost njegovega najbližjega sosedu iz prvotne podobe, kot je prikazano na sliki 15.4 (a). To je najpreprostejša metoda, ki ne spreminja vrednosti, vendar nekatere slikovne elemente izgubi, druge pa podvoji. Poleg tega so pretvorjene podobe videti nazobčane in zato niso najprimernejše za vizualno interpretacijo.

Bilinearna interpolacija upošteva uteženo povprečje štirih najbližjih sosedov, kot kaže slika 15.4 (b). S povprečenjem se spremenijo vrednosti prvotnih pikslov in nova podoba ima drugačne vrednosti. Slednje je lahko neprijetno, če nameravamo podobo dodatno obdelovati in jo, na primer, klasificirati glede na spektralni odziv. V tem primeru je mogoče prevzorčenje opraviti šele po klasifikaciji. Ker pa so tudi v prvotni podobi vrednosti pikslov povprečja znotraj ločljivostih celic, z bilinearno interpolacijo, ki prav tako zajame okolico opazovanega območja, ne naredimo velike napake.

Izmed vseh naštetih tehnik je najbolj zapletena *kubična konvolucija*, ki nove vrednosti izračuna z interpolacijo iz šestnajstih sosednjih vrednosti prvotne podobe, kar



Slika 15.4: Interpolacija novih vrednosti pri prevzorčenju z metodo najbližjega sosa (a), z bilinearno interpolacijo (b) in s kubično konvolucijo (c). Vrednost v transformirani podobi (polna mreža) dobimo iz ene ali več vrednosti v prvotni (črtkano).

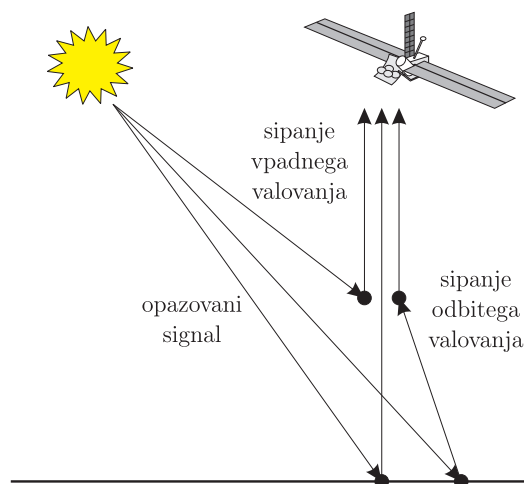
prikazuje slika 15.4 (c). Tudi kubična konvolucija ustvari nove vrednosti pikslov. Bilinearna interpolacija in kubična konvolucija dajeta podobe, ki so mehke in primerne za nadaljnjo interpretacijo.

15.3 Atmosferski popravki

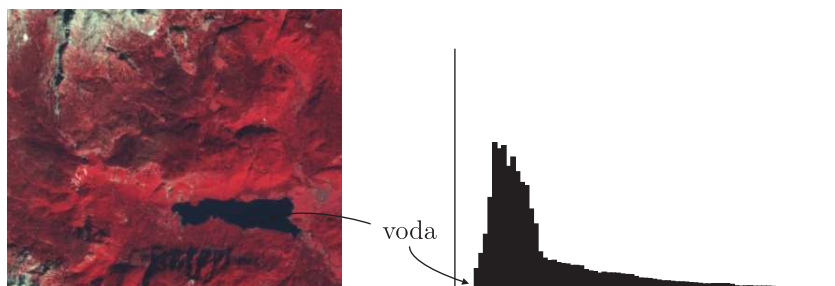
Kot smo se naučili v poglavju 4.1, pride na potovanju valovanja skozi atmosfero (od vira do površja in senzorja) do sipanja in absorpcije. Atmosfera lahko zmanjša ali zaduši del energije, ki osvetljuje površje, valovanje pa dodatno oslabi na poti nazaj proti senzorju. Signal, ki ga slednji zazna, ni enak tistemu, ki se odbije ali ga seva opazovani del zemeljskega površja. Slika 15.5 prikazuje različna vpadna valovanja, ki pridejo do detektorja na satelitu ali letalu. Poleg energije, ki zares prihaja iz točke, ki jo senzor opazuje, moramo upoštevati tudi sipano energijo vira (najpogosteje Sonca) in sipan odboj drugih točk na površju. Dodaten vpliv na vsako valovanje pri poti skozi atmosfero pa je absorpcija.

Atmosferska korekcija je potrebna v več primerih. Če želimo opazovati razmerja med kanali v večspektralni podobi, skušamo odstraniti različen vpliv atmosfere v posameznih kanalih. V poglavju 4.1 smo pokazali, da je sipanje močnejše pri manjših valovnih dolžinah, kar pomeni, da močnejše vpliva na svetlobo v vidnem kot v infrardečem delu spektra. Razmerje med kanali je zato »obremenjeno« z atmosferskim vplivom. Naslednji primer, ko želimo odstraniti vpliv ozračja, je pri določanju fizičnih lastnosti površja, na primer odbojnosti ali temperature. V oceanografiji želimo določiti biološke in sedimentološke lastnosti, ki v zaznanem signalu predstavljajo del, manjši od vpliva atmosfere. Tretji primer je primerjava podob, posnetih ob različnih časih. Ob dveh različnih trenutkih atmosfera namreč nima enakih pogojev in zato je njen vpliv vedno značilen za posamezno podobo. Če želimo primerjati lastnosti površja, se moramo omenjenega vpliva znebiti.

Obstaja veliko metod za atmosfersko korekcijo, od natančnega modeliranja atmosferskih pogojev med zajemom podatkov do preprostih izračunov na osnovi podatkov v sami podobi. Zapleteni modeli zahtevajo dobro poznavanje vremenskih razmer v času zajetja podob, kar je v realnosti zelo težko izvedljivo. Preprostejše metode skušajo vpliv atmosfere določiti z opazovanjem samih podob.



Slika 15.5: Na signal, ki ga zazna detektor, vplivajo različna vpadna valovanja.

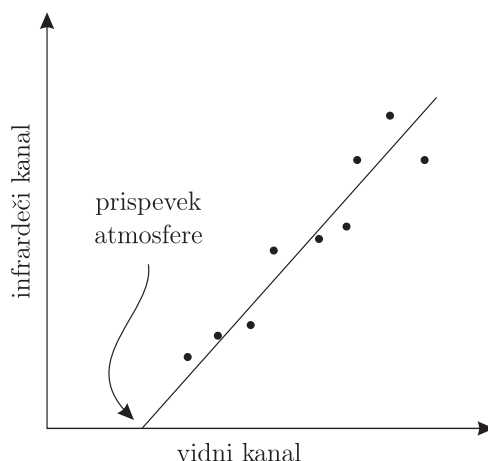


Slika 15.6: Opazovanje in odštevanje odbojnih vrednosti temnih predmetov je najpreprostejši način atmosfarske korekcije.

Iskanje *minimuma histograma* je metoda, ki opazuje svetlost podobe in poišče najmanjše vrednosti odboja. Če upoštevamo, da so odbojne vrednosti temnih predmetov, na primer jezer, v primeru, ko je ozračje čisto in atmosfarskega sipanja ni, zelo majhne ali skoraj enake nič, lahko predvidevamo, da so večje vrednosti temnih predmetov posledica sipanja. Pri tovrstnih popravkih zaznane najmanjše vrednosti preprosto odštejemo od podobe (slika 15.6). Ker je sipanje odvisno od valovne dolžine, so tudi najmanjše vrednosti različne od kanala do kanala. Zato moramo opazovati vsak kanal posebej in za vsakega določiti atmosfarsko sipanje.

Nekoliko zahtevnejša tehnika je *pretvorba radiance v odbojnost*, saj zahteva poznavanje prave (talne) odbojnosti dveh predmetov na površju. Pri tem gre lahko za meritve na površju ali odčitavanje iz tabel odbojnosti. Prve so bolj zanesljive, a le redko dosegljive, druge pa vključujejo veliko neznanih dejavnikov. Če poznamo odbojnost vsaj dveh točk na površju, najbolje zelo temne in zelo svetle, lahko določimo prenosno funkcijo senzorja in s tem prave vrednosti odboja za vse piksele.

Relativno dobre rezultate dobimo tudi z uporabo *linearne regresije*. Pri tej primerjamo vrednosti odboja v infrardečem delu spektra (četrty kanal za Landsat in tretji za SPOT) z vrednostmi v vidnem delu in določimo premico, ki najbolje opiše njihovo po-



Slika 15.7: Regresijska krivulja pri primerjavi infrardečega in vidnega kanala določa prispevek atmosfere.

vezavo. Presečišče premice z ordinato določa prispevek atmosferskih pojavov k celotni odbojni vrednosti (slika 15.7).

15.4 Popravki osvetlitve in vpliva terena

Signal, ki ga zaznajo senzorji na satelitih ali letalih, je odvisen od velikega števila dejavnikov, od katerih so najpomembnejši:

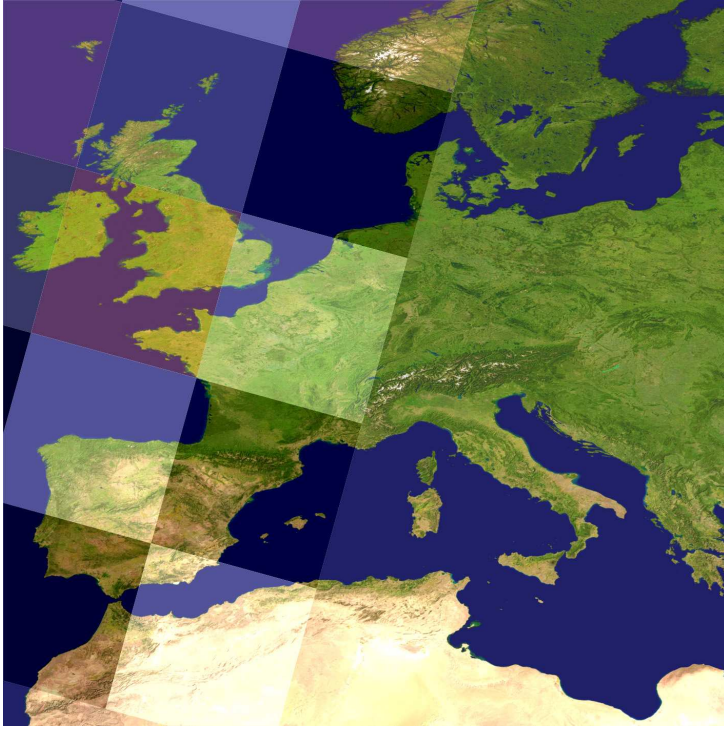
- odbojnost površja,
- narava in stopnja atmosferskih vplivov,
- naklon in usmerjenost površja glede na položaj Sonca,
- vidni kot senzorja in
- položaj Sonca.

Razlike v osvetlitvi in geometriji gledanja (za optične senzorje) lahko odpravimo z modeliranjem geometrije opazovanja. Pri tem upoštevamo razdaljo med površjem in senzorjem ter položaja Sonca in senzorja. Modeliranje je pogosto nujno potrebno, še posebej kadar želimo primerjati podobe, zajete ob različnih dnevih ali urah, oziroma če želimo ustvariti *mozaik* več posnetkov istega senzorja in želimo ohraniti enakomerno osvetlitev (slika 15.8).

Spremembe v položaju Sonca lahko določimo, če predvidevamo, da površje svetlobo odbija po Lambertovo.¹ To le redko drži za naravne površine, je pa dovolj za približek prvega reda. Če je zenitni položaj Sonca (merjen od navpičnice) enak θ in opazovana radianca L , potem je normirana radianca L_n enaka

$$L_N = \frac{L}{\cos(\theta)}. \quad (15.4)$$

¹Do Lambertovega sipanja prihaja na grobih površinah. Zanj je značilno, da je intenziteta sipanja neodvisna od kota gledanja, torej od položaja opazovalca.



Slika 15.8: Mozaičenje ustvari iz posameznih satelitskih posnetkov (levo) navidezno enega samega (desno).

Postopek lahko izboljšamo s tako imenovano *topografsko normalizacijo*, ki upošteva obliko opazovanega reliefa (digitalni model višin). Metoda nadomesti zenitni položaj Sonca v enačbi 15.4 z vpadnim kotom (α), ki ga določajo višina (θ_s) in azimut Sonca (ϕ_s) ter naklon (θ_n) in usmerjenost (ϕ_n) površja

$$L_{TN} = \frac{L}{\cos(\alpha)}. \quad (15.5)$$

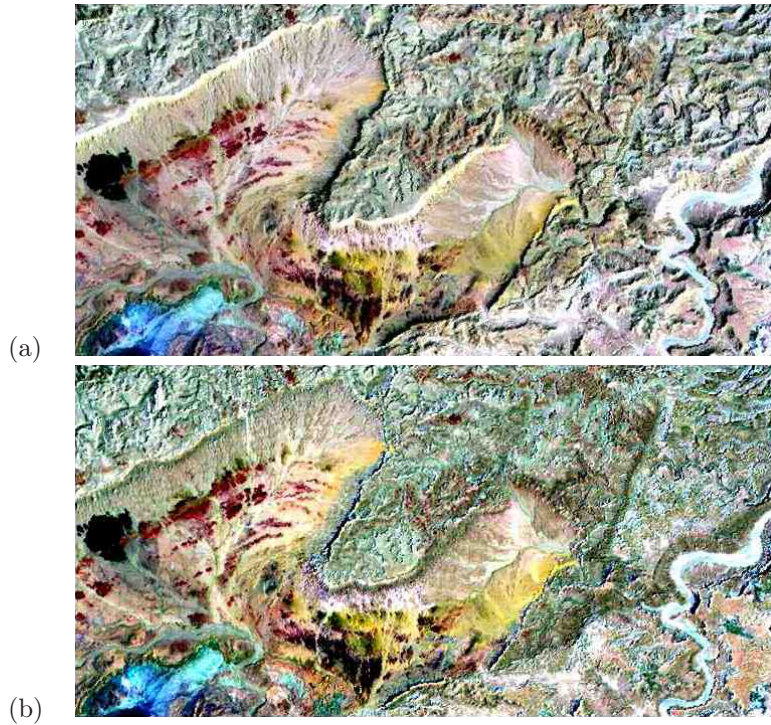
Pri tem velja

$$\cos(\alpha) = \cos(\pi - \theta_s) \cos(\theta_n) + \sin(\pi - \theta_s) \sin(\theta_n) \cos(\phi_s - \phi_n). \quad (15.6)$$

Še bolj zapleten pa je Minnaertov model, ki upošteva dejstvo, da opazovana površina valovanja ne odbija v vse smeri enako. Rezultat topografske normalizacije je podoba, pri kateri ni razlik zaradi položaja posameznega predmeta. Osvetlitev je enaka na senčnih in sončnih pobočjih in je preračunana na ravnino.

15.5 Kalibracija podatkov

Če želimo vrednosti na podobah daljinskega zaznavanja povezati s fizikalnimi količinami, moramo opraviti kalibracijo podatkov oziroma radiometrično kalibracijo kanalov.



Slika 15.9: Topografska normalizacija posnetka Landsat. Izvirni posnetek (a) vsebuje vpliv reliefa in položaja Sonca, medtem ko je normiran posnetek (b) prilagojen opazovanju ravnine (Richter, 2006).

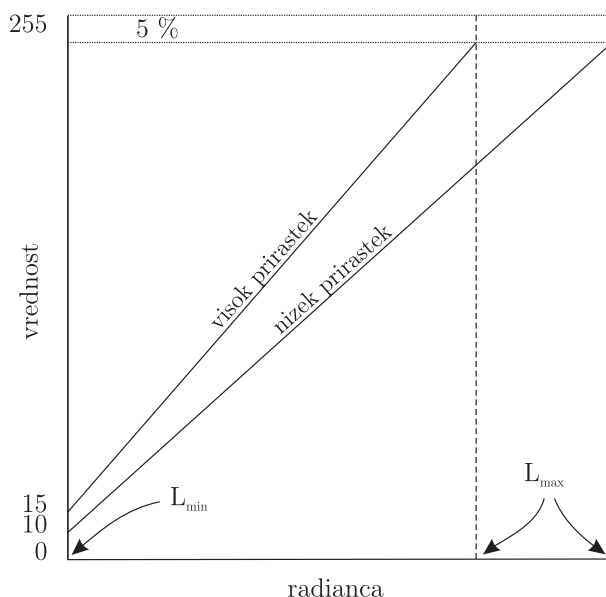
Z drugimi besedami to pomeni, da moramo določiti energijo odboja ali sevanja površine. To lahko storimo, če dovolj dobro poznamo delovanje senzorja in način pretvorbe analognega signala v numerično vrednost. Z obratnim postopkom lahko določimo absolutne vrednosti za energijo zaznanega valovanja, in to za vsak piksel posebej. Na ta način lahko opravimo natančne časovne primerjave podob, zajetih z enakimi ali različnimi senzorji (na primer Landsat, SPOT ...). Poleg tega lahko podatke daljinskega zaznavanja uporabimo v fizikalnih ali biofizikalnih modelih.

Če poznamo prenosno funkcijo senzorja, torej način določanja digitalnih vrednosti glede na izmerjeno energijo, lahko opravimo obratni postopek kalibracije. Oglejmo si omenjeni postopek nekoliko podrobneje v primeru posnetkov Landsat. Senzor Landsat ETM+ deluje v dveh načinih, z nizkim in visokim prirastkom (low, high gain). Če je pričakovan majhen razpon vrednosti, se uporablja delovanje z visokim prirastkom, sicer pa z nizkim. Tako vedno dobimo podobe z velikim kontrastom (slika 15.10).

Pretvorba med digitalnimi vrednostmi, ki jih vsebuje podoba, in radianco poteka z upoštevanjem zveze

$$L_{\lambda} = \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{DN_{MAX}} DN_{\lambda} + LMIN_{\lambda}. \quad (15.7)$$

Pri tem so $LMAX_{\lambda}$ največja, $LMIN_{\lambda}$ najmanjša radianca in DN_{λ} digitalna vrednost v kanalu λ . DN_{MAX} pa je največji obseg vrednosti. Enačbo lahko poenostavimo,



Slika 15.10: Delovanje senzorja Landsat ETM+ z nizkim in visokim prirastkom.

če definiramo prirastek (gain) G in zamik (offset) O :

$$\begin{aligned}
 G_{\lambda} &= \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{DN_{MAX}} \\
 O_{\lambda} &= LMIN_{\lambda} \\
 L_{\lambda} &= G_{\lambda} DN_{\lambda} + O_{\lambda}
 \end{aligned} \tag{15.8}$$

Radianca L je podana v $W/m^2 srad \mu m$. Podatki za kalibracijske parametre spremljajo vsako podobo (v tako imenovani metapodatkovni datoteki) in se le malenkostno spreminjajo s časom. Podatke za kalibracijo novejših podob Landsat ETM+ podaja tabela 15.2.

Landsat vsebuje poleg optičnih, bližnjih in srednjih infrardečih kanalov tudi termi-

Kanal	Nizek prirastek		Visok prirastek	
	$LMIN$	$LMAX$	$LMIN$	$LMAX$
1	-6,2	293,7	-6,2	191,6
2	-6,4	300,9	-6,4	196,5
3	-5	234,4	-5	152,9
4	-5,1	241,1	-5,1	157,4
5	-1	47,57	-1	31,06
6	0	17,04	3,2	12,65
7	-0,35	16,54	-0,35	10,8
8	-4,7	243,1	-4,7	158,3

Tabela 15.2: Kalibracijski parametri za senzor Landsat ETM+ (veljajo za podobe ustvarjene po juliju 2000).

čnega (šesti kanal), ki omogoča določitev temperature površja. Radianco moramo v tem primeru pretvoriti v temperaturo (izmerjeno na satelitu), kar storimo z upoštevanjem zveze

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_6} + 1\right)}. \quad (15.9)$$

Pri tem je T temperatura v stopinjah Kelvina in L_6 radianca v šestem (termičnem) kanalu. K_1 in K_2 sta kalibracijski konstanti, ki za satelit Landsat 7 znašata $K_1 = 666,09 \text{ W/m}^2 \text{ srad } \mu\text{m}$ in $K_2 = 1282,71 \text{ K}$.

Vprašanja

1. Kaj je predobdelava podob?
2. Kako odpravljamo napake v delovanju senzorja?
3. Kaj je georeferenciranje in kako poteka?
4. Opiši tehnike prevzorčenja podob.
5. Kako potekajo atmosferski popravki podob?
6. Opiši popravke osvetlitve in topografsko normalizacijo.
7. Kaj je kalibracija podatkov in zakaj je pomembna?

16 Izboljšanje podob

Vizualna analiza in interpretacija omogočata hitro pridobivanje osnovnih informacij o zemeljskem površju. Prednost digitalnih podob v primerjavi z analognimi slikami je, da prve omogočajo preprosto spreminjanje videza. Tako lahko ustvarimo prikaze, ki so prilagojeni določenemu namenu in posameznemu interpretatorju. V tem poglavju se bomo ukvarjali s postopki za *izboljšanje podob*, ki vključujejo vse tehnike, s katerimi spremenimo videz podobe in s tem olajšamo vizualno interpretacijo.

Radiometrične popravke zaradi različne osvetljenosti, atmosferskih razmer in značilnosti senzorja pogosto opravijo v sprejemni postaji, še preden podatki pridejo do končnega uporabnika. Kljub temu pa posnetki v »surovi« obliki še niso najbolj primerni za vizualno interpretacijo. Naprave za daljinsko zaznavanje, še posebej tiste na satelitih, morajo zaznati zelo širok razpon energij. Pripravljene morajo biti na najrazličnejše odbojnice in vire elektromagnetnega valovanja, na katere lahko naletijo. Zelo različne »tarče«, na primer gozdovi, puščave, ledeniki, vode in podobno, imajo zelo različne spektralne odzive. Nemogoče je najti eno samo radiometrično korekcijo, ki bi bila primerna za vse posnetke. Zato moramo za vsak namen in vsako podobo poiskati svoj razpon kontrastov in za vsak primer posebej opraviti spremembe svetlosti. Podatki v surovih podobah praviloma zasedejo le majhen del celotnega razpona vrednosti. *Izboljšanje kontrasta* pomeni spreminjanje prvotnih vrednosti tako, da se uporabi širši del razpoložljivih, s čimer povečamo razliko med predmeti in njihovim ozadjem.

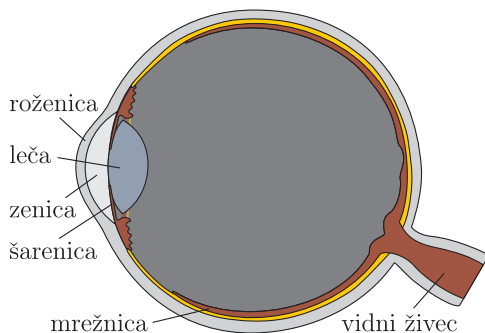
Prostorsko filtriranje je naslednja množica funkcij digitalne obdelave, ki lahko precej izboljša videz podob. S filtri lahko določene lastnosti poudarimo ali zabrišemo. Pri tem upoštevamo prostorsko frekvenco podobe, ki je neposredno povezana s teksturo (poglavje 14). Gre za krajevno spreminjanje vrednosti, ki se pojavljajo na podobi. »Groba« tekstura pomeni območja, kjer se na kratkih razdaljah, to je z veliko frekvenco, močno spreminja svetlost. »Mehka« območja pa imajo po drugi strani le rahlo spreminjanje svetlosti, do katerega pride na velikih razdaljah. Filtri na podobi izberejo in poudarijo ploskve s hitrim ali počasnim spreminjanjem vrednosti.

Preden se lotimo pregleda posameznih tehnik, si oglejmo osnovne lastnosti človeškega vida. Te so namreč pomembne za razumevanje »izboljšanja« in interpretacije podob.

16.1 Človeški vid in barvni prostori

O delovanju človeškega vida obstaja veliko teorij, ki se ukvarjajo tako s fiziološkimi kot psihološkimi dejavniki. Koncepti, kot so rdeče in modro, svetlo ali temno, so neposredno

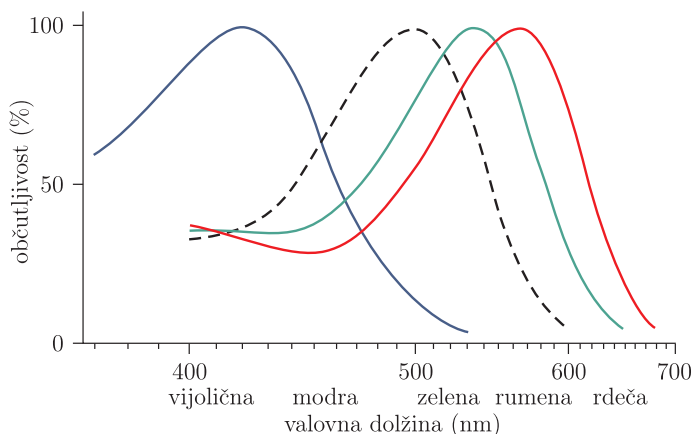
povezani s posameznikovo reakcijo na zunanje (fizične) dražljaje (stimulus). Svetlobo, ki skozi zenico pride do očesa, leča projicira na retino (slika 16.1). Retina ali mrežnica je tanka plast za svetlobo občutljivih organov, ki se združujejo v vidni živec. Mrežnica je sestavljena iz približno sto milijonov paličasto in pet milijonov konusno oblikovanih celic. Vsaka izmed njih je prek sinapse povezana z živcem. Spremembe v količini svetlobe, ki pade na fotodetektorje, ustvarijo signale, ki prek živcev potujejo v možgane – tisti iz levega očesa gredo v desno stran možganov in tisti iz desnega v levo.



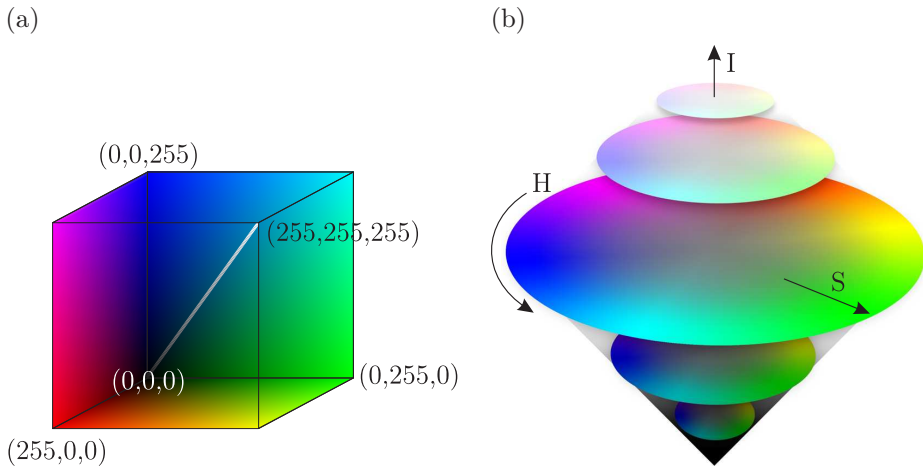
Slika 16.1: Prerez človeškega očesa.

Paličaste in konusne celice delujejo različno in so namenjene različnemu »gledanju«. Paličaste celice so občutljive na svetlobo majhne intenzitete, omogočajo torej gledanje v mraku, in ne podajajo barvne informacije. Konusne celice pa omogočajo ločevanje različnih barvnih odtenkov, vendar pa zato potrebujejo več svetlobe. Obstajajo tri vrste konusnih celic, ki so občutljive na tri osnovne barve (rdečo, zeleno in modro). Poskusi so pokazali, da je mnogo manj celic občutljivih na modro barvo kot na rdečo ali zeleno in da se občutljivosti posameznih barv med seboj prekrivajo (slika 16.2).

Idejo pridobivanja poljubne barve z dodajanjem treh osnovnih lahko posplošimo v tako imenovani *barvni prostor RGB*. Slika 16.3 (a) prikazuje barvno kocko RGB (red,



Slika 16.2: Spektralna občutljivost človeškega očesa. Črtkano je prikazana občutljivost paličastih, modro, zeleno in rdeče pa konusnih celic.



Slika 16.3: Barvna modela (a) RGB in (b) HSI (Wikipedia, 2006a).

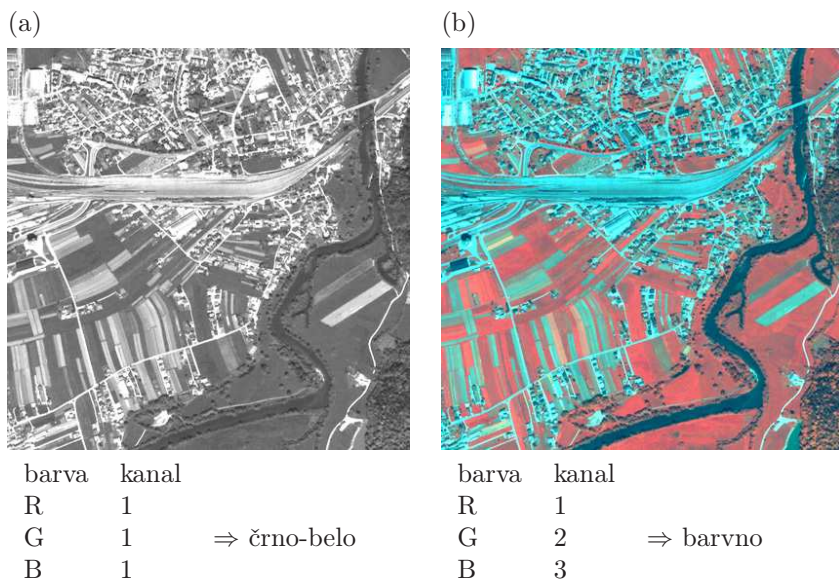
green, blue ali rdeča, zelena, modra). Izhodišče kocke označuje črna barva, njene osi pa ustrezajo posameznim osnovnim barvam. Vsako barvo lahko predstavimo s tremi koordinatami, to je z njenim položajem v kocki. Beli barvi ustrezajo maksimalne vrednosti rdeče, zelene in modre. Črti, ki povezuje izhodišče (črno) z maksimumom (belo), ustrezajo različni odtenki sive barve. Idejo dodajanja posameznih barv izkorišča televizijski zaslon (in na njem temelječi računalniški monitorji), ki s »prižiganjem« različno obarvanih fosforescenčnih območij ustvarjajo barvno sliko.

Poleg modela RGB obstaja še nekaj drugačnih pogledov na naše zaznavanje barve. *Model HSI* (hue, saturation, intensity oziroma barva, nasičenost in intenziteta) je človeški predstavi bližje kot model RGB. Barvi ustreza valovna dolžina svetlobe, ki jo vidimo, in torej podaja ime barve, na primer rdeča, modra, oranžna, turkizna ... Stopnjo čistosti barve določa nasičenost, pri čemer je čista barva 100 odstotno nasičena. Intenziteta pa je merilo za svetlost barve. Predstavitev modela HSI podaja dvojni stožec, ki je prikazan na sliki 16.3 (b)¹. Barvi ustreza kot na vrhnji ploskvi, pri čemer so osnovne barve postavljene v oglišča šestkotnika (rdeča pri 0°, zelena pri 120° in modra pri 240°). Intenziteta je podana z osjo, ki je normalna na barvo, nasičenost pa predstavlja oddaljenost od intenzitetne osi. Popolnoma nasičene in najbolj intenzivne barve ležijo na stranicah barvnega dvojnega stožca. Črna in sive barve, ki ležijo v koordinatnem izhodišču oziroma vzdolž intenzitete, nimajo barve, njihova nasičenost pa je enaka nič. Zaradi preprostosti in jasnosti barvnega modela RGB v daljinskem zaznavanju druge modele – na primer CMYK ali CIE $L^*a^*b^*$, pa tudi HSI – uporabljamo le izjemoma, na primer pri združevanju podatkov pankromatskih in večspektralnih senzorjev.

Delovanje senzorjev daljinskega zaznavanja se nekoliko razlikuje od delovanja človeških oči. S slednjimi barve vidimo zato, ker naše oči zaznajo celotni del vidnih valovnih dolžin, možgani pa pridobljene informacije obdelajo in jih posredujejo kot različne barve. Precej drugače bi bilo, če bi naše oko zaznalo samo del valovnih dolžin oziroma več njihovih *pasov*. Tako namreč deluje večina senzorjev, ki jih uporabljamo pri daljinskem zaznavanju. Informacije, ki jih pridobijo v ozkem spektralnem območju, zaznajo in shranijo v *kanal* oziroma *pas* (channel, band).

¹Slika je nastala po predlogi, ki jo je pripravil Alexandre Van de Sande (Wikipedia, 2006a).

Pri interpretaciji podob daljinskega zaznavanja se običajno srečamo z barvnim prostorom RGB, kjer posamezne kanale združimo in jih prikažemo z uporabo treh osnovnih barv (modre, zelene in rdeče). Podatke vsakega izmed treh pasov prikažemo v eni od osnovnih barv, pri čemer njegova svetlost določa intenziteto. Z mešanjem različnih razmerij osnovnih barv ustvarimo celotno barvno paleto.



Slika 16.4: Primerjava črno-belega (a) in barvnega (b) prikaza podobe.

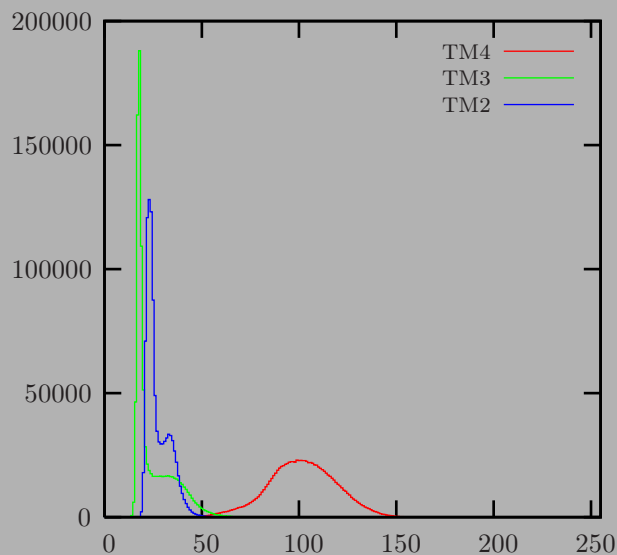
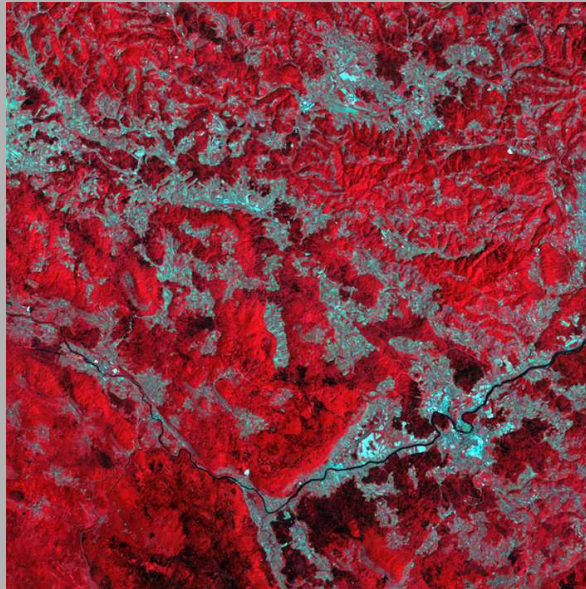
Kadar z opisanim postopkom prikažemo en sam kanal, ga prikažemo pravzaprav hkrati z vsemi tremi osnovnimi barvami. Ker so svetlosti vseh pikslov enake pri vseh treh barvah, dobimo črno-belo sliko (slika 16.4 a), ki vsebuje sivine od črne do bele. Kadar pa prikažemo z osnovnimi barvami različne kanale, so svetlosti praviloma različne za posamezno barvo in s kombinacijo kanalov in osnovnih barv dobimo barvno sliko (slika 16.4 b). Kadar tako prikažemo vidni del spektra oziroma modri, rdeči in zeleni kanal v ustreznih barvah, dobimo naravni barvni prikaz. Poljubna druga kombinacija vidnih ali prikaz nevidnih kanalov pa ustvarita lažno barvno podobo.

16.2 Izboljšanje kontrasta

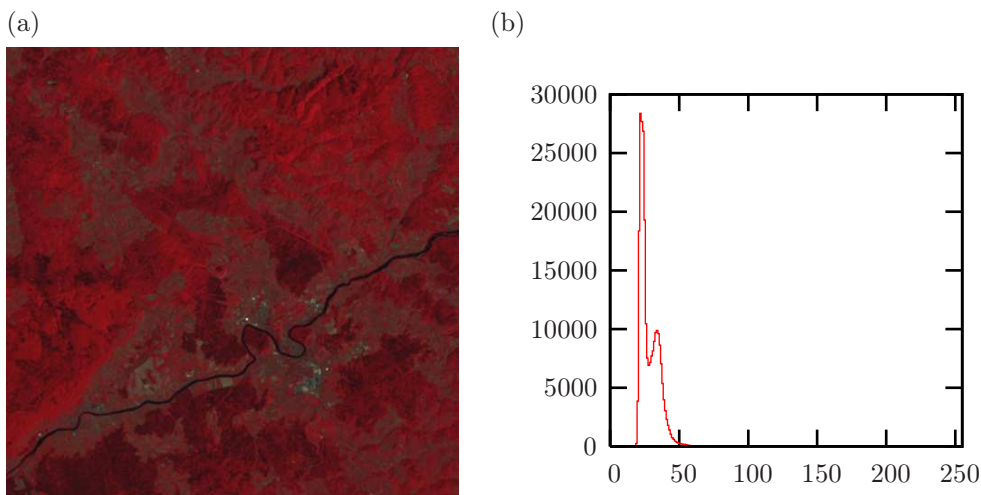
Senzorji na satelitih in letalih morajo, kot rečeno, zaznati širok razpon vrednosti, od zelo nizkih (na primer na oceanih) do zelo visokih (na primer snega ali ledu). Zato je le malo verjetno, da bi katero območje zajelo celoten mogoč radiometrični razpon vrednosti, od 0 do $2^n - 1$ (o radiometrični ločljivosti smo govorili v poglavju 7.3). Vrednosti v barvnem modelu RGB so zato nakopičene v zelo majhnem območju, blizu sivinske osi. Z drugimi besedami to pomeni, da ne moremo ločiti podrobnosti na podobi, ki je v fotografskem žargonu pod- ali presvetljena. Če bi lahko razpon vrednosti, ki jih podoba zavzame, raztegnili na celotno območje, bi se povečal kontrast med svetlimi in temnimi deli, ohranili pa bi njihova medsebojna razmerja.

Histogram

Za razumevanje izboljšanja kontrasta je bistvenega pomena *histogram podobe*. Histogram je grafična predstavitev svetlih vrednosti, ki jih podoba vsebuje. Svetlost – oziroma vrednosti od 0 do 255 v primeru osembitnih podatkov – je prikazana vzdolž abscisne osi grafa. Pogostost ali frekvenca pojavljanja vsake vrednosti na podobi pa je podana kot ordinata.



Na sliki je prikazan posnetek Landsat TM ter histogrami kanalov 2, 3 in 4. Vidimo lahko, da odbojne vrednosti, še posebej za kanala 2 in 3, zavzemajo zelo majhen del razpoložljivega razpona.



Slika 16.5: Podoba satelita Landsat, prikazana z vrednostmi, ki jih je zaznal senzor (a). V rdeči, zeleni in modri barvi so prikazani kanali 4 (infrardeči), 3 (rdeči) in 2 (zeleni). Pripadajoči histogram vrednosti za kanal 3 (b) kaže, da je zajet le majhen del vseh razpoložljivih vrednosti. Podoba je popolnoma nekontrastna in zato neprimerna za interpretacijo.

16.2.1 Linearni razteg kontrasta

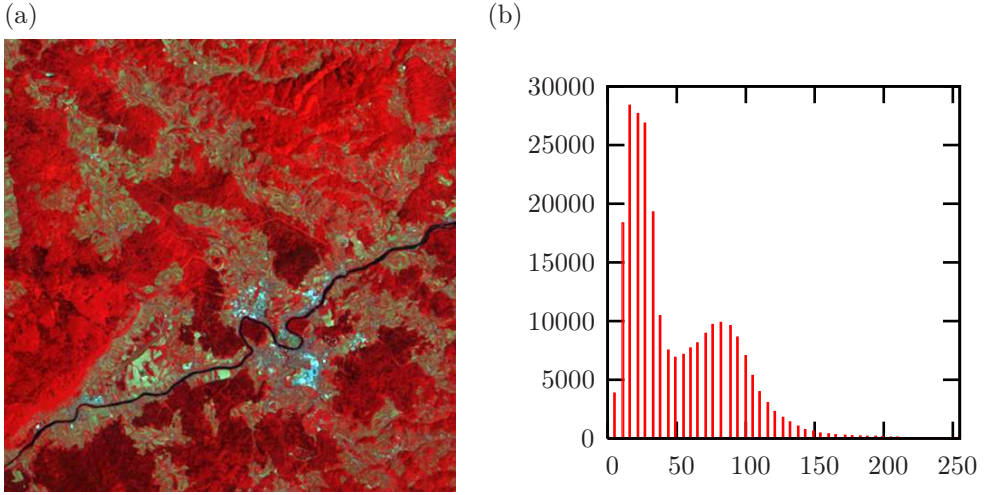
S spreminjanjem razpona vrednosti na podobi lahko podatke izboljšamo na več načinov. Obstaja namreč kar nekaj različnih tehnik in metod za povečanje kontrasta in poudarjanje podrobnosti. Najpreprostejša tehnika izboljšanja je *linearni razteg kontrasta*. Pri njej poiščemo najmanjšo in največjo vrednost v histogramu, čemur ustrezata najmanjša (I_{min}) in največja svetlost (I_{max}). Histogram nato raztegnemo s transformacijo, ki zapolni celotno območje vrednosti ($0 - R_{max}$, kjer je R_{max} največja radiometrična vrednost), pri osembitnih podobah je to od 0 do 255. Če je I prvotna vrednost piksla, potem je nova vrednost enaka

$$I_{lin_razt} = R_{max} \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}. \quad (16.1)$$

Recimo, da imamo podobo z najmanjšo vrednostjo v histogramu 84 in z največjo 153. Zasedenih 70 sivin predstavlja manj kot tretjino od možnih 256 vrednosti. Linearni razteg histograma omejeni del vrednosti preslika na celoten razpon od 0 do 255. S to potezo povečamo kontrast tako v svetlih kot v temnih delih podobe in olajšamo vizualno interpretacijo. Razteg histograma posnetka s slike 16.5 prikazuje slika 16.6.

Zavedati se moramo, da so vrednosti pikslov na podobah diskretne, torej 0, 1, 2, 3 ..., in da so take tudi vrednosti v izhodni podobi. Z drugimi besedami – po raztegu histograma ostanejo določene vrednosti nezasedene. Če bi na primer želeli razpon med 0 in 5 raztegniti na vrednosti med 0 in 255, bi imeli v izhodni podobi le vrednosti 0, 51, 102, 153, 204 in 255.

Opisani postopek linearne raztega histograma upošteva samo najmanjšo in največjo vrednost na podobi. Pri tem gre lahko za posamezne vrednosti, ki so daleč od »praga« histograma, kar vpliva na premajhen razteg kontrasta. Zato je smiselno upora-



Slika 16.6: Linearni razteg kontrasta izboljša jasnost podobe (a). Histogram (b) je razširjen na širši razpon vrednosti, ki pa niso v celoti zastopane.

biti tako imenovani *linearni razteg z nasičenjem* (saturacijo), pri katerem na spodnjem in zgornjem delu histograma odrežemo del vrednosti (ekstreme). Praviloma gre za nekaj odstotkov, na primer 1 % do največ 10 %, simetrično pri največjih in najmanjših vrednostih. Transformacijo podaja nekoliko spremenjena enačba 16.1, namesto največje in najmanjše vrednosti namreč upoštevamo spodnjo in zgornjo mejo nasičenja

$$I_{lin_razt_sat} = \begin{cases} 0 & : I \leq I_{s_min} \\ R_{max} \frac{I - I_{s_min}}{I_{s_max} - I_{s_min}} & : I_{s_min} < I < I_{s_max} \\ R_{max} & : I \geq I_{s_max} \end{cases} \quad (16.2)$$

Vsi piksli, ki so manjši od spodnje meje I_{s_min} , dobijo vrednost 0, tisti, ki so večji od zgornje meje I_{s_max} pa dobijo vrednost R_{max} .

Pogosto je smiselno histogram izboljšati samo v omejenem delu. Recimo, da opazujemo izliv reke v morje in da voda zavzame relativno nizke vrednosti med 40 in 74, kar je zelo majhen del celotnega histograma. Če bi želeli opazovati samo vodne površine, denimo da nas zanima odlaganje sedimentov, lahko omenjeno območje (40 do 74) raztegnemo na celoten razpon vrednosti (med 0 in R_{max} , na primer 255). Vsi piksli pod spodnjim pragom dobijo vrednost 0, tisti nad zgornjim pa R_{max} , kar pomeni, da v nevodnih območjih izgubimo vse podrobnosti, pridobimo pa širok razpon vrednosti za opazovanje sedimentov.

Linearni razteg kontrasta je za interpretacijo podob izredno pomemben, saj močno izboljša kontrast in ohrani razmerja med vrednostmi. Večina programov za obdelavo geografskih podob ga, najpogosteje z nasičenjem, uporablja kot privzeti samodejni razteg pri prikazu posnetkov.

16.2.2 Uravnoteženje histograma

Linearni razteg histograma ni vedno najboljši, saj podobe same po sebi praviloma ne vsebujejo linearno porazdeljenih vrednosti. Zato je pogosto primerneje uporabiti kako

Vpogledna tabela

Večina programov za obdelavo podob daljinskega zaznavanja omogoča uporabo tako imenovane *vpogledne tabele* (lookup table, LUT). Slednja omogoča preslikavo vrednosti podobe v vrednosti namenjene prikazu na zaslonu (ali nadaljnji obdelavi). Vpogledna tabela vsebuje seznam vhodnih in njim ustreznih izhodnih vrednosti ter deluje kot nekakšen vmesnik med datoteko in zaslonom.

Prednost vpogledne tabele se pokaže predvsem pri izboljšanju kontrasta. Namesto, da bi spremenili (originalne) vrednosti v sami podobi, samo zamenjamo vpogledno tabelo, datoteka s podatki senzorja pa ostane nespremenjena. Prikaz podob je z uporabo vpogledne tabele bolj zapleten, saj moramo prebrati vrednost, jo pretvoriti glede na tabelo in šele nato poslati na zaslon. Zaradi velike zmogljivosti današnjih računalnikov pa je tovrstna operacija praktično neopazna.

V nadaljevanju je podan primer vpogledne tabele, pri kateri je bil opravljen linearni razteg kontrasta na vrednosti med 4 in 12.

<i>Datoteka</i>	<i>Zaslon</i>
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	2
6	4
7	6
8	8
9	9
10	11
11	13
12	15
13	15
14	15
15	15

drugo tehniko izboljšanja histograma, na primer *uravnoteženje histograma* (histogram equalization). Pri uravnoteženju histograma je več vrednosti namenjenih tistim odbojem, ki v podobi nastopajo pogostejše. Tako se precej povečajo podrobnosti v tistih svetlostnih delih podobe, kjer jih je več, medtem ko se v delih, kjer jih je manj, kontrast zmanjša.

Osnovna ideja uravnoteženja histograma je poiskati porazdelitev pikslov, pri kateri so vse vrednosti zastopane približno v enaki meri. Na ta način povečamo entropijo podobe, ki je merilo za njeno informacijsko vsebino. Kot smo že omenili, imajo podobe diskretne vrednosti, zato tudi po uravnoteženju v histogramu niso vse vrednosti zastopane enako. Nekatere intenzitete namreč vsebujejo veliko pikslov, ki pa jih ne moremo razdeliti v sosednje vrednosti.

Postopek uravnoteženja histograma je, kljub na videz zapleteni osnovi, relativno preprost. Najprej je treba izračunati število pikslov za posamezno vrednost v uravnoteženem histogramu. To vrednost (n_t) dobimo z deljenjem števila vseh pikslov (N) s številom mogočih vrednosti (R_{max})

$$n_t = \frac{N}{R_{max}}. \quad (16.3)$$

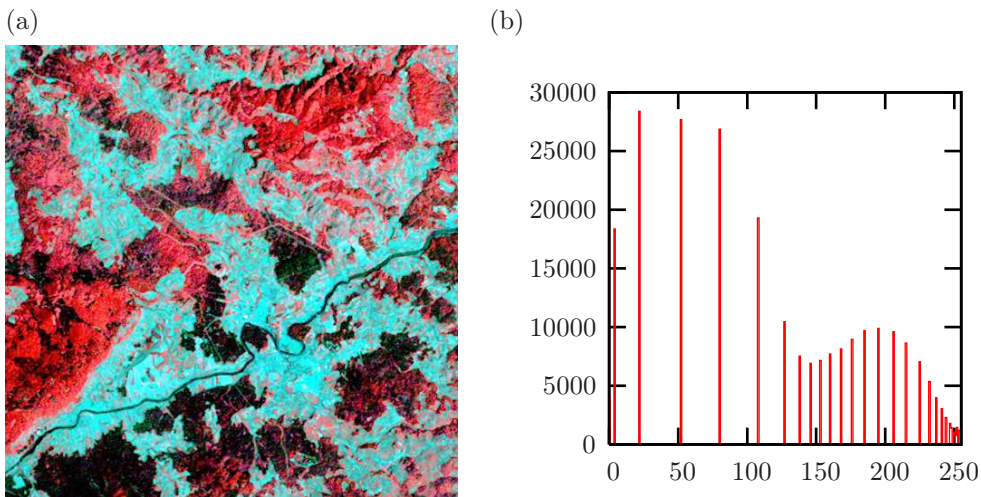
Nato histogram podobe spremenimo v kumulativni histogram, to je seštevek vseh pikslov z vrednostmi, manjšimi od izbrane. Za digitalno vrednost j je ta torej

$$c_j = \sum_{i=0}^j n_i. \quad (16.4)$$

Pri tem je n_i število pikslov z intenziteto i . Izhodna vrednost, ki ustreza vhodni vrednosti j , je zaokroženo razmerje med kumulativnim številom pikslov in teoretičnim

<i>Prvotna vrednost</i>	<i>Število pikslov</i>	<i>Kumulativno število</i>	<i>Nova vrednost</i>
0	12957	12957	0
1	21278	34235	0
2	33805	68040	1
3	95918	163958	2
4	117716	281674	4
5	84421	366095	5
6	71698	437793	7
7	92569	530362	8
8	81648	612010	9
9	72759	684769	10
10	64723	749492	11
11	86180	835672	13
12	79634	915306	14
13	33162	948468	15
14	28550	977018	15
15	22982	1000000	15

Tabela 16.1: Uravnoteženje histograma zahteva izračun kumulativnega indeksa, teoretičnega števila pikslov v razredu in novih digitalnih vrednosti podobe.



Slika 16.7: Uravnoteženje ustvari zelo kontrastno podobo (a) z enakomerno razporejenimi vrednostmi v histogramu (b).

številom pikslov za posamezni razred

$$I_j = \frac{c_j}{n_t}. \quad (16.5)$$

Postopek spreminjanja histograma pri uravnoteženju je podan v preglednici 16.1. Primer velja za štiribitno podobo, ki ima torej šestnajst različnih sivinskih vrednosti, in je velika 1000 krat 1000 pikslov. V popolnoma uravnoteženem histogramu bi vsaki vrednosti ustrezalo $1\,000\,000/16 = 62\,500$ pikslov. Nove digitalne vrednosti ne zajemajo vseh možnosti, so pa enakomerneje razporejene (tabela 16.2). Razredi vrednosti z manjšim številom pikslov so združeni, tisti z večjim pa so porazdeljeni bolj narazen.

Učinek uravnoteženja histograma podobe s slike 16.5 (a) podaja slika 16.7. Rezultat je zelo kontrastna podoba, ki prikazuje podrobnosti tako v gozdovih, poljih in travnikih kot v naseljih. Pri gosto zastopanih vrednostih, kjer je največ pikslov in kjer želimo ločiti več podrobnosti, se je kontrast povečal, medtem ko se je zmanjšal pri manj zastopanih, kjer je manj pikslov in velika natančnost ni potrebna. Uravnotežene podobe so bolj jasne, jih je pa zaradi porušenega medsebojnega razmerja vrednosti težje interpretirati. Težavo lahko predstavlja tudi veliko število digitalnih vrednosti, ki jim ne ustreza noben piksel.

16.2.3 Gaussov razteg histograma

Naslednja metoda izboljšanja kontrasta, ki temelji na obliki histograma, je Gaussov razteg. Z njim poskušamo histogram prilagoditi normalni ali *Gaussovi porazdelitvi*.

Pri Gaussovi ali normalni porazdelitvi verjetnosti je verjetnostna gostota enaka

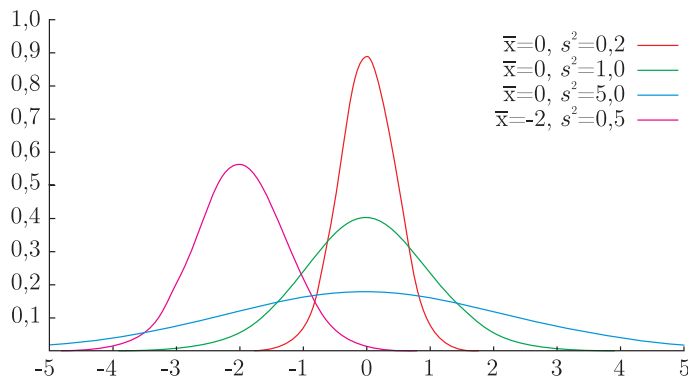
$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (16.6)$$

Pri tem je x vrednost spremenljivke in $\bar{x}$ njeno povprečje. Standardni odklon σ je vrednost, pri kateri verjetnost pade na $e^{-0,5}$ oziroma 0,607. To z drugimi besedami

<i>Nova vrednost</i>	<i>Število pikslov</i>
0	34235
1	33805
2	95918
3	0
4	117716
5	84421
6	0
7	71698
8	92569
9	81648
10	72759
11	64723
12	0
13	86180
14	79634
15	84694

Tabela 16.2: Število pikslov v odvisnosti od novih digitalnih vrednosti pri uravnoteženju histograma. Vsaki novi vrednosti ustreza približno enako število pikslov.

pomeni, da je pri normalni porazdelitvi 60,7 % vrednosti manj kot σ oddaljenih od povprečja. Obliko Gaussove krivulje pri različnih standardnih odklonih in povprečnih vrednostih prikazuje slika 16.8.



Slika 16.8: Normalna ali Gaussova porazdelitev.

Normalna porazdelitev je dobro poznana in uporabna marsikje, tudi pri izboljšanju kontrasta. Njena osnovna ideja je spremeniti vrednosti na podobi tako, da je njihovo povprečje in s tem največje število pikslov na sredini razpona razpoložljivih vrednosti, razpršenost pa je odvisna od namena uporabe podobe in je določena s standardnim odklonom.

Postopek Gaussovega raztega histograma je nekoliko podoben tistemu pri njegovem uravnoteženju. Ker se normalna porazdelitev razteza od $-\infty$ do $+\infty$, moramo zaradi praktičnih razlogov izbrati najmanjšo in največjo vrednost, na primer od -3σ do $+3\sigma$.

<i>Digitalna vrednost</i>	<i>Položaj v porazdelitvi</i>	<i>Verjetnost</i>	<i>Število pikslov</i>	<i>Kumulativno število</i>
0	-3,0	0,002	1775	1775
1	-2,6	0,005	5440	7215
2	-2,2	0,014	14208	21423
3	-1,8	0,032	31620	53044
4	-1,4	0,060	59968	113011
5	-1,0	0,097	96912	209923
6	-0,6	0,133	133460	343383
7	-0,2	0,157	156617	500000
8	0,2	0,157	156617	656617
9	0,6	0,133	133460	790077
10	1,0	0,097	96912	886989
11	1,4	0,060	59968	946956
12	1,8	0,032	31620	978577
13	2,2	0,014	14208	992785
14	2,6	0,005	5440	998225
15	3,0	0,002	1775	1000000

Tabela 16.3: Določitev števila pikslov za posamezno digitalno vrednost pri Gaussovem raztegu s trojnim standardnim odklonom.

<i>Prvotna vrednost</i>	<i>Število pikslov</i>	<i>Kumulativno število</i>	<i>Nova vrednost</i>
0	12957	12957	2
1	21278	34235	3
2	33805	68040	4
3	95918	163958	5
4	117716	281674	6
5	84421	366095	7
6	71698	437793	7
7	92569	530362	8
8	81648	612010	8
9	72759	684769	9
10	64723	749492	9
11	86180	835672	10
12	79634	915306	11
13	33162	948468	12
14	28550	977018	12
15	22982	1000000	15

Tabela 16.4: Za določanje novih digitalnih vrednosti pri Gaussovem raztegu primerjamo teoretično (tabela 16.3) in dejansko kumulativno število pikslov. Nova vrednost je določena s prvo vrednostjo kumulativnega histograma, ki preseže kumulativno vrednost porazdelitve.

<i>Nova vrednost</i>	<i>Število pikslov</i>
0	0
1	0
2	12957
3	21278
4	33805
5	95918
6	117716
7	156119
8	174217
9	137482
10	86180
11	79634
12	61712
13	0
14	0
15	22982

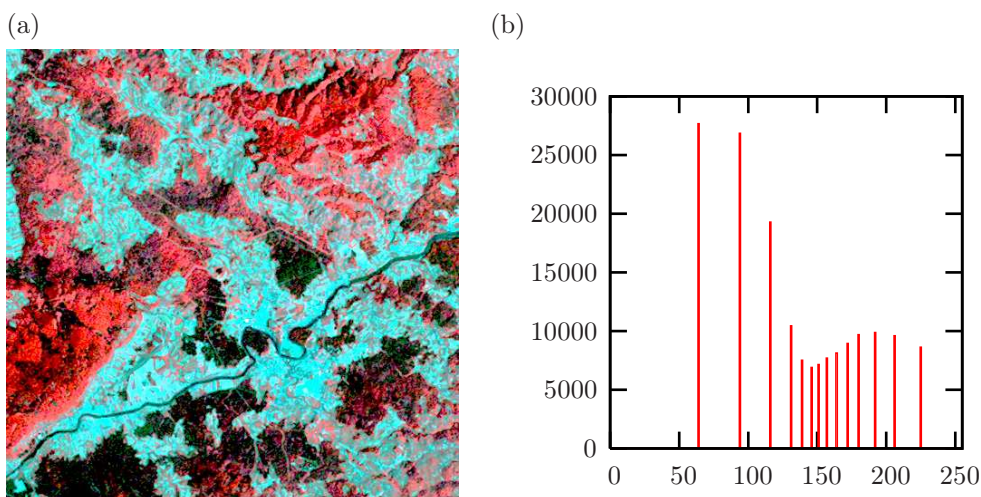
Tabela 16.5: Število pikslov v odvisnosti od novih digitalnih vrednosti pri Gaussovem raztegu. Opazimo lahko obliko normalne porazdelitve vrednosti.

Novima vrednostima 0 in R_{max} ustrezajo torej piksli, ki so za več kot tri standardne odklone oddaljeni od povprečja. Za vsako digitalno vrednost določimo število pikslov, ki bi jih morala imeti pri normalni porazdelitvi z določenim standardnim odklonom. Tabela 16.3 prikazuje normalno porazdeljene piksele na podobi. Gre za štiribitno podobo, ki lahko zavzame šestnajst svin, in je razporejena med -3σ in $+3\sigma$. Podano je število pikslov, ki bi posamezni vrednosti ustrezalo v primeru podobe velikosti 1000 krat 1000 pikslov. Za ustvarjanje Gaussovega raztega je najpomembnejše kumulativno število pikslov. Digitalna vrednost po raztegu je namreč določena s prvo vrednostjo kumulativnega histograma teoretične porazdelitve, ki preseže kumulativno vrednost dejanske porazdelitve.

Vzemimo enako podobo kot pri pri uravnoteženju histograma (tabela 16.1) in primerjajmo kumulativne vrednosti vhodne podobe (tabela 16.4) s teoretičnimi (tabela 16.3). Prva kumulativna vrednost v prvotni podobi je 12 957, prva teoretična kumulativna vrednost, ki jo preseže, pa je 21 423, čemur ustreza nova vrednost 2. Z enakim postopkom določimo preslikavo med vsemi prvotnimi in novimi intenzitetami podobe.

Nove digitalne vrednosti so porazdeljene približno normalno, tako kot pri uravnoteženju histograma pa tudi pri Gaussovem raztegu ne zavzamejo vseh mogočih vrednosti (tabela 16.5). Pogostost je največja v sredini razpona, proti skrajnim točkama pa se manjša. Slika 16.9 prikazuje Gaussov razteg kontrasta podobe s slike 16.5. Uporabljen je dvakratni standardni odklon, končna podoba je zato precej bolj kontrastna kot prvotna, oblika histograma pa je približno normalna.

Postopek spreminjanja kontrasta je popolnoma enak, če se ukvarjamo z enokanalnimi (pankromatskimi), večspektralnimi ali hiperspektralnimi podobami. Vrednosti vedno spremenimo posameznim kanalom, ki jih nato prikažemo v rdeči, zeleni in modri barvi. Ker želimo ohraniti vrednosti, ki jih je zaznal senzor, pogosto operacije opravimo le v vpogledni tabeli.



Slika 16.9: Gaussov razteg ustvari kontrastno podobo (a), ki ima normalno razporejen histogram (b).

16.3 Psevdobarvni prikazi

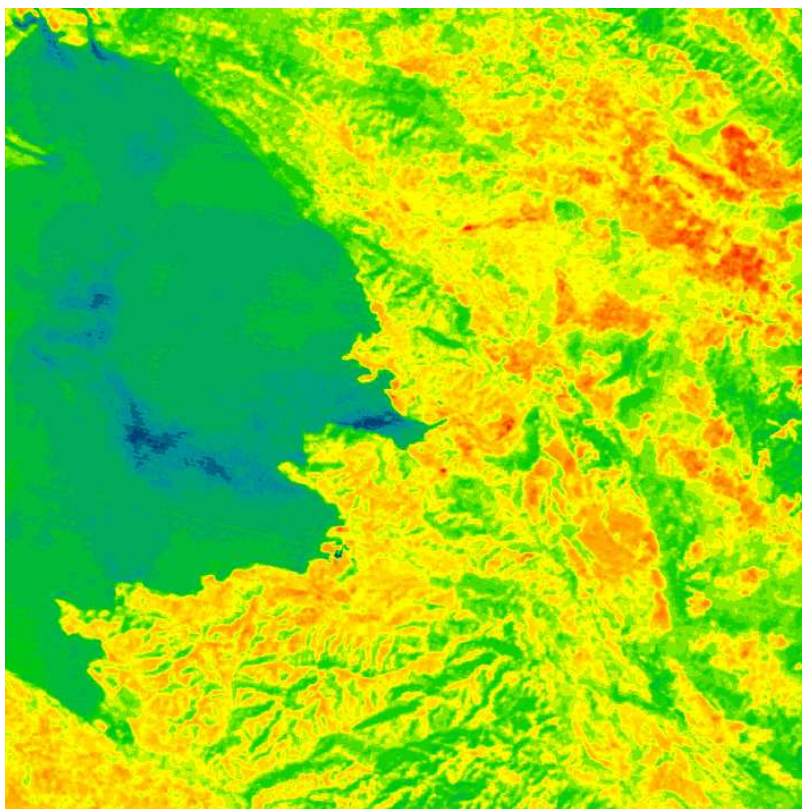
Črno-bele podobe zajamejo le majhen del barvnega prostora. V primeru prostora RGB gre za diagonalo med »črnim« in »belim« ogliščem, v prostoru HSI pa gre za navpično os oziroma intenziteto (slika 16.3). Pri tovrstnih podobah nimamo informacij o barvi ali nasičenosti, čeprav ju človeško oko bolje loči kot intenziteto. Za lažjo interpretacijo skušamo zato črno-bele podobe pretvoriti v barvne.

Iz sivinskih, to je enokanalnih, podob ne moremo dobiti pravih ali naravnih barvnih, saj prvotna podoba ne vsebuje podatka o barvi. Poleg tega ne moremo govoriti o lažno barvnih podobah, saj so slednje sestavljene iz podatkov treh kanalov, ki jih prikažemo v rdeči, zeleni in modri barvi. Spremembo črno-bele podobe v barvno zato imenujemo navidezno barvna ali *psevdobarvna pretvorba*. Obstajata dva najpomembnejša načina za ustvarjanje barvnih podob iz črno-belih, in sicer *razrez na nivoje* in *psevdobarvna transformacija*.

16.3.1 Razrez na nivoje

Pri razrezu na nivoje (density slicing) pasove ali območja sivih vrednosti prikažemo z eno samo barvo. Območja svin, na primer od 0 do 10 in tako dalje, imenujemo rezine ali nivoji. Celoten razpon vrednosti na podobi, na primer od 0 do 255, predstavimo z več deset barvnimi pasovi. S tovrstno pretvorbo črno-bele podobe učinkovito prikažemo različne homogene dele podobe, pri čemer pa izgubimo podrobnosti. Razlog za to je preprosto dejstvo, da relativno širok razpon vrednosti spremenimo v nekaj barvnih pasov.² Če na primer prikažemo 256 svin s 25 barvnimi nivoji, smo razpon zmanjšali na slabih 10 odstotkov. Seveda pa lahko s pravilnim izborom nivojev in barv znatno olajšamo interpretacijo.

²Človeške oči so sposobne zaznati približno deset milijonov barv. Z neposredno primerjavo lahko ločimo približno sto odtenkov iste barve, brez referenčnega vira pa le kakih deset.



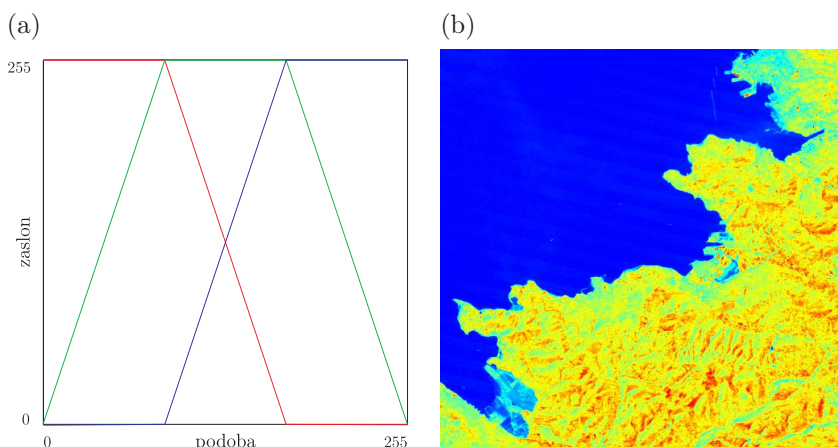
Slika 16.10: Razrez podobe temperatur na nivoje omogoča hitro določanje različno toplih območij. Slika prikazuje termogram Tržaškega zaliva in Slovenskega primorja, ki ga je posnel satelit Landsat.

Obseg razredov ter njim pripadajoče barve lahko določimo preprosto s podajanjem števila nivojev ali z bolj zapletenimi postopki, ki dajejo razrede z enakim številom pikslom, »naravno« ločene razrede in podobno. Praviloma pa gre za interaktivni postopek, pri katerem dinamično določamo obseg posameznih razredov in jim pripišemo primerne barve. Izbira barv je še posebej pomembna, saj želimo z njimi opazovalcu neposredno podati informacijo. Vizualno zaznavanje je namreč tako fiziološki kot tudi psihološki postopek. Naključni izbor barv pove več o samem operaterju kot o podobi, ki jo opazujemo.

Na sliki 16.10 je prikazana termična infrardeča podoba Slovenskega primorja, dobljena iz satelita Landsat. Prikazana je v barvah od temno modre do svetlo rdeče, ki opazovalcu dajeta občutek hladu oziroma toplote.

16.3.2 Pseudobarvna transformacija

Na sivinski podobi ima vsak piksel enake deleže rdeče, zelene in modre barve. Pri pseudobarvni transformaciji tovrstne deleže spremenimo, s čimer posameznim barvnim topovom pošljemo različne vrednosti in ustvarimo navidezno (psevd, tudi umetno) barvno podobo.



Slika 16.11: Pri psevdobarvni transformaciji črno-beli podobi spremenimo deleže posameznih barv (a) in ustvarimo navidezne barve (b).

Slika 16.11 (a) prikazuje primer barvne transformacije, pri kateri nižje vrednosti pomaknemo proti rdeči, srednje proti zeleni in višje proti modri. Za razliko od razreza na nivoje pri psevdobarvni transformaciji ne izgubimo razpona vrednosti, saj vsaki vhodni (sivi) vrednosti ustreza ena sama izhodna (barva). Res pa je, da sosednje barve, na primer 90 % in 91 % rdeče, med seboj težko ločimo. Dodatno težavo predstavljajo podobe z neuravnoteženim histogramom, pri katerih po transformaciji prevladuje določena barva. Preden opravimo tovrstno pretvorbo, si je smiselno ogledati porazdelitev sivin in po potrebi uporabiti eno od pretvorb, opisanih v poglavju 16.2.

16.4 Filtriranje

Postopki obdelave podob, ki smo jih opisali v prejšnjih razdelkih, spremenijo način prikaza podobe s spreminjanjem vrednosti, vpogledne tabele ali ustvarjanjem psevdobarv (upoštevajo samo posamezne piksele). V tem razdelku pa se bomo ukvarjali s filtriranjem – metodami, ki upoštevajo prostorske razsežnosti podatkov in različna merila na podobah (upoštevajo sosedbe).

S filtriranjem želimo, na primer, odstraniti šum na satelitskih posnetkih in jih tako zgladiti ali pa poudariti meje med homogenimi območji in povečati njihovo prepoznavnost. Pri tem opazujemo spremembe v intenziteti, ki so praviloma postopne in le redko nenadne, in govorimo o »prostorski frekvenci«. Slednja je določena s številom sprememb na enoto razdalje v izbrani smeri. Podoba z eno samo prostorsko frekvenco bi bila sestavljena iz zaporedja vzporednih črt.³

Podobo lahko zapišemo kot vsoto več delov, ki imajo različne prevladujoče frekvence:

$$\begin{aligned} \text{podoba} &= \text{ozadje} + \text{podrobnosti} + \text{šum} \\ &= \text{nizke frekvence} + \text{visoke frekvence} + \text{šum}. \end{aligned}$$

³Omenjeni pojav lahko v obliki majhnih sprememb intenzitete opazujemo pri posnetkih satelitov Landsat, ki imajo šest (MSS) oziroma šestnajst (TM in ETM+) snemalnih pasov za vsak detektor (razdelka 11.2.1 in 15.1.1).

Kljub temu, da ima šum praviloma visoko frekvenco, ni razloga, da bi ga pripisali samo podrobnostim ali samo ozadju. Šum je lahko namreč naključen, na primer zrnatost na radarskih posnetkih, ali periodičen, na primer posledica vrstične ali prečne snemalne naprave.

Podrobnosti z visoko frekvenco, to je hitrim spreminjanjem tonov, dopolnjujejo osnovo z nizko frekvenco, kjer se vrednosti spreminjajo počasi. Matematični postopek, ki podatke razdeli na različne frekvence, se imenuje Fourierjeva analiza. Ko posnetek razdelimo na različne komponente, lahko posamezne skupine poudarimo, zanemarimo ali v celoti odstranimo in tako dobimo spremenjeno podobo. Algoritmi, ki jih pri tem uporabljamo, se imenujejo filtri, ker izločijo (izberejo) določene frekvence. Filtri, ki prepuščajo visoke frekvence, in tako poudarijo podrobnosti, se imenujejo *visokoprepustni filtri*. Tistim, ki prepustijo nizke frekvence in podobo zato zgladijo, pa pravimo *nizkoprepustni filtri*.

V digitalni obdelavi podob se srečujemo s tremi tehnikami filtriranja (ločevanja komponent različnih frekvenc). Prva temelji na *diskretni Fourierjevi transformaciji*, s katero pretvorimo podobo v frekvenčni prostor, izberemo del frekvenc in nato naredimo obratno pretvorbo. Druga uporablja relativno preproste matematične postopke (na primer konvolucijo) v *prostorski domeni*. Tretja, novejša, pa izkorišča lastnosti *diskretne valčne transformacije* (discrete wavelet transform) in združuje tako prostorsko kot frekvenčno filtriranje. Tako Fourierjeva kot valčna transformacija sta pojmovno in izvedbeno zelo zahtevni, zato se bomo v naslednjih razdelkih ukvarjali samo s filtriranjem v prostorski domeni.

16.4.1 Konvolucijsko filtriranje

Najpogostejši način izvedbe filtriranja v prostorski domeni je konvolucijsko filtriranje. Pri tem uporabljamo premično »okno« velikosti nekaj pikslov, na primer 3 krat 3 ali 5 krat 5 ... Znotraj okna (računske matrike) opravimo določeno matematično operacijo in v izhodni sloj zapišemo izračunano vrednost. Dimenzija okna je praviloma liha, ker želimo imeti centralni piksel, to je tisti, v katerega bomo zapisali rezultat. Ni pa nujno, da je dimenzija enaka v obeh smereh, uporabimo lahko tudi filtre »nepravilnih« oblik, na primer 3 krat 5.

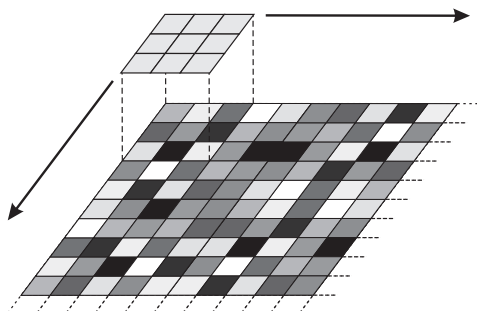
Filtrirno okno premikamo od piksla do piksla vzdolž stolpcev in vrstic ter izračune ponovimo za vse piksele podobe. Tako celotno podobo »sfiltriramo« in ustvarimo novo. S spreminjanjem računskih operacij znotraj okna in uteži, ki jih posamezni piksli v njem imajo, vplivamo na obliko (učinek) filtra. S posebno oblikovanimi računskimi okni lahko podobo zgladimo, jo izostrimo ali odkrijemo robove.

Splošno lahko postopek konvolucijskega filtriranja zapišemo kot

$$IF_{i,j} = \sum_{k=-a}^a \sum_{l=-b}^b F_{k,l} I_{i+k,j+l}.$$

Pri tem je I intenziteta vhodne podobe, IF intenziteta izhodne podobe, F pa filtrirna matrika. Indeksa i in j predstavljata slikovne koordinate, k in l sta položaja znotraj filtra, a in b pa določata njegovo velikost.

Na robovih podobe računsko okno sega deloma izven podobe (tem bolj, čim večja je njegova razsežnost). Manjkajoče piksele lahko nadomestimo na več načinov, od katerih sta najpogostejša zrcaljenje in izpuščanje vrednosti. Pri prvem v računu upoštevamo



Slika 16.12: Pri konvolucijskem filtriranju prek podobe pošljemo računsko okno in v njem izvedemo določeno operacijo.

vrednosti, ki se nahajajo na nasprotni strani manjkajoče, pri drugem pa vrednosti ne upoštevamo in primerno spremenimo računsko operacijo.

16.4.2 Nizkoprepustni filtri

Nizkoprepustni (low-pass) filter poudarja večje homogene površine, to je take z majhnim spreminjanjem tona, hkrati pa zmanjša drobne detajle na podobi in ga zato uporabljamo za glajenje podob. Najpreprostejši primer nizkoprepustnega filtra je *povprečenje*, pri katerem v izhodno podobo zapišemo povprečje vrednosti njegove bližnje okolice.

V matrični obliki je tovrstni filter pri velikostih 3 krat 3 in 5 krat 5 enak

$$Fnp_{3 \times 3} = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

(a)



(b)



Slika 16.13: Nizkoprepustni filter oziroma filter povprečenja podobo (a) zgladi in s tem odpravi šum (b).

$$Fnp_{5 \times 5} = \frac{1}{25} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (16.7)$$

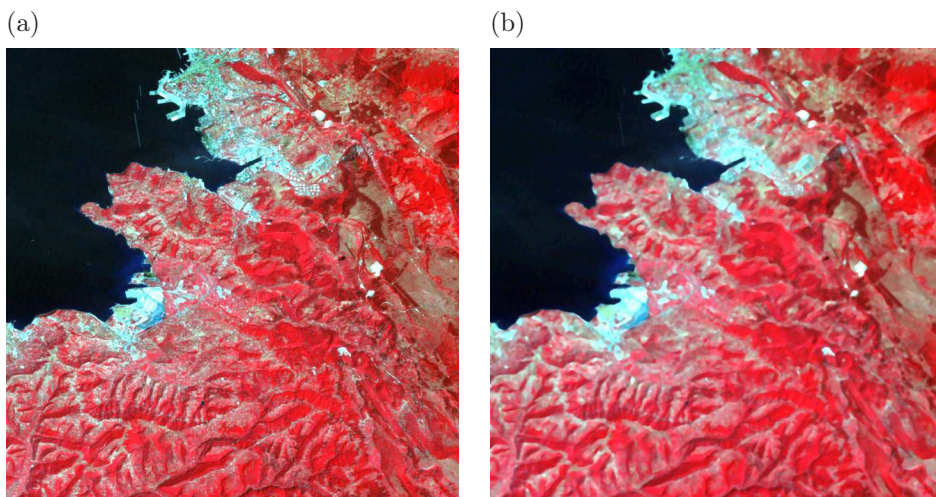
Faktorja $1/9$ in $1/25$ sta namenjena normalizaciji filtra, s katero dosežemo, da so v izhodni podobi vrednosti enakega velikostnega reda kot v vhodni (dosežejo enak razpon). Učinek nizkoprepustnega filtra prikazuje slika 16.13. Vidimo, da je izhodna podoba precej mehkejša in ne vsebuje visokofrekvenčnega dela (praviloma šuma). Seveda pa s tovrstno operacijo izgubimo podrobnosti in zabrišemo meje med predmeti.

16.4.3 Filter mediana

Mediana je v statistiki določena kot vrednost, ki v porazdelitvi loči zgornjo in spodnjo polovico – polovica elementov populacije ima višje, druga polovica pa nižje vrednosti. Mediano poiščemo tako, da skupino uredimo od najmanjše do največje in izberemo srednjo vrednost.

Filter mediana je zelo podoben filtru povprečenja, saj prav tako prepušča nizke frekvence. Za razliko od povprečenja pa je vrednost, ki jo vrne mediana, vsebovana v prvotni podobi. Razliko med obema najlažje pokažemo s primerom. Recimo, da imamo v oknu razsežnosti 3 krat 3 vrednosti 2, 2, 3, 5, 1, 3, 10, 3, 5. Mediano dobimo tako, da podatke najprej uredimo, s čimer dobimo zaporedje 1, 2, 2, 3, 3, 3, 5, 5, 10, in poiščemo srednjo vrednost, ki je v našem primeru enaka 3. Povprečje navedene populacije pa znaša je $3,78 \approx 4$, to pa je vrednost, ki je v prvotnem nizu ni.

Mediana daje praviloma boljše rezultate kot povprečje. Glavni razlog za to je dejstvo, da je vrednost, ki jo vrne, vedno eden od elementov opazovane množice. Poleg tega ni občutljiva na podatke, ki močno odstopajo. Mediana na podobi torej odstrani posamezne ekstremne piksele, ne ustvari »umetnih« vrednosti in hkrati dobro ohrani



Slika 16.14: Filter mediana podobo (a) zgladi (b), pri čemer ohrani robove in ne ustvari novih vrednosti.

robove (slika 16.14). Njena slabost pa je precejšnja računska zahtevnost, saj moramo piksele razvrstiti in nato poiskati njihovo sredino, kar je pri velikih oknih lahko precej dolgo trajno.

16.4.4 Gaussov filter

Gaussov filter je dvorazsežen konvolucijski filter, ki »zamegli« podobe in odstrani podrobnosti in šum. Sama oblika filtra je zelo podobna povprečenju, le da vrednosti seštejemo uteženo – osrednji piksel močnejše vpliva na rezultat kot njegovi sosede. Oblika filtrirne matrike je določena z Gaussovo porazdelitvijo

$$F_{k,l} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{k^2+l^2}{2\sigma^2}}. \quad (16.8)$$

Pri tem sta k in l indeksa filtrirnega okna. Porazdelitev ima povprečje v centralnem pikslu, standardni odklon pa določa stopnjo glajenja (v primeru $\sigma = \infty$ dobimo filter povprečenja).

Filtrirna matrika je odvisna od velikosti filtrirnega jedra. Ker je slednji praviloma precej majhen, je njena oblika le približek Gaussove. Pri velikosti 5 krat 5 je, na primer, enaka

$$Fnp_{5 \times 5} = \begin{bmatrix} 0,000015 & 0,000676 & 0,002431 & 0,000676 & 0,000015 \\ 0,000676 & 0,031441 & 0,113083 & 0,031441 & 0,000676 \\ 0,002431 & 0,113083 & 0,406718 & 0,113083 & 0,002431 \\ 0,000676 & 0,031441 & 0,113083 & 0,031441 & 0,000676 \\ 0,000015 & 0,000676 & 0,002431 & 0,000676 & 0,000015 \end{bmatrix}. \quad (16.9)$$

Vsota vrednosti filtra je ena, kar pomeni, da je filter normiran. Učinek filtriranja z gornjo matriko prikazuje slika 16.15. Rezultat je zelo podoben običajnemu povprečenju, imamo pa pri Gaussovem filtru boljši vpliv na stopnjo in intenzivnost glajenja.

(a)



(b)



Slika 16.15: Gaussov filter podobo (a) zgladi (b), pri čemer stopnjo glajenja določamo z vrednostjo standardnega odklona v filtrirni matriki.

16.4.5 Visokoprepustni filtri

V postopku daljinskega zaznavanja imamo vedno opravka s povprečenjem vrednosti oziroma dušenjem signala. Pri tem so visoke prostorske frekvence praviloma bolj zadužene kot nizke. Zato jih pogosto skušamo okrepiti in tako povečati vizualno kakovost podob. Visokoprepustni (high-pass) filtri delujejo nasprotno kot nizkoprepustni in podobe izostrijo in s tem poudarijo podrobnosti. V poglavju 16.4.2 smo kot način glajenja omenili povprečenje, ki je posebna oblika integracije. Matematično nasprotna operacija, to je odvajanje, bi torej podobo izostrila.

Preden si ogledamo tehnike, ki temeljijo na odvajanju, omenimo še preprostejši postopek visokoprepustnega filtriranja. Preprost tovrstni filter lahko ustvarimo tako, da od podobe odštejemo njen nizkoprepustni del. Tako ostanejo le visoke frekvence, ki jim ustreza hitro spreminjanje tona.

Viskoprepustni filter, kot rečeno, ustreza matematični operaciji odvajanja. Odvod zvezne funkcije podaja hitrost njenega spreminjanja, to je stopnjo njenega naraščanja oziroma padanja. Postopek lahko nadaljujemo z drugim odvodom, ki predstavlja hitrost spreminjanja prvega odvoda in s tem ukrivljenost funkcije.

Pri sivinskih podobah prvi odvod predstavlja spreminjanje vrednosti v prostoru. Določimo ga lahko v posamezni smeri, to je x in y

$$\begin{aligned}\Delta_x(i,j) &= I(i,j) - I(i-1,j), \\ \Delta_y(i,j) &= I(i,j) - I(i,j-1).\end{aligned}\tag{16.10}$$

Odvod je razlika vrednosti I sosednjih pikslov v izbrani smeri, pri čemer upoštevamo, da podobe niso zvezne ampak diskretne. Skupna vrednost odvoda je določena kot

$$\Delta = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2}\tag{16.11}$$

Prvi odvod pove, kako hitro se spreminjajo vrednosti v posamezni smeri, kolikšna je skupna velikost spreminjanja in v kateri smeri se vrednosti najmočneje spreminjajo. Odvod je majhen pri homogenih površinah in močno naraste v bližini hitrih sprememb (robov). Prvi odvod je torej povezan z visokofrekvenčno komponento podobe.

Podobno kot prvi odvod lahko definiramo tudi drugega

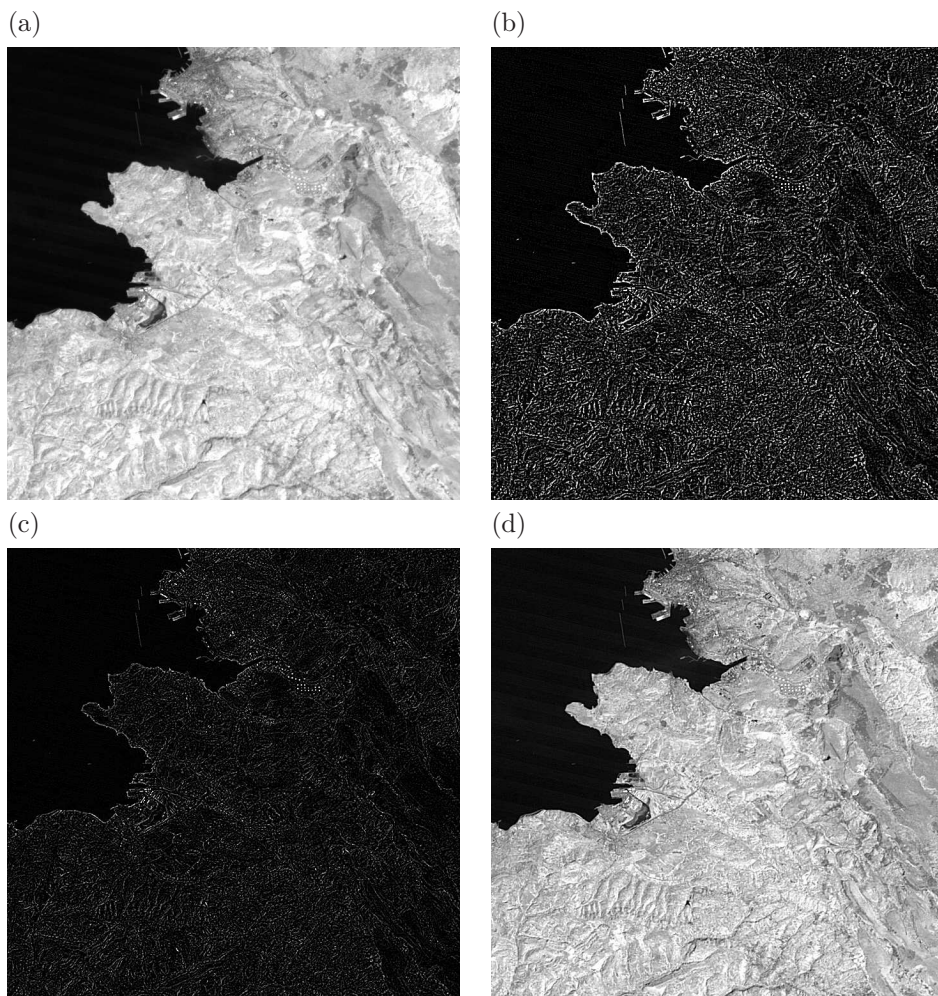
$$\begin{aligned}\Delta_{x2}(i,j) &= \Delta_x(i+1,j) - \Delta_x(i,j) \\ &= [I(i+1,j) - I(i,j)] - [I(i,j) - I(i-1,j)] \\ &= I(i+1,j) + I(i-1,j) - 2I(i,j) \text{ in} \\ \Delta_{y2}(i,j) &= I(i,j+1) + I(i,j-1) - 2I(i,j).\end{aligned}\tag{16.12}$$

Drugi odvod torej podaja spreminjanje prvega in ga zato lahko uporabimo za določanje ekstremov (vrhov in dolin) na podobi. V obdelavi podob kot drugi odvod najpogosteje uporabljamo Laplaceov filter, ki ga določa naslednja filtrirna matrika

$$Flap_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.\tag{16.13}$$

Vsota vrednosti v Laplaceovi matriki je enaka nič, zato normalizacija ni potrebna.

Viskoprepustne filtre pri obdelavi podob uporabljamo precej pogosto, še posebej kadar želimo poudariti podrobnosti na njih. Slika 16.16 prikazuje učinek prvega (b) in

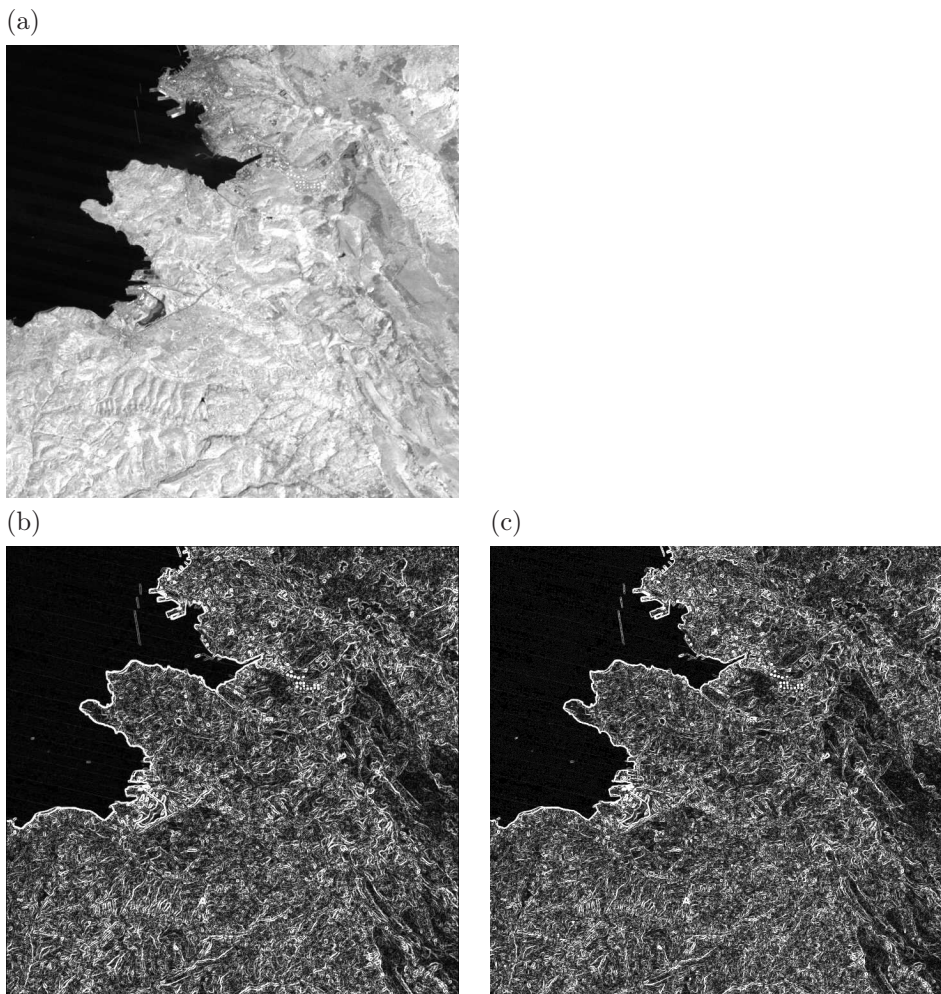


Slika 16.16: Z viskoprepustnim filtriranjem (odvajanjem) iz podobe (a) dobimo podrobnosti (b). Drugi odvod (Laplaceov operator) podaja hitrost spreminjanja prvega in omogoča odkrivanje robov (c). Če originalni podobi prištejemo prvi odvod, dobimo vizualno ostrejšo sliko (d).

drugega (c) odvoda. Če podobo visokih frekvenc prištejemo prvotni podobi (z določeno utežjo), ji tako »vrnemo« del zadušenih podrobnosti. S kombinacijo prvotne podobe in odvoda lahko povečamo ostrino in intenziteto robov (slika 16.16 d).

16.4.6 Filtri robov

Viskoprepustna podoba omogoča opazovanje robov, vendar obstaja tudi nekaj učinkovitejših filtrov, ki so namenjeni samo zaznavanju teh. Rob je hitra sprememba sivih vrednosti, ki je praviloma povezana z antropogenimi dejavniki, na primer cestami, mejami med zemljišči, posekmi ... Poleg že omenjenih filtrov (viskoprepustni, Laplaceov) lahko za iskanje robov uporabimo še nekatere druge, od katerih sta najbolj znana *Sobelov*



Slika 16.17: Primerjava filtrov za odkrivanje robov. Slika prikazuje originalno podobo (a) ter rezultat Sobelovega (b) in Robertsovega (c) filtra.

in *Robertsov*. Oba delujeta v dveh osnovnih smereh, robove pa določita z opazovanjem skupne vrednosti v obeh – njune vsote ali vsote njunih kvadratov.

Sobelov filter podajata naslednji matriki

$$Fsob_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ in } Fsob_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (16.14)$$

Robertsov filter je preprostejši, podajata pa ga matriki

$$Frob_a = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \text{ in } Frob_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (16.15)$$

Slika 16.17 primerja Sobelov (b) in Robertsov (c) filter. Vidimo, da oba delujeta podobno in da relativno dobro prikažeta hitre spremembe sivih vrednosti. Naslednji

korak pri iskanju robov je določanje ustreznega praga za robove, njihovo prepoznavanje in morebitna vektorizacija.

Izbira prave tehnike izboljšave podobe je zapletena, saj so pri interpretaciji pomembni tako fiziološki kot psihološki dejavniki. Podobe v surovi obliki niso primerne za opazovanje, že z malenkostnimi popravki pa jih naredimo jasnejše. Zavedati se moramo, da pri vsaki operaciji pridobimo nove informacije, hkrati pa izgubimo del podatkov. Izmed primerljivih postopkov moramo izbrati torej tistega, ki je preprostejši, torej hitrejši in manj »uničevalen«.

Vprašanja

1. Opiši tehnike za izboljšanje podob.
2. Kako deluje človeško oko?
3. Kaj je barvni prostor RGB?
4. Kaj je barvni prostor HSI?
5. Opiši tehnike izboljšanja kontrasta.
6. Kaj so psevdobarvni prikazi? Kako jih ustvarimo?
7. Kaj je filtriranje in kako poteka?
8. Katere vrste filtrov uporabljamo v daljinskem zaznavanju in zakaj?

17 Transformacije podob

Postopki izboljšanja, ki jih obravnava poglavje 16, spremenijo videz podobe, praviloma z upoštevanjem enega samega kanala. Pri transformacijah pa iz obstoječih informacij ustvarimo nove, pogosto z upoštevanjem več kanalov. Pri tem gre lahko za kanale istega večspektralnega senzorja ali podatke dveh ali več podob istega območja, ki so zajete ob različnih časih (multitemporalni ali veččasovni podatki). S transformacijami v obeh primerih ustvarimo »nove« podobe.¹ Tako bolje kot na prvotnih podobah poudarimo predmete ali lastnosti, ki nas zanimajo, oziroma določimo količine, ki jih osnovne podobe ne vsebujejo.

V nadaljevanju bomo obravnavali nekaj različnih transformacij podob, od katerih so najpreprostejše osnovne *aritmetične operacije* (seštevanje, odštevanje, množenje in deljenje). Pri slednjih težko govorimo o transformacijah v pravem pomenu besede. Posebno pozornost bomo namenili razmerjem kanalov ali tako imenovanim *spektralnim indeksom*, od katerih je brez dvoma najbolj poznan normiran diferencialni vegetacijski indeks (NDVI). Nekoliko bolj zapletena aritmetična pretvorba je *Kauth-Thomasova* (imenovana tudi tasseled cap) transformacija, ki določi svetlost, zelenost in vlažnost površja. V obdelavi podob je pomembna tudi *analiza osnovnih komponent*, transformacija, ki ustvari manjše število informacijsko gostejših kanalov. Pomembna skupina transformacij so tudi barvne, od katerih velja omeniti *transformacijo HSI* (hue, saturation, intensity oziroma barva, nasičenost in intenziteta).

Pomemben sklop transformacij, ki pa ga zaradi zahtevnosti ne bomo obravnavali, so frekvenčne transformacije. Veliko operacij v daljinskem zaznavanju, na primer filtriranje (razdelek 16.4), je preprostejših v frekvenčnem prostoru. Pri tem gre za tako imenovano diskretno *Fourierjevo* (DFT, discrete Fourier transform) in *valčno* (wavelet) transformacijo. Pri prvi predstavimo podobo v obliki frekvenčnih komponent, pri čemer prostorsko spreminjanje sivin nadomestimo s frekvenčno vrsto, to je vsoto periodičnih (sinusnih) nihanj. Pri drugi namesto periodičnih funkcij uporabljamo funkcije, ki so omejene tako časovno kot krajevno. Valčna transformacija je zaradi svojih lastnosti posebej primerna za večločljivostni pristop k obdelavi podob, saj omogoča obravnavo različnih stopenj podrobnosti.

¹Transformacije lahko primerjamo s kuharjem, ki ima na razpolago osnovne sestavine (podobe) in z njihovo kombinacijo ter obdelavo ustvari različne jedi. Vsaka izmed njih ne vsebuje ničesar drugega kot prvotne sestavine, pa vendar imajo drugačen videz (in okus). Tako lahko tudi različne podobe kombiniramo in ustvarimo enostavne ali zelo zapletene rezultate.

17.1 Aritmetične operacije

Osnovne transformacije podob ustvarimo s preprostimi aritmetičnimi operacijami – seštevanjem, odštevanjem, množenjem in deljenjem. Kot smo že omenili, gre lahko za operacije med različnimi kanali iste podobe ali kanali različnih podob. Osnovni pogoj, ki omogoča aritmetične (pa tudi druge) transformacije, je natančna poravnava podob. Tovrstna obdelava namreč ni smiselna, če ne opazujemo podob, pri katerih istim pikslom ustrezajo isti deli površja. Podobe moramo zato predhodno registrirati drugo glede na drugo ali v izbrani koordinatni sistem (razdelek 15.2). Natančnost, ki jo pri tem potrebujemo, je velikostnega reda en piksel.

Seštevanje podob je operacija, ki jo najpogosteje uporabljamo za zmanjšanje šuma na veččasovnih podobah. Vsako podobo si lahko zamislimo kot vsoto »pravih« vrednosti in šuma. Če za slednjega predvidevamo, da je porazdeljen normalno, ga s seštevanjem več podob izpovprečimo. Zapišemo lahko

$$I_{sum}(x,y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(x,y). \quad (17.1)$$

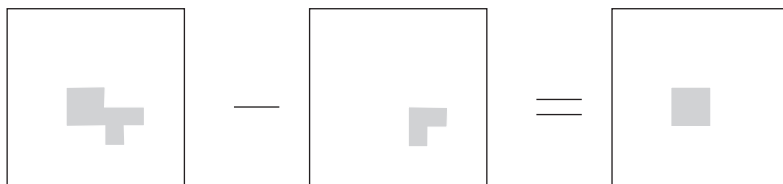
Pri tem so I_i posamezne podobe, I_{sum} pa njihova vsota. Ker želimo ohraniti dinamični razpon vrednosti (na primer od 0 do 255 pri osembitnih podobah), vsoto delimo s številom podob n . Seštevanje izvajamo po posameznih pikslih, rezultat pa praviloma zaokrožimo k najbližji celi vrednosti.

Odštevanje podob pogosto uporabljamo za določanje sprememb, do katerih je prišlo med zajetjem ob različnih časih (slika 17.1). Pri paru georeferenciranih podob vrednosti pikslov (svetlosti) ene podobe odštejemo od vrednosti druge

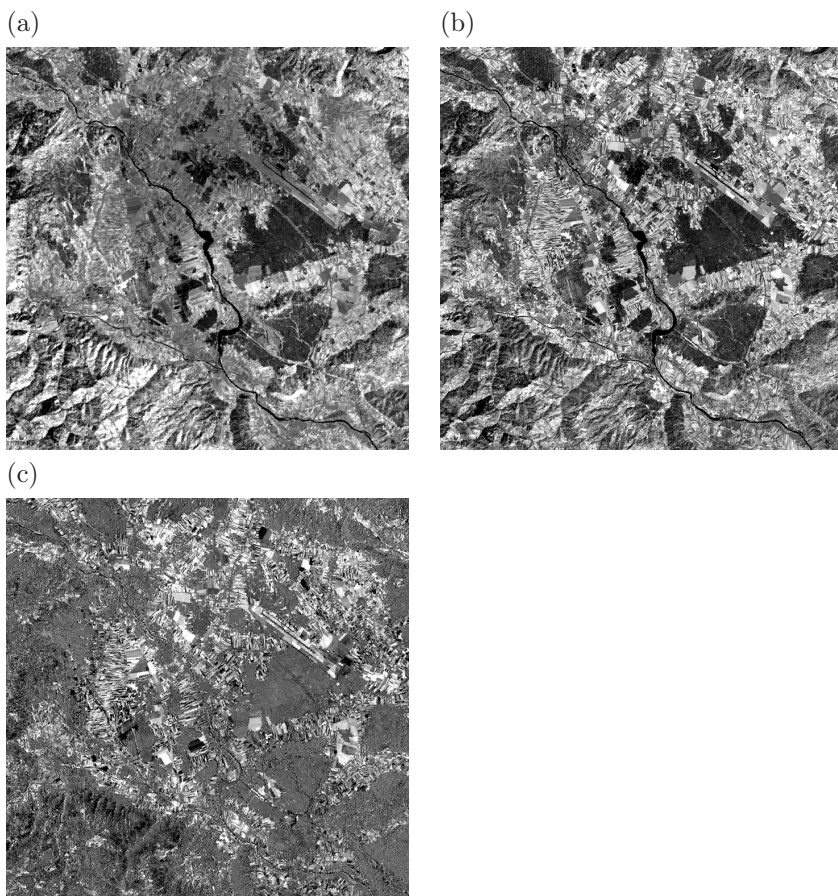
$$I_{dif}(x,y) = I_2(x,y) - I_1(x,y). \quad (17.2)$$

Rezultat operacije je podoba, pri kateri vrednost 0 pomeni, da med zajetjema podob ni prišlo do sprememb, majhne vrednosti pomenijo majhne spremembe, velike pa velike. Hkrati predznak podaja »smer« spremembe (če nas ta ne zanima, uporabimo absolutno vrednost razlike). Podoba razlik ima obliko relativno ozke Gaussove krivulje, saj so razlike pogosto majhne in praviloma porazdeljene normalno. S pravilnim raztegom in barvnim prikazom (razdelka 16.2 in 16.3) lahko razlike med podobama prikažemo zelo jasno.

Izhodna podoba za razliko od vhodnih zajame tako pozitivne kot negativne vrednosti, kar pa je lahko pri nadaljnji obdelavi moteče. Zato jo pogosto nekoliko premaknemo oziroma ji prištejemo konstanto. Najpogosteje gre za polovico največje vrednosti, ki jo



Slika 17.1: Z odštevanjem lahko določimo spremembe, do katerih je prišlo med zajetjem podob.



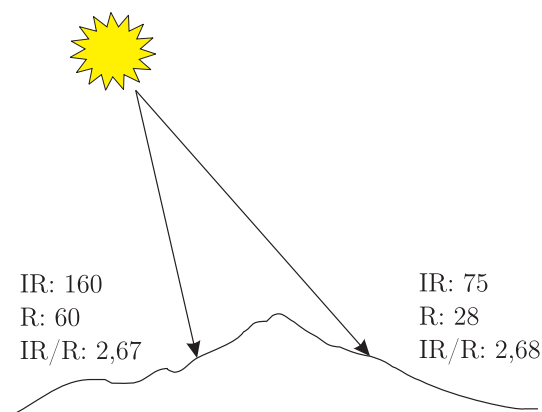
Slika 17.2: Infrardeči kanal posnetkov satelita Landsat, ki prikazuje Sorško polje, zajeto v razmiku osmih let, in sicer 18. avgusta 1992 (a) in 16. avgusta 2000 (b). Razlika podob (c) poudari spremembe, nastale v času med obema snemanjema. V sivi barvi so deli, ki se niso spremenili, temna in svetla pa pomenita zmanjšanje in povečanje odboja.

pri dani radiometrični ločljivosti lahko zavzame (R_{max} , pri osembitnih podobah je to 255)

$$I_{dif}(x,y) = \frac{R_{max}}{2} + \frac{I_2(x,y) - I_1(x,y)}{2}. \quad (17.3)$$

Na taki podobi imajo območja, na katerih ni prišlo do sprememb, vrednosti okoli izbrane konstante, čemur ustrezajo srednje sive vrednosti. Območja z znatnimi spremembami pa imajo vrednosti, ki so manjše ali večje – odvisno od »smeri« razlike – od konstante. Odštevanje podob je uporabno, na primer, za kartiranje sprememb sprememb urbanih ali kmetijskih površin, določanje območij, kjer prihaja do krčenja gozda in podobno (slika 17.2). Če smo predhodno digitalne vrednosti na podobi pretvorili v radianco (razdelek 15.5), z odštevanjem dobimo absolutne razlike odbite energije.

Množenje podob je operacija, ki jo v praksi zelo redko srečamo. Še najpogosteje jo uporabljamo za maskiranje določenih delov posnetka. Če nas zanimajo podrobnosti v delu podobe, na primer vodi, lahko vrednosti v ostali podobi postavimo na nič. Najprej



Slika 17.3: Razmerje kanalov je zelo podobno na osvetljenem in na senčnem delu podobe, kljub temu da so vrednosti v posameznih kanalih zelo različne.

ustvarimo dvojiško (binarno) masko, ki podaja vodne in nevodne površine, nato pa z množenjem ustvarimo podobo, ki vsebuje vrednosti le v izbranem območju.

Deljenje podob ali računanje spektralnih razmerij je ena najpogostejših transformacij podob. Z razmerji lahko opazimo drobne razlike v spektralnih odzivih različnih tipov površja. Z deljenjem podatkov dveh kanalov poudarimo spremembe naklona odbojnih krivulj, ki jih sicer ne opazimo zaradi sprememb znotraj enega samega kanala.

Pomembna prednost spektralnih razmerij je zmanjšanje vpliva topografije in osvetlitve opazovanega območja. Pri razmerjih namreč opazujemo relativne vrednosti in ne absolutnih, kar pomeni, da so rezultati bolj ali manj neodvisni od sprememb v osvetljenosti. Absolutne vrednosti odboja so sicer različne v odvisnosti od usmeritve glede na položaj Sonca, razmerje kanalov pa je od njegovega položaja neodvisno (slika 17.3).

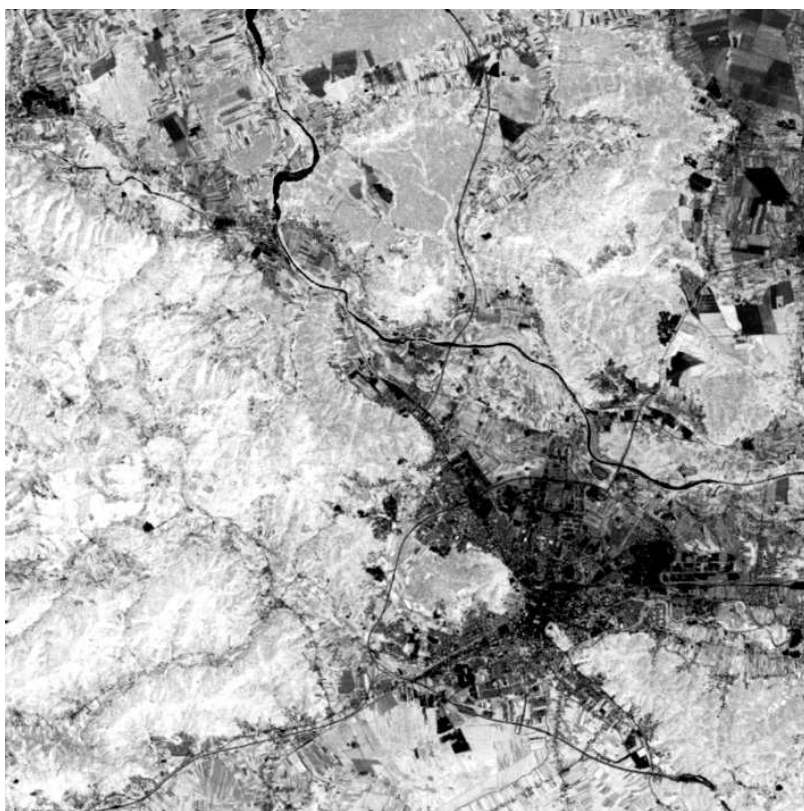
Deljenje podob lahko opravimo med poljubnima kanaloma iste podobe, skoraj nikoli pa ne uporabljamo podatkov različnih podob ali celo različnih senzorjev. Zaradi velike prednosti, ki jih razmerja prinašajo v interpretacijo, namesto enostavnega deljenja uporabljamo tudi zapletene, pogosto empirično določene transformacije, ki veljajo samo za posamezen senzor. Govorimo o tako imenovanih *indeksih*, na primer vegetacijskem, železovem, glinenem ...

17.2 Vegetacijski indeks

Pojem spektralnega razmerja ima posebej velik pomen pri opazovanju vegetacije. Zdravo, to je živo rastlinje močno odbija svetlobo v bližnjem infrardečem delu elektromagnetnega spektra, medtem ko rdečo svetlobo močno absorbira. Druge površine, na primer voda in gola prst, imajo skoraj enako odbojnost v obeh omenjenih spektralnih območjih. Razmerje bližnjega infrardečega in rdečega pasu imenujemo vegetacijski indeks

$$VI = \frac{IR}{R}. \quad (17.4)$$

Vegetacijski indeks je mnogo večji od ena za vegetacijo in približno enak ena za večino drugih snovi (vodo, prst ...). V primeru satelita Landsat in senzorja Thematic Mapper gre pri tem indeksu za razmerje kanalov 4 in 3. Ločevanje med vegetacijo



Slika 17.4: Vegetacijski indeks NDVI območja okolice Ljubljane podaja stanje oziroma zdravost vegetacije. V temni barvi vidimo predele s poškodovanim rastlinjem ali brez njega, v svetli pa so območja z zelo aktivno vegetacijo.

in drugimi tipi tal je z uporabo razmerja navedenih kanalov precej lažje in predvsem jasnejše. Poleg tega lahko hitro odkrijemo območja nezdravega ali poškodovanega rastlinja. To ima manjši odboj v bližnjem infrardečem delu spektra in posledično manjše razmerje od zdrave vegetacije.

Z zapletenejšimi razmerji ali indeksi, ki vsebujejo vsote in razlike kanalov, lahko vegetacijo in druge značilne predmete na površju še močneje poudarimo. Eden najbolj razširjenih indeksov za opazovanje vegetacije je *normiran diferencialni vegetacijski indeks* (NDVI, normalized difference vegetation index). NDVI je bil razvit za opazovanje stanja vegetacije na večjih območjih, na primer na kontinentih ali na celotni Zemlji. Pri tem se v glavnem uporabljajo podatki senzorja AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), ki se nahaja na satelitih skupine NOAA (razdelek 11.1.2). NDVI predstavlja razmerje med razliko infrardečega in rdečega kanala in njuno vsoto

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R}. \quad (17.5)$$

Indeks NDVI zavzame vrednosti med -1 in $+1$, pri čemer višje vrednosti pomenijo bolj intenzivno vegetacijo. Primer indeksa, dobljenega iz posnetka satelita Landsat, podaja slika 17.4. V temnih tonih so prikazana območja s poškodovanim rastlinjem ali

Mineralni indeksi

Indeksi so relativno pogosti tudi v geofizikalnih aplikacijah daljinskega zaznavanja. Praviloma so določeni empirično in prilagojeni posameznemu senzorju. Spodnja tabela podaja nekatere enostavnejše indekse za senzor Landsat Thematic Mapper.

<i>Indeks</i>	<i>Razmerje</i>
železov oksid	TM3/TM1
ilovnati minerali	TM5/TM7
železovi minerali	TM5/TM4
mineralni kompozit	TM5/TM7, TM5/TM4, TM3/TM1
hidrotermalni kompozit	TM5/TM7, TM3/TM1, TM4/TM3

brez njega, v svetlih pa območja z aktivno vegetacijo.

Obstaja še cela množica bolj zapletenih vegetacijskih indeksov, ki skušajo odstraniti različne moteče dejavnike, na primer prst, vodo ... Pogosto vključujejo kombinacijo velikega števila kanalov, kot na primer indeks zelene vegetacije (GVI, green vegetation index), ki je za Landsat določen kot

$$GVI = -0,2848 TM1 - 0,2435 TM2 - 0,5436 TM3 + 0,7243 TM4 + 0,0840 TM5 - 0,1800 TM7. \quad (17.6)$$

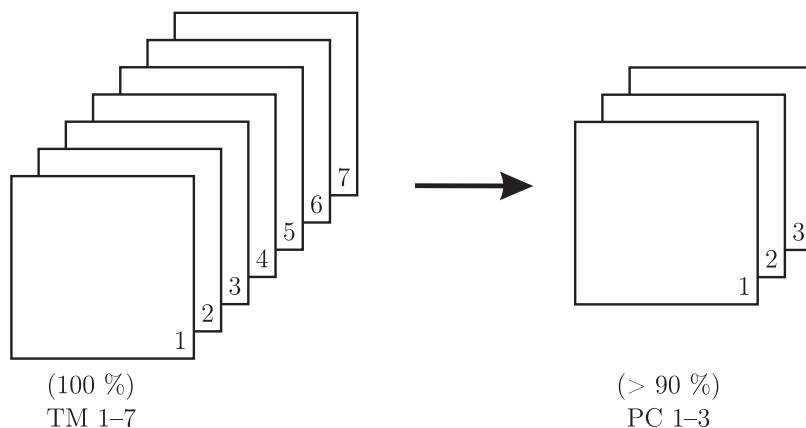
17.3 Analiza osnovnih komponent

Različni kanali večspektralnih senzorjev so si med seboj pogosto zelo podobni. Podatki senzorja Landsat TM imajo skoraj enake vrednosti v drugem in tretjem kanalu (zelena in rdeča). Odboj večine tipov tal je namreč v omenjenih dveh kanalih skoraj enak. Korelacijo med kanali in s tem podvajanje podatkov lahko zmanjšamo z uporabo posebnih transformacijskih tehnik, ki temeljijo na statističnih operacijah z večspektralnimi podatki in zahtevnejših obdelavah. Ena izmed pogostih transformacij za zmanjšanje števila kanalov se imenuje *analiza osnovnih komponent* (PCA, principal components analysis).

Glavni namen transformacije PCA je zmanjšanje razsežnosti podatkov, to je števila kanalov, s povečevanjem informacijske gostote (slika 17.5). »Novi« kanali, ki jih dobimo s tem postopkom, se imenujejo osnovne komponente. Postopek skuša povsem statistično poiskati kar se da majhno število dimenzij s peštrim razponom vrednosti, to je veliko varianco.

Postopek iskanja osnovnih komponent se začne z določanjem korelacij med posameznimi kanali podobe (tabela 17.1). Z metodami linearne algebre nato poiščemo lastne vrednosti (eigenvalue) in njim pripadajoče lastne vektorje (eigenvector). Ti določajo smeri osnovnih komponent (osnovnih osi), to je smeri z največjim razponom vrednosti oziroma največjo varianco. Nazadnje podatke v vhodni podobi zavrtimo in jim spremenimo merilo – pretvorimo jih v osnovne komponente (tabela 17.2).

Z analizo osnovnih komponent lahko, na primer, sedem kanalov senzorja Landsat TM (slika 17.6) pretvorimo v zgolj tri kanale, ki vsebujejo skoraj 97 % informacij,



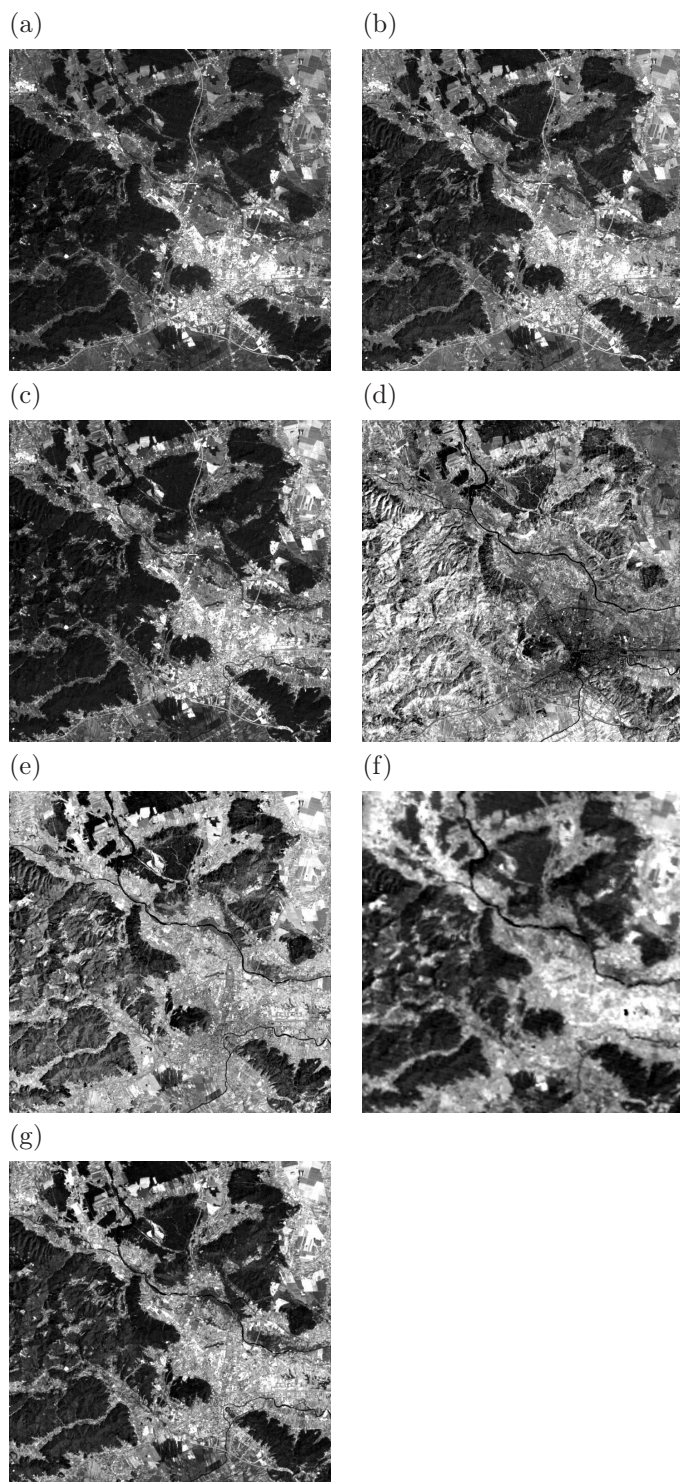
Slika 17.5: Transformacija PCA zmanjša število kanalov s povečevanjem informacijske gostote.

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM6	TM7	povp.	st.odkl.
TM1	1,00	0,97	0,96	-0,08	0,66	0,62	0,85	59,99	10,15
TM2	0,97	1,00	0,98	0,02	0,75	0,65	0,89	25,80	6,47
TM3	0,96	0,98	1,00	-0,06	0,75	0,68	0,92	25,01	9,93
TM4	-0,08	0,02	-0,06	1,00	0,38	-0,04	0,07	67,36	14,06
TM5	0,66	0,75	0,75	0,38	1,00	0,64	0,91	65,61	21,91
TM6	0,62	0,65	0,68	-0,04	0,64	1,00	0,70	147,67	8,34
TM7	0,85	0,89	0,92	0,07	0,91	0,70	1,00	25,42	13,23

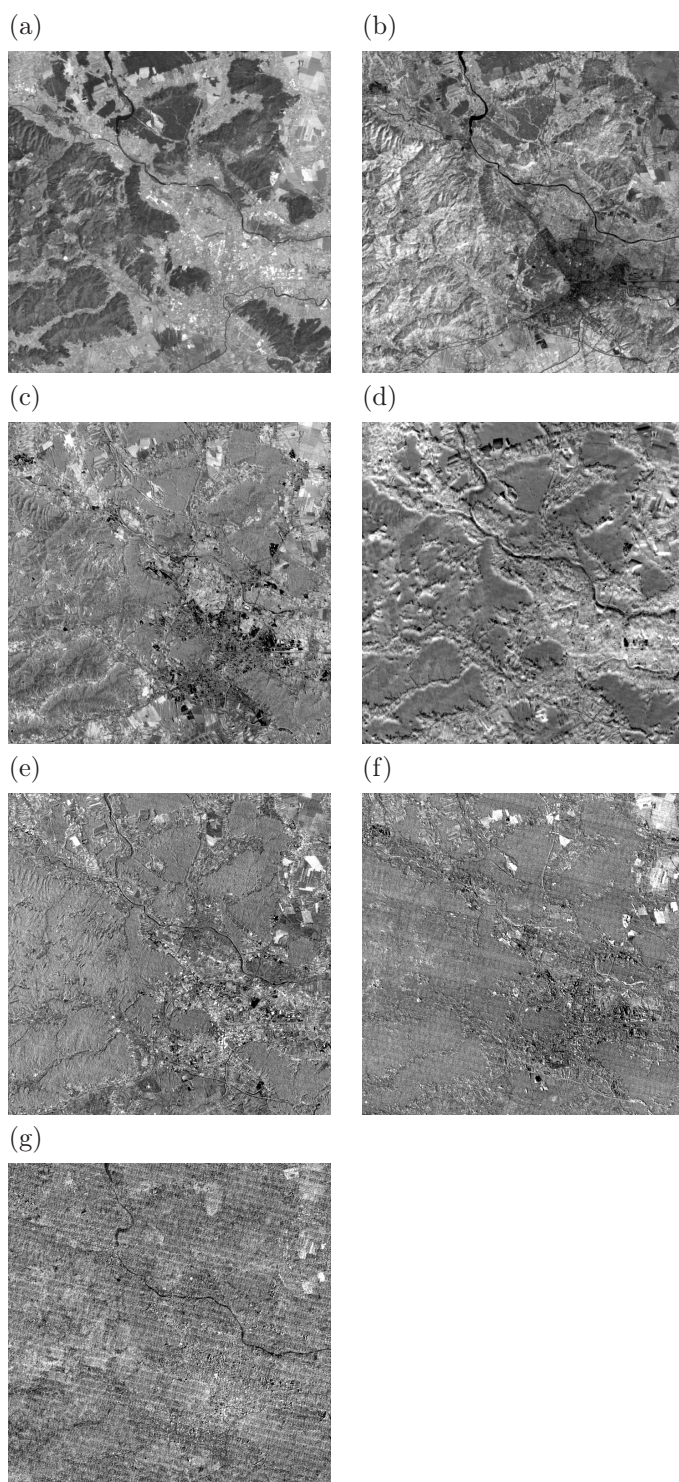
Tabela 17.1: Korelacija med kanali podobe satelita Landsat, prikazane na sliki 17.6.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
TM1	0,28	-0,27	-0,58	0,00	-0,37	-0,58	0,20
TM2	0,19	-0,13	-0,32	0,00	-0,09	0,23	-0,88
TM3	0,30	-0,25	-0,36	-0,03	0,07	0,73	0,42
TM4	0,13	0,86	-0,43	0,17	0,16	0,00	0,04
TM5	0,73	0,23	0,47	-0,20	-0,39	0,03	0,01
TM6	0,20	-0,14	0,16	0,95	0,01	-0,01	0,00
TM7	0,44	-0,17	0,03	-0,14	0,82	-0,27	-0,05
lastna vrednost	843,30	232,79	51,06	31,24	5,02	2,33	0,53
varianca (%)	72,31	19,96	4,38	2,68	0,43	0,20	0,05
skupaj (%)	72,31	92,27	96,65	99,32	99,76	99,95	100,00

Tabela 17.2: Osnovne komponente s pripadajočimi variancami za podobo na sliki 17.6. Vidimo lahko, da prve tri komponente vsebujejo skoraj 97 % vseh podatkov izvirne podobe.



Slika 17.6: Kanali 1 do 7 podobe satelita Landsat (a–g) Ljubljane in okolice.



Slika 17.7: Osnovne komponente 1 do 7 (a–g) podobe s slike 17.6.

vsebovanih v prvotnih kanalih (slika 17.7). Prve štiri osnovne komponente pa v prikazanem primeru vsebujejo več kot 99 % izvorne podobe. Prva osnovna komponenta (a) v grobem predstavlja povprečje kanalov prvotnega posnetka (in je zato najbolj podobna vidnim kanalom 1 do 3). Druga (b) je skoraj enaka bližnjemu infrardečemu kanalu (4), tretja (c) pa srednjemu infrardečemu (5), zanimiva je tudi četrta (d), ki pokriva termični kanal (6). Ostale komponente večinoma predstavljajo šum, jasno so, na primer, vidni pasovi skenerja.

Interpretacija prvih nekaj osnovnih komponent, pa naj gre za digitalno ali vizualno, je preprostejša in bolj učinkovita od analize vseh kanalov določenega senzorja. Analizo osnovnih komponent lahko torej uporabimo kot tehniko izboljšanja podob, poleg tega jo lahko izkoristimo za zmanjšanje števila kanalov in s tem pospešitev in olajšanje digitalnih obdelav, predvsem klasifikacije podob (poglavje 18). Lahko jo uporabimo tudi za povečanje ločljivosti, če prvo osnovno komponento večspektralne podobe zamenjamo s pankromatsko visokoločljivo podobo.

17.4 Kauth-Thomasova transformacija

S Kauth-Thomasovo transformacijo² iz večkanalnega posnetka ustvarimo tako imenovano kompozitno podobo. Kompozit je trikanalna podoba, ki praviloma vsebuje tri različne podatke in je posebej primerna za prikaz na zaslonu. Ponavadi ga dobimo z uteženo vsoto vrednosti v različnih kanalih. Pri Kauth-Thomasovi transformaciji kot osnovne elemente kompozita določimo svetlost, zelenost in vlažnost površja.

Transformacija temelji na empiričnih opazovanjih in uporablja enake ideje kot analiza osnovnih komponent. Pri slednji ustvarimo nove kanale (osnovne komponente) kot vsoto prvotnih kanalov. Kot smo videli, že prvih nekaj komponent vsebuje večino podatkov večspektralnega posnetka in bi slednjega lahko predstavili samo s tremi kanali. Vrednosti uteži za kombinacijo osnovnih kanalov so določene statistično, vendar lahko hitro opazimo, da so pri prvi komponenti kanali zastopani približno enako. Z drugimi besedami, prva komponenta je približno enaka vsoti (bolje rečeno povprečju) vseh kanalov oziroma svetlosti podobe.

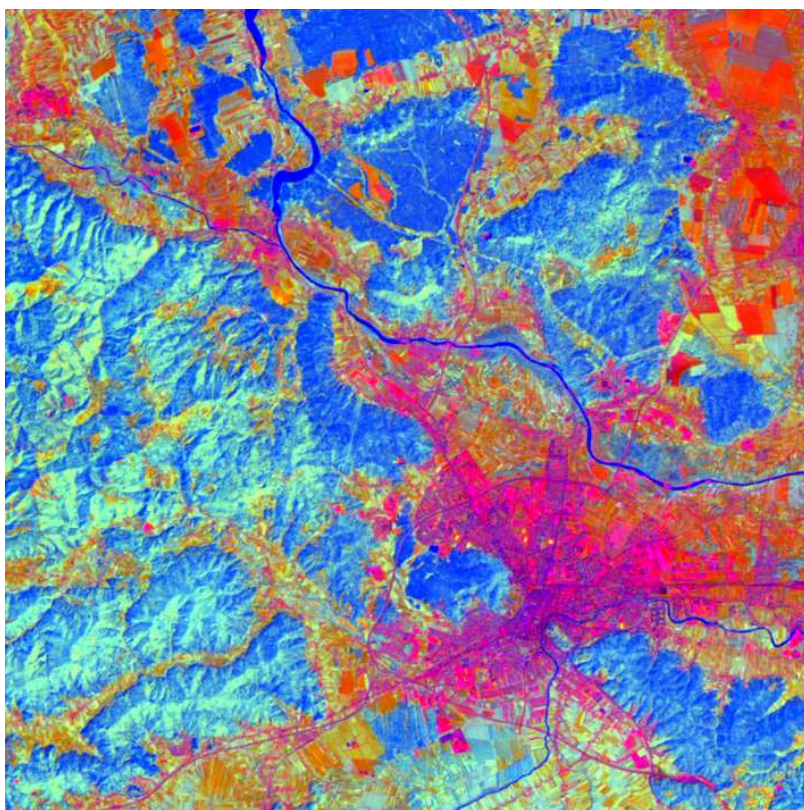
Z analizo osnovnih komponent ustvarimo zbirko pravokotnih osnovnih osi. Postopek je enak pri Kauth-Thomasovi transformaciji, le da temelji na empiričnih opazovanjih in ne na strogo matematičnih (statističnih) postopkih. Avtorja transformacije sta namreč z opazovanji ugotovila, da lahko z zasukom koordinatnega sistema kanalov določimo osi, na katerih sta zelo dobro predstavljena vegetacija in prst. Transformacija je odvisna od uporabljenih podatkov in je bila najprej razvita za senzor Landsat MSS. Kasneje so jo razširili na Landsat TM in še nekatere druge sisteme, tudi IKONOS in QuickBird.

Kauth-Thomasova transformacija določi nove osi, ki se imenujejo *svetlost* (brightness), *zelenost* (greenness) in *vlažnost* (wetness). Vrednosti uteži za posamezne kanale senzorja Landsat TM podaja tabela 17.3. Svetlost je, kot rečeno, približno povprečje vrednosti v posameznih kanalih. Zelenost je povezana s kontrastom med vidnimi in bližnjimi infrardečimi kanali. Vlažnost pa je določena z razliko med srednjimi infrardečimi ter rdečim in bližnjim infrardečim kanalom. Ploskev, ki jo določata osi zelenost in svetlost, je povezana z vegetacijo, osi vlažnost in svetlost pa določata ploskev prsti. Kompozitno podobo, ki je rezultat Kauth-Thomasove transformacije, prikazuje slika 17.8.

²Transformacija se v angleščini imenuje tudi tasseled cap po obliki, ki spominja na kapo s cofom.

<i>Kanal</i>	<i>Svetlost</i>	<i>Zelenost</i>	<i>Vlažnost</i>
TM1	0,3037	-0,2848	0,1509
TM2	0,2793	-0,2435	0,1793
TM3	0,4343	-0,5436	0,3299
TM4	0,5585	0,7243	0,3406
TM5	0,5082	0,0840	-0,7112
TM7	0,1863	-0,1800	-0,4572

Tabela 17.3: Koeficienti Kauth-Thomasove transformacije v primeru senzorja Landsat TM.



Slika 17.8: Kauth-Thomasova transformacija podobe senzorja Landsat TM. V rdeči, zeleni in modri barvi so prikazane svetlost, zelenost in vlažnost.

17.5 Transformacija HSI

Barvni model HSI (hue, saturation, intensity ali barva, nasičenost in intenziteta) je poleg modela RGB (red, green, blue oziroma rdeča, zelena in modra) najpomembnejši način predstavljanja barv v računalniški grafiki. O njem smo podrobno govorili v razdelku 16.1, tokrat pa si oglejmo, kako poteka transformacija med obema prostoroma in zakaj je pomembna.

Pri pretvorbi med prostorom RGB in HSI ustvarimo iz kartezičnega koordinatnega sistema s pravokotnimi barvami prostor, ki ga določa dvojni stožec. Barva je podana s kotom (razpon vrednosti med 0 in 360°), nasičenost in intenziteta pa s stopnjo (vrednost med 0 in 1). V barvnem prostoru RGB imajo vse barve pozitivne vrednosti, od 0 do največje mogoče vrednosti pri dani barvni globini. Pri osembitnih podobah, ki jih najpogosteje uporabljamo, je razpon od 0 do 255.

Transformacija med navedenima barvnima prostoroma poteka v več korakih. Najprej je treba vrednosti za rdečo (r), zeleno (g) in modro (b) pretvoriti na razpon med 0 in 1

$$\begin{aligned} R &= \frac{M - r}{M - m}, \\ G &= \frac{M - g}{M - m}, \\ B &= \frac{M - b}{M - m}. \end{aligned} \quad (17.7)$$

Pri tem so R , G , B rdeča, zelena in modra vrednost v obsegu od 0 do 1, M je največja in m najmanjša vrednost za omenjene barve.

Intenziteto podaja enačba

$$I = \frac{M + m}{2}. \quad (17.8)$$

Enačbe za izračun nasičenosti v obsegu od 0 do 1 so

$$S = \begin{cases} 0 & : M = m \\ \frac{M - m}{M + m} & : I \leq 0,5 \\ \frac{M - m}{2 - M - m} & : I > 0,5 \end{cases} \quad (17.9)$$

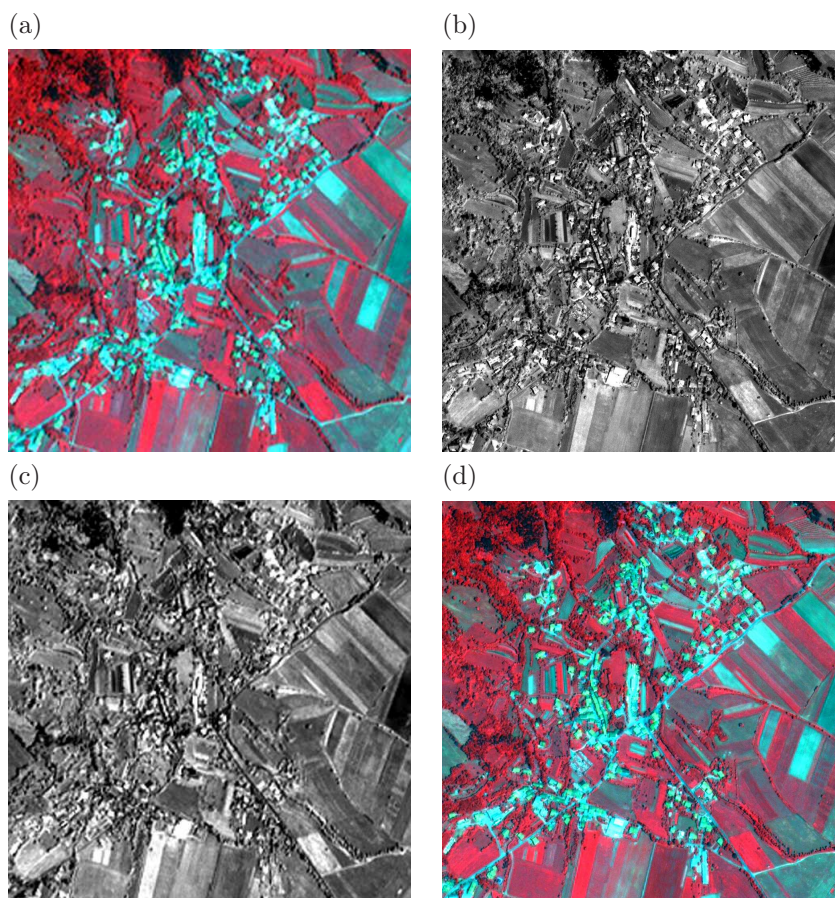
Enačbe za izračun barve v obsegu od 0 do 360° pa so

$$H = \begin{cases} 0 & : M = m \\ 60(2 + b - g) & : R = M \\ 60(4 + r - b) & : G = M \\ 60(6 + g - r) & : B = M \end{cases} \quad (17.10)$$

Transformacija iz prostora HSI v RGB je zelo podobna in poteka v obratnem vrstnem redu.

Opisana pretvorba je uporabna iz več razlogov. V prostoru HSI lahko preprosto opravljamo določene operacije izboljšanja podob. Če podobo spremenimo iz prostora RGB v HSI in opravimo, na primer, razteg histograma na komponenti intenzitete, dobimo po obratni transformaciji podobo, ki ima hkrati povečan kontrast v vseh kanalih.

Še pomembnejša pa je možnost združevanja podob različnih virov, kar imenujemo tudi podatkovna fuzija (data fusion). Veliko sodobnih senzorjev zajema podatke večspektralno z manjšo ločljivostjo in pankromatsko z večjo (Landsat ETM+, SPOT, IKONOS, QuickBird ...). V tem primeru opravimo transformacijo večspektralnih podob v prostor HSI, zamenjamo intenziteto s pankromatsko podobo in opravimo obratno transformacijo. Tako dobimo podobo, ki ima dobre spektralne lastnosti in visoko prostorsko ločljivost (slika 17.9). Podoben postopek lahko uporabimo tudi pri podobah različnih senzorjev in združimo podatke, na primer, satelitov Landsat in SPOT ali pa optičnih in radarskih snemalnih sistemov.



Slika 17.9: Združevanje grobe večspektralne (a) in natančne pankromatske (b) podobe lahko opravimo s transformacijo med prostoroma HSI in RGB. Izbrane tri kanale večspektralnega posnetka najprej pretvorimo v barvo, nasičenost in intenziteto. Intenziteto (c) nato zamenjamo s pankromatskim posnetkom in opravimo pretvorbo nazaj v prostor RGB. Rezultat (d) ohrani barve večspektralne in prostorsko ločljivost pankromatske podobe.

Vprašanja

1. Opiši transformacije podob in podaj njihov pomen.
2. Katere aritmetične operacije uporabljamo pri transformacijah?
3. Kaj je vegetacijski indeks? Kako je določen?
4. Kaj je analiza osnovnih komponent in zakaj je pomembna?
5. Opiši Kauth-Thomasovo transformacijo.
6. Opiši transformacijo HSI.

18 Klasifikacija podob

Klasifikacija podob je eden najpomembnejših postopkov pri obdelavi daljinsko zaznanih podob, saj predstavlja povezavo med daljinskim zaznavanjem in geografskimi informacijskimi sistemi (GIS). Z njo namreč iz rastrske podobe, ki je primerna kot ozadje pri različnih prikazih in vizualnih analizah, dobimo kvantitativni sloj, ki ga kasneje lahko uporabimo v analizah s sistemi GIS. Kljub temu da je prikladno opazovati posnetke iz vesolja ali zraka, pa so vendarle šele tematske karte tiste, ki dajo podobam pomen. V naslednjih razdelkih bomo podali osnove za klasifikacijo, si ogledali nenadzorovano in nadzorovano klasifikacijo ter postopek ovrednotenja rezultatov.

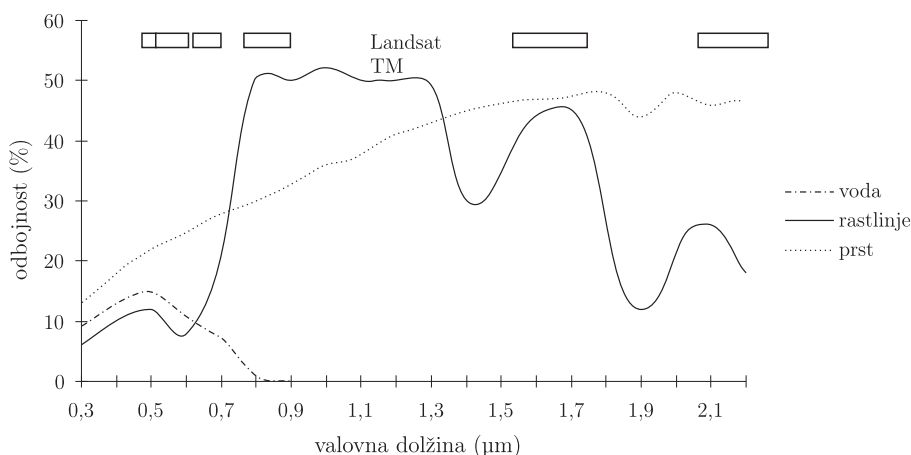
Glavni namen klasifikacije satelitskih in drugih posnetkov je prepoznavanje predmetov na zemeljski površini. Pri *vizualni interpretaciji* poskuša operater določiti razrede rabe tal z iskanjem zaključenih skupin pikslov (poglavje 14). *Digitalna klasifikacija* pa razrede določi z upoštevanjem spektralnih informacij, to je »opazovanjem« sivih tonov na večspektralnih posnetkih. Z drugimi besedami tovrstno klasifikacijo imenujemo tudi *spektralno prepoznavanje vzorcev* (spectral pattern recognition). Tako pri vizualni interpretaciji kot pri digitalni obdelavi skušamo piksle na podobi razdeliti v razrede ali skupine, na primer voda, iglasti gozd, listnati gozd, koruza ...

Postopek klasifikacije satelitskih posnetkov razdelimo na nekaj korakov:

- izbira primernih posnetkov,
- predobdelava, če je potrebna,
- priprava testnih območij,
- razvrščanje v razrede,
- prepoznavanje razredov in
- ovrednotenje rezultatov.

Klasifikacijo posnetkov omogoča tako imenovani *spektralni podpis* ali spektralni odziv, to je značilen način odboja elektromagnetnega valovanja v odvisnosti od valovne dolžine (poglavje 5.1). Na sliki 18.1 je prikazan spektralni podpis treh različnih tipov tal, in sicer vode, prsti (golih tal) in zelene vegetacije. Vidimo, da se odbojnost močno spreminja z valovno dolžino in prav odvisnost odboja od valovne dolžine je tista, ki omogoča določanje spektralnih lastnosti in s tem ločevanje med različnimi predmeti. Tako kot je podpis značilnost posameznika, je tudi spektralni podpis značilna lastnost predmeta.

Žal pri klasifikaciji nimamo na voljo celotnega podpisa predmeta, ki ga opazujemo. Namesto tega imamo množico diskretnih vrednosti, ki predstavljajo odboje v različnih



Slika 18.1: Spektralni podpis različnih tipov tal (vode, prsti in vegetacije). Označeni so tudi kanali senzorja Landsat Thematic Mapper.

kanalih uporabljenega senzorja.¹ V primeru satelita Landsat in detektorja Thematic Mapper gre za sedem kanalov od vidne do infrardeče svetlobe (slika 18.1). Ti tako imenovani delni podpisi predmeta ne opišejo v celoti, ampak podajajo le njegove posamezne značilnosti. Manj ko imamo podatkov o predmetu (manj ko ima senzor kanalov), težje opravimo klasifikacijo. Če želimo, na primer, ločevati med omenjenimi tremi tipi rabe tal, imamo pa na voljo le prvi kanal satelita Landsat, utegnemo imeti težave. Odbojnost vode in rastlinja je namreč v tem delu elektromagnetnega spektra skoraj enaka. Podobno je tudi v petem kanalu, kjer se skoraj ne razlikujeta odbojnosti rastlin in prsti. S kombinacijo podatkov v obeh kanalih pa lahko razmeroma dobro ločimo vse tri navedene tipe tal (tabela 18.1).

<i>Tip tal</i>	<i>TM 1</i>	<i>TM 5</i>
voda	nizek	zelo nizek
rastlinje	nizek	visok
prst	srednji	visok

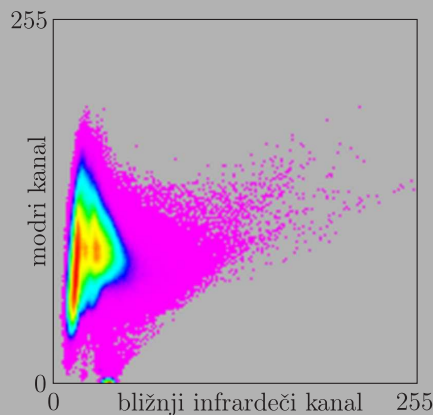
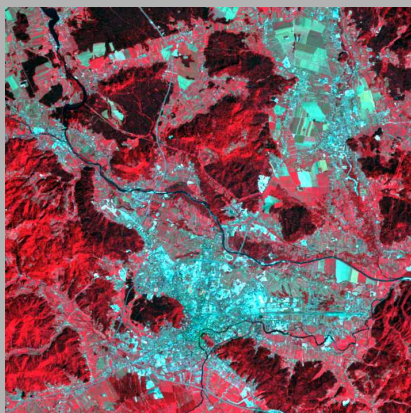
Tabela 18.1: Dvokanalni podpisi (odbojnost) značilnih tipov površja.

V splošnem velja, da večje število kanalov olajša ločevanje predmetov in s tem klasifikacijo. Seveda pa z nekritičnim dodajanjem informacij ne izboljšamo vedno rezultatov. V sosednjih kanalih imajo predmeti pogosto le rahlo različno odbojnost in torej ne prinašajo novih podatkov, se pa zaradi povečanja pomnilniških zahtev precej upočasnijo postopek klasifikacije. Izbira »pravih« kanalov je torej zelo pomemben in hkrati zahteven postopek, ki ga moramo opraviti, preden se lotimo klasifikacije. V poglavju 11 smo se podrobneje ukvarjali s satelitski sistemi in senzorji, namenjenimi opazovanju vremena (11.1), kopnega (11.2) in morja (11.3). Tabele pri opisih sistemov podajajo kanale posameznih senzorjev in njihovo uporabnost.

¹Pri hiperspektralnih senzorjih z več sto ali celo tisoč kanali lahko spektralni podpis opazujemo skoraj zvezno.

Spektralni prostor

Letalski ali satelitski posnetki so vedno podani v »običajnem« prostoru, imenujmo ga *geografski prostor*, to je tako kot površje v naravi »vidimo« (na spodnji levi sliki). Vsak piksel ima dve koordinati, na primer geografsko širino in dolžino, tretje koordinate pri satelitskih in letalskih posnetkih ponavadi ne upoštevamo. Pri določenih operacijah s posnetki, na primer pri manipulaciji histograma, pa tudi pri klasifikaciji, je koristno uporabiti večrazsežni *spektralni prostor* oziroma prostor spektralnih kanalov (feature space). V primeru dveh kanalov gre za del ravnine, pri treh za del prostora ... Koordinate v spektralnem prostoru so sive vrednosti pikslov (na spodnji desni sliki). Histogram, na primer, je ponazoritev spektralnega prostora enega samega kanala.



Pretvorba med geografskim in spektralnim prostorom je razmeroma enostavna. Vsakemu pikslu iz geografskega sistema priredimo piksel v spektralnem na mestu, ki ga določajo njegove odbojnosti oziroma sive vrednosti v posameznem kanalu.

$$X_{geo}(x,y) = \begin{bmatrix} o_1(x,y) \\ o_2(x,y) \\ \vdots \\ o_n(x,y) \end{bmatrix} = X_{spek}(o_1, o_2, \dots, o_n)$$

Celotna klasifikacija pravzaprav poteka v spektralnem prostoru, šele rezultati se zapišejo z upoštevanjem geografskih koordinat.

Kadar govorimo o razredih, moramo ločevati med *informacijskimi razredi* in *spektralnimi razredi*. Informacijski razredi so tiste kategorije, ki jih skušamo na podobah prepoznati, na primer različne vrste poljščin, vrste gozdov, geološke strukture in podobno. Spektralni razredi pa so skupine podobnih pikslov, glede na njihove sive vrednosti v posameznih kanalih. Glavni namen pri klasifikaciji je iskanje povezave med spektralnimi in informacijskimi razredi. Pri tem je le redko mogoče dobiti povezavo enega spektralnega razreda z enim informacijskim. Pogosto obstajajo spektralni razredi, ki ne ustrezajo nobenemu informacijskemu razredu, po drugi strani pa širokemu informacijskemu razredu pripada večje število spektralnih razredov. V gozdu, na primer, se spektralni razredi ločijo po starosti, vrsti in gostoti dreves, pa tudi osvetljenosti in tako dalje.

Glede na metodo dela delimo klasifikacijo podob na:

- *nenadzorovano* in
- *nadzorovano*.

Glavna razlika med obema je način, kako ustvarimo spektralne podpise. Pri nadzorovani klasifikaciji operater določi manjša območja, kjer je določen tip rabe tal, računalniški program pa iz njih izračuna spektralne podpise. Pri nenadzorovani klasifikaciji pa podpise ustvari program z matematičnim združevanjem (clustering) v n-razsežnem spektralnem prostoru.

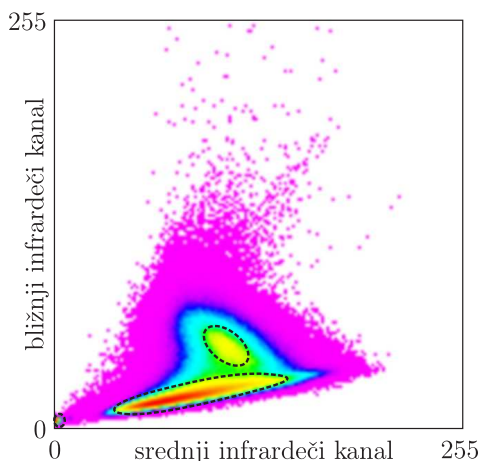
18.1 Nenadzorovana klasifikacija

Pri *nenadzorovani klasifikaciji* piksele razporedimo v razrede glede na njihovo »naravno« združevanje v spektralnem prostoru. Za razliko od nadzorovane pri nenadzorovani klasifikaciji v prvem koraku ne potrebujemo nikakršnega vodenja o površju. Pri tem upoštevamo, da so vrednosti enake rabe tal (ali podobni predmeti) blizu v spektralnem prostoru, vrednosti različnih tipov rabe tal pa so daleč narazen. To je sicer nekoliko idealizirano, saj vedno pride do določenega prekrivanja razredov in je zato ločevanje precej težavno, poleg tega pa je, kot smo omenili, posamezni informacijski razred pogosto sestavljen iz več spektralnih. Za nenadzorovano klasifikacijo lahko torej rečemo, da najprej z upoštevanjem številčnih vrednosti podatkov določimo spektralne razrede, ki jim v nadaljevanju priredimo informacijske razrede.

Postopek nenadzorovane klasifikacije razdelimo na:

- *gručenje* (združevanje v razrede) in
- *prepoznavanje razredov*.

Gručenje ali *klastrska analiza* (cluster analysis) je postopek združevanja večrazsežnih podatkov v skupine ali gruče. Pri tem uporabljamo različne matematične algoritme, ki so praviloma računsko precej zahtevni. Najpreprostejši med njimi je *K-Means* (K-povprečje), ki temelji na iskanju podobnosti. Pri tem postopku naključno izberemo določeno število centrov gruč, glede na te centre v gruče razporedimo vse piksele posnetka z upoštevanjem metode najmanjše razdalje (posamezen piksel uvrstimo v razred, od katerega centra je najmanj oddaljen). Nato znova izračunamo položaj centrov in postopek ponavljamo toliko časa, da so spremembe v klasifikaciji dovolj majhne. Nekoliko izboljšan algoritem K-Means je *ISODATA* (iterative self-organizing data analysis



Slika 18.2: Gruče v spektralnem prostoru.

technique), ki ga najdemo v večini sistemov za obdelavo podob. ISODATA deluje dinamično, kar pomeni, da lahko združuje centre sorodnih razredov, briše majhne gručice in velike razdeli na več delov.

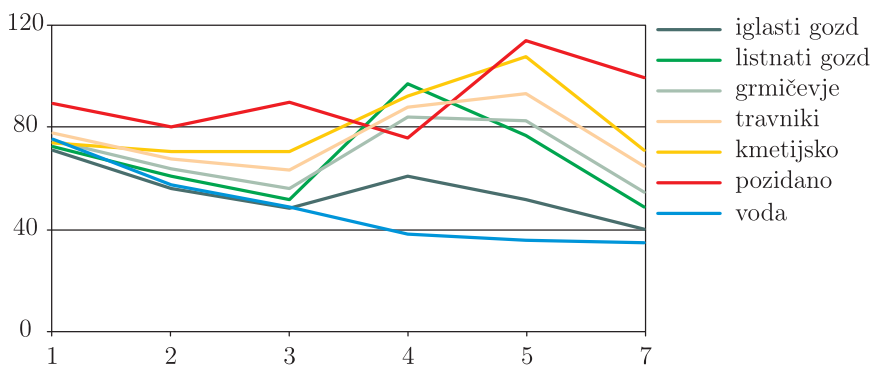
Razredi, ki jih dobimo z gručenjem so spektralno homogeni in predstavljajo zaključene celote. Vendar ne vemo, kateri rabi tal posamezna gruča ustreza. To določimo s tako imenovanim *prepoznavanjem razredov*, postopkom, pri katerem opazovalec ugotovi, kateri razredi se na posnetku nahajajo in jim dodeli ustrezne oznake. Nekaterim razredom ustreza samo ena gruča, drugim bolj zapletenim, na primer gozdu, pa jih priredimo več.

18.2 Nadzorovana klasifikacija

Pri *nadzorovani klasifikaciji* za ustvarjanje spektralnih vzorcev uporabimo svoje poznavanje zemeljskega površja. Na nek način računalniški program »naučimo«, kaj je na primer voda in kaj trava, nato pa ta svoje znanje prenese na celoten posnetek. Postopek nadzorovane klasifikacije razdelimo na:

- *ustvarjanje in urejanje vzorcev* in
- *razvrščanje v razrede* (klasifikacija).

Prvi in najpomembnejši korak pri nadzorovani klasifikaciji je izbira vzorcev. Pri tem operater na računalniškem zaslonu označi območja, kjer ve, da se nahaja določen tip površja. Pri nadzorovani klasifikaciji torej najprej določimo informacijske razrede, program za obdelavo posnetkov pa iz njih določi ustrezne spektralne. Ti so podani s spektralnim podpisom, ki ponavlja obsega povprečne, največje in najmanjše vrednosti, standardne odklone in podobno v vseh kanalih, ki jih imamo na razpolago (slika 18.3). Postopek določanja vzorcev poteka interaktivno, saj moramo kakovost informacijskih razredov ves čas preverjati in jih po potrebi izboljšati, dopolniti, premakniti ali zamenjati.



Slika 18.3: Spektralni podpisi učnih (testnih) vzorcev.

Za vsakega izmed razredov je treba izbrati dobre, to je homogene in dovolj velike učne vzorce. Slednje ponavadi določamo glede na poznavanje površja, pa tudi s primerjavo topografskih in različnih tematskih kart.

Pri klasifikaciji oziroma razdelitvi v razrede vsak piksel na podobi primerjamo s poznanimi podpisi v vseh kanalih. Pri tem lahko uporabimo več različnih primerjalnih oziroma klasifikacijskih algoritmov, na primer:

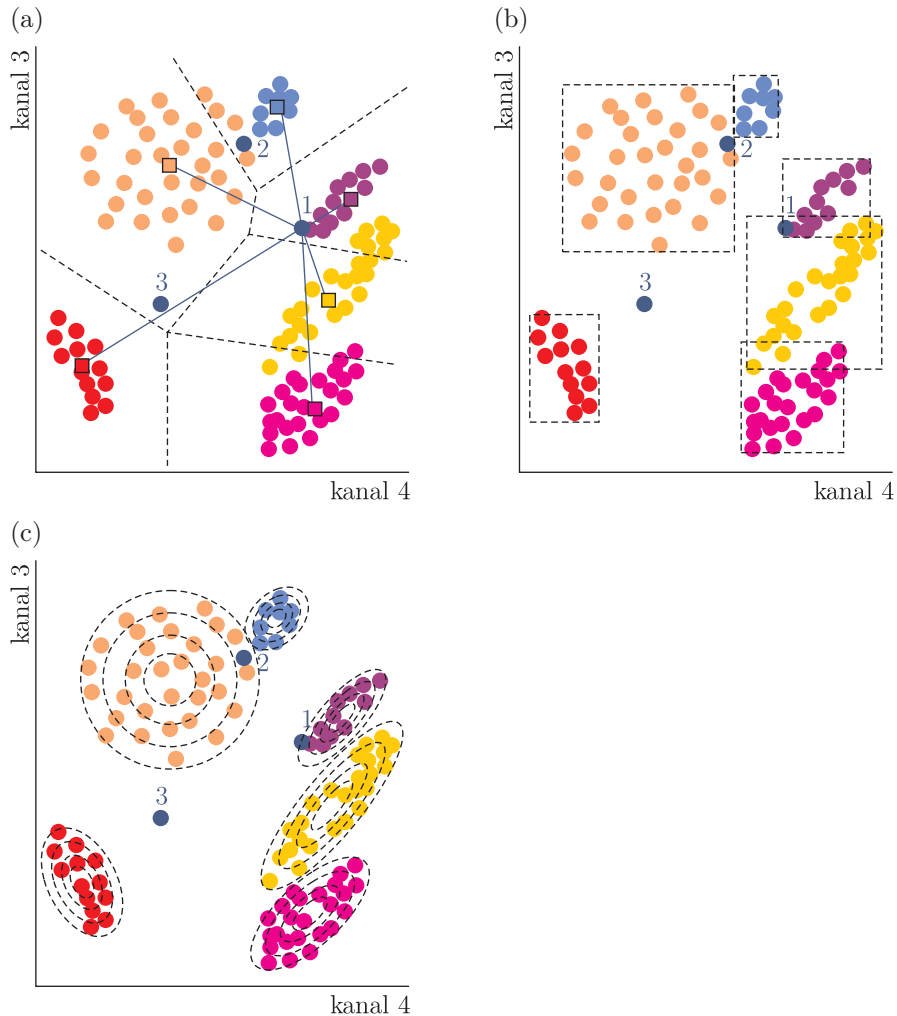
- metodo najmanjše razdalje,
- paralelepipedno metodo ali
- metodo največje verjetnosti.

V izhodni tematski sloj zapišemo vrednost razreda, ki je pri danih vhodnih podatkih najverjetnejši. Kakovost same klasifikacije je močno odvisna od uporabljenega algoritma.

Pri *metodi najmanjše razdalje* razporedimo piksel v razred, od katerega povprečja je najmanj oddaljen (slika 18.4 a). V primeru na sliki bi piksel z oznako 2 dodelili v zgornjo desno kategorijo, kljub temu da verjetneje pripada zgornji levi. Metoda najmanjše razdalje je računsko zelo hitra, vendar je zaradi neupoštevanja razpršenosti pikslov bolj podvržena napakam.

Pri *paralelepipedni metodi* poleg povprečja sivih vrednosti upoštevamo tudi njihovo razpršenost. Tako imenovano klasifikacijsko območje določata največja in najmanjša vrednost odboja v posameznem razredu (za vsak kanal posebej). V primeru dveh kanalov gre torej za pravokotnik, v več razsežnostih pa za paralelepiped (kvader). Paralelepipedna metoda piksel uvrsti v tisto kategorijo, v katero padejo njegove sive vrednosti (slika 18.4 b). V primeru, da piksel ne pade v noben razred, dobi oznako »neklasificirano«. Težave pri klasifikaciji pa imamo tudi v primeru, ko se pasovi prekrivajo. Na sliki bi piksel 3 uvrstili v kategorijo neklasificirano. Precej težav pa bi imeli tudi s pikslom 1, ki bi lahko dobil oznako »neznano«. Paralelepipedna metoda je nekoliko počasnejša od metode najmanjše razdalje.

Metoda največje verjetnosti upošteva pri razvrščanju pikslov tako povprečja razredov kot tudi variance in korelacije med njimi. Pri tem predvideva, da so piksli v spektralnem prostoru razporejeni normalno (Gaussovo). Metoda največje verjetnosti v omenjenem prostoru ustvari elipsoidne ploskve enake verjetnosti (v dveh razsežnostih

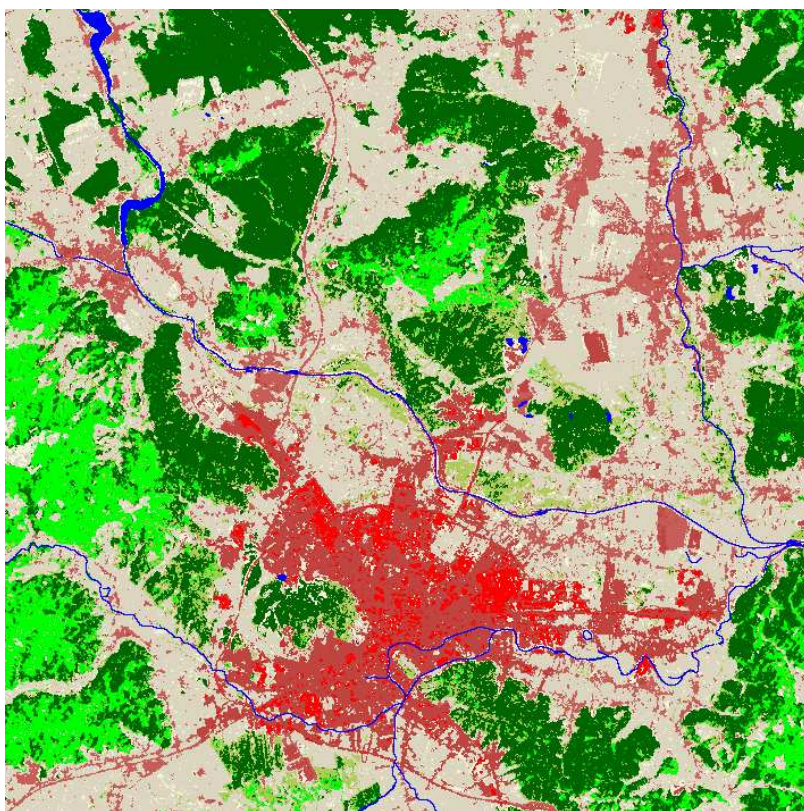


Slika 18.4: Pri klasifikaciji uporabljamo več različnih algoritmov, na primer metodo najmanjše razdalje (a), paralelepipedno metodo (b) ali metodo največje verjetnosti (c).

gre za običajno elipso; slika 18.4 c). Klasifikacija je v tem primeru bolj točna kot v prejšnjih dveh, je pa seveda računalniško mnogo zahtevnejša. Kot lahko vidimo na sliki, bi z metodo največje verjetnosti vse »problematične« piksle razvrstili pravilno. Metodo največje verjetnosti lahko dopolnimo s podajanjem tako imenovane a priori (predhodno znane) verjetnosti. Ta pove, kako verjetno je, da na posameznem posnetku najdemo določeno rabo tal, na primer vodo.

18.3 Ovrednotenje klasifikacije

Po razdelitvi v razrede nas pri klasifikaciji satelitskih posnetkov zanima tudi natančnost. Pri njenem ovrednotenju po celotnem posnetku porazdelimo večje število testnih »točk«, to je pikslov, za katere vemo, katero vrsto rabe tal vsebujejo. Slednje



Slika 18.5: Rezultat nadzorovane klasifikacije satelitskega posnetka.

ugotovimo bodisi s terenskim ogledom ali z opazovanjem podob manjšega merila, na primer letalskih posnetkov, ali natančnih tematskih kart. Vrednosti v znanih področjih nato primerjamo z rezultati klasifikacije in izračunamo odstotek prekrivanja. Z analizo kakovosti lahko tudi ugotovimo, kateri so največkrat napačno klasificirani razredi.

Kakovost postopka klasifikacije podaja *matrika napak* (error matrix). Gre za tabelo, ki primerja rezultat klasifikacije z referenčnim podatkom in za vsak razred podaja število pravilno in napačno klasificiranih pikslov. Matrika napak omogoča izračun več statističnih pokazateljev natančnosti in odkrivanje razredov, kjer je mešanje pikslov najbolj močno. Preglednica 18.2 prikazuje matriko, dobljeno na podlagi 800 vzorčnih točk pri oceni natančnosti klasifikacije pokrovnosti območja Krasa. Vidimo lahko, da so razredi precej dobro določljivi, še največ težav je z grmičevjem in kmetijskimi površinami.

Pri analizi natančnosti ločimo *izdelovalčevo natančnost* (producers accuracy) in *uporabnikovo natančnost* (users accuracy). Prva je namenjena analitiku, ki je izdelal klasifikacijo, in jo izračunamo kot delež pravilno klasificiranih referenčnih točk. Druga pa služi kot vodnik za zanesljivost rezultata kot sredstva za napovedovanje in je podana kot delež pravilno klasificiranih točk glede na celotno število točk v posamezni kategoriji. Preglednica 18.3 podaja oceno natančnosti za klasifikacijo območja Krasa. Natančnost presega 92 %, kar je zelo dober rezultat – splošno namreč velja, da je pri klasifikaciji natančnost nad 90 % dobra, nad 80 % pa zadovoljiva. Primerjamo lahko

	Razred	1	2	3	4	5	6	7	Klasificirane
1	gozd	312	1	2	1				316
2	grmičevje	6	67	2	6				81
3	travniki	4	4	94	5				107
4	kmetijsko	3	10	1	128	5			147
5	pozidano	3			5	59		1	68
6	voda					1	19		20
7	odprto	1	2					58	61
	Referenčne	329	84	99	145	65	19	59	800

Tabela 18.2: Matrika napak pove, kako zanesljivo so določeni posamezni razredi. S primerjavo klasificiranih in referenčnih točk (zajetih s posnetkov ortofoto) lahko v prikazanem primeru ugotovimo, da sta najpogostejše napačno klasificirani kategoriji grmičevje in kmetijsko.

Razred	Referenca	Klasifikacija	Pravilno	Natančnost (%)	
				Izdelovalec	Uporabnik
gozd	329	316	312	94,8	98,7
grmičevje	84	81	67	79,8	82,7
travniki	99	107	94	95,0	87,9
kmetijsko	145	147	128	88,3	87,1
pozidano	65	68	59	90,8	86,8
voda	19	20	19	100,0	95,0
odprto	59	61	58	98,3	95,1
Skupaj	800	800	737		

Tabela 18.3: Ocena natančnosti klasifikacije, dobljena s primerjavo kontrolnih točk in posnetkov ortofoto.

tudi izdelovalčevo in uporabnikovo natančnost in ugotovimo, da je bilo 95 % gozda pravilno klasificiranega (podatek za izdelovalca) in da 99 % območij, označenih kot gozd, ustreza dejanskemu stanju (informacija za uporabnika).

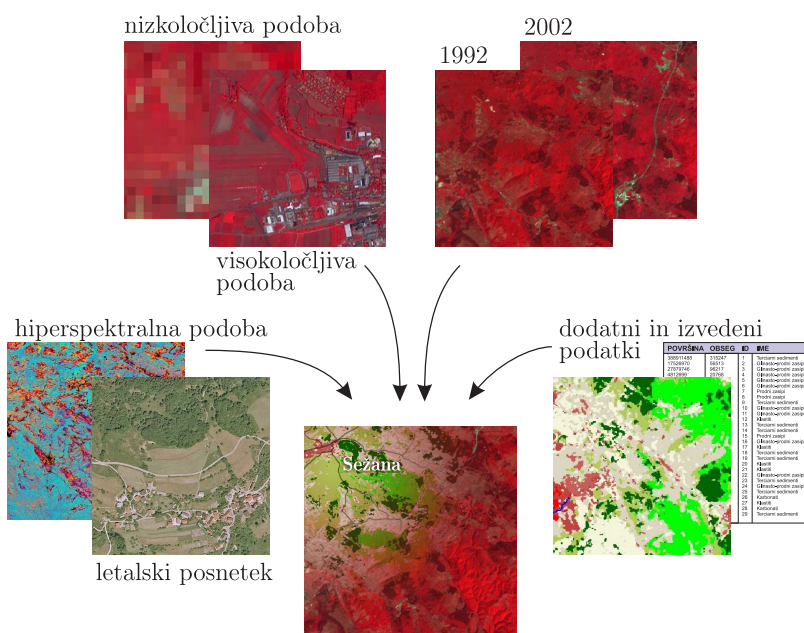
Vprašanja

1. Opiši postopek klasifikacije satelitskih posnetkov.
2. Kaj je spektralni prostor?
3. Kaj je nadzorovana klasifikacija satelitskih posnetkov?
4. Kaj je nenadzorovana klasifikacija satelitskih posnetkov?
5. Kako ovrednotimo klasifikacijo?

19 Integracija podatkov

V začetkih analognega daljinskega zaznavanja, ko je bil edini vir podatkov letalska fotografija, so bile možnosti integracije podatkov različnih virov zelo omejene. Stanje je precej drugačno danes, ko imamo na voljo podatke najrazličnejših senzorjev, praviloma v digitalni obliki. Povezovanje informacij je pogosto orodje pri interpretaciji in analizi. Integracija podatkov zajema kombiniranje podatkov z namenom pridobiti boljše ali več informacij (slika 19.1). Kot bomo podali v nadaljevanju, se pri tem ukvarjamo s povezovanjem:

- veččasovnih,
- večločljivostnih ali
- večsenzorskih podatkov.



Slika 19.1: Integracija podatkov daljinskega zaznavanja.



Slika 19.2: Integracija posnetkov različnih ločljivosti in različnih senzorjev. Prikazana je povezava večspektralnih podob Landsat in pankromatskih SPOT.

O *veččasovnem povezovanju* podatkov smo govorili že v razdelku 17.1, kjer smo se ukvarjali z računanjem razlik med podobami. Podobe, zajete ob različnih časih, primerjamo in tako odkrijemo spremembe. Veččasovno opazovanje slednjih lahko dosežemo s preprostimi metodami, kot je odštevanje, ali bolj zapletenimi, kot je primerjava večkratne klasifikacije ali celo klasifikacija z integriranimi podatki iz različnih obdobj.

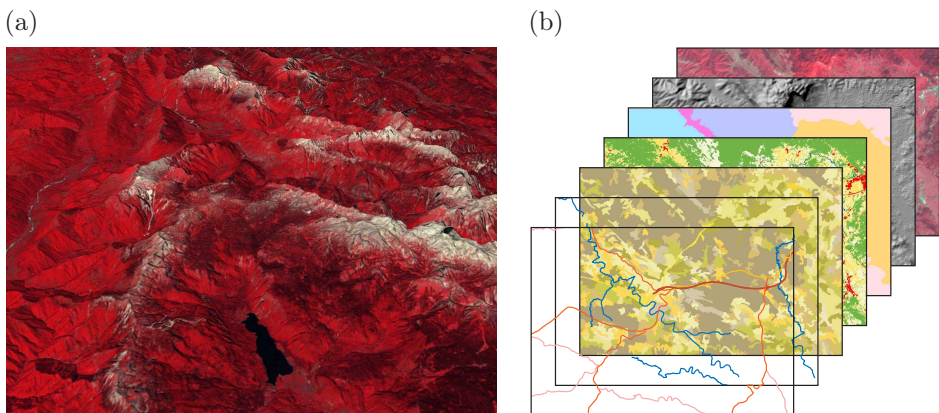
Večločljivostno povezovanje je uporabno v različnih aplikacijah. Povezovanje podatkov visoke prostorske ločljivosti s podatki slabše ločljivosti lahko izostri podrobnosti na podobah in tako olajša prepoznavanje predmetov. Za tovrstne namene so zelo uporabni podatki satelitov, kot so Landsat, SPOT, IKONOS in QuickBird, ki imajo poleg pankromatskega kanala z visoko ločljivostjo tudi večspektralne z nižjo ločljivostjo. Če podatke obeh načinov snemanja združimo, ohranimo dobro spektralno ločljivost in povečamo prostorsko.

S tako imenovano *večsenzorsko integracijo* lahko združujemo podatke različnih senzorjev (slika 19.2). Pogost primer tovrstnega združevanja je povezava večspektralnih optičnih podatkov z radarskimi podobami (slika 19.3). Oba spektralno različna načina predstavitve površja drug drugega dopolnjujeta. Optični podatki poskrbijo za podrobne spektralne informacije, ki jih uporabimo za ločevanje tipov tal. Radarski posnetki pa poudarijo strukturne podrobnosti na površju.

Osnovni pogoj za večsenzorsko integracijo je predhodna geometrična registracija podatkov, bodisi drugega glede na drugega ali glede na izbrani koordinatni sistem. Če imamo geokodirane podobe, lahko povežemo s podatki daljinskega zaznavanja tudi zunanje podatke, na primer, digitalni model višin. Model višin lahko uporabimo pri klasifikaciji podob, saj lahko z njim zmanjšamo vpliv naklonov, senc in nadmorske višine, s čimer lahko znatno izboljšamo kakovost klasifikacije. Digitalni model višin lahko uporabimo tudi za ustvarjanje trirazsežnih perspektivnih pogledov, pri katerih prek modela napnemo podobo daljinskega zaznavanja. S tem izboljšamo vizualizacijo in olajšamo interpretacijo (slika 19.4 a).



Slika 19.3: Intergracija podatkov optičnega (Landsat) in radarskega (ERS) senzorja.



Slika 19.4: Perspektivni pogled (a) in integracija podatkov v sistemih GIS (b).

Združevanje podatkov različnih tipov in virov, kot smo ga opisali, predstavlja vrhunec postopka analize in interpretacije podob. V digitalnem okolju, kjer so vsi podatki georegistrirani v skupnem koordinatnem sistemu, je možnost analiz in pridobivanja novih informacij ogromna. Podatke daljinskega zaznavanja lahko povežemo z geografskimi informacijskimi sistemi (GIS) in jih kot enakovreden informacijski sloj vključimo v analize (slika 19.4 b). V GIS lahko vključimo vsak podatek z geografsko komponento, na primer digitalni model višin ali sloj prsti, gozdnih drevesnih vrst, cestnega omrežja in še veliko drugih. Ne nazadnje lahko v analizah z orodji GIS uporabimo tudi rezultate klasifikacije satelitskih posnetkov.

Z uporabo in analizo različnih podatkov lahko pridobimo mnogo boljše in bolj natančne informacije kot z enim samim virom. Olajšamo lahko veliko obstoječih aplikacij in hkrati ustvarjamo nove. V poglavju 20 se bomo ukvarjali z nekaterimi primeri upo-

rabe tehnologije daljinskega zaznavanja in posebno pozornost posvetili tudi integraciji podatkov.

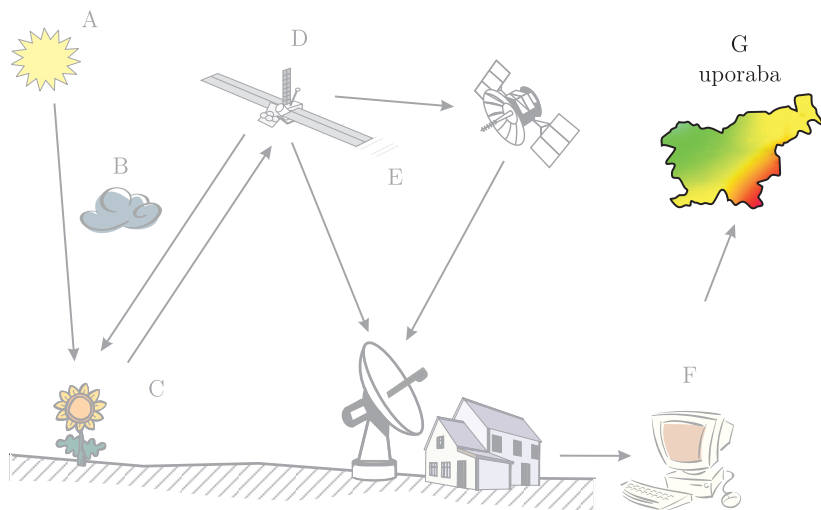
Vprašanja

1. Opiši primer integracije podob.

20 Primeri uporabe

Možnosti za uporabo daljinskega zaznavanja je ogromno. Nekatere so bolj zanimive, druge manj, nekatere raziskovalne, druge popolnoma rutinske ... Interpretirane podobe, zaznane iz satelitov in letal, lahko uporabljamo za:

- določanje pokrovnosti in rabe tal ter njuno analizo in časovno primerjavo,
- opazovanje vegetacije in njenih sprememb v različnem časovnem obdobju (sezonsko, večletno),
- napovedovanje stanja pridelkov v kmetijstvu in opazovanje posledic suše,
- spremljanje stanja gozdov, zaraščanja in zmanjševanja njihovega obsega,
- opazovanje vpliva človekove dejavnosti na vegetacijo, ocenjevanje ekološke škode,
- spremljanje urbanih površin,
- opazovanje posegov v prostor,
- opazovanje legalnih in nelegalnih odlagališč odpadkov,
- izdelavo modelov višin oziroma reliefa,
- stereo opazovanje površja,
- kartiranje, izdelavo topografskih in tematskih kart,
- opazovanje kopenskih in morskih voda, opazovanje poplav,
- napovedovanje vremena, opazovanje globalnih sprememb klime,
- spremljanje in napovedovanje vremenskih ujm,
- opazovanje oljnih madežev na morju, spremljanje ekoloških katastrof,
- opazovanje naravnih nesreč, hitro kartiranje in oceno škode,
- termično opazovanje
- spremljanje emisij, toplotnega onesnaženja, učinka tople grede,
- opazovanje (gozdnih) požarov,
- modeliranje pojavov v okolju,
- odkrivanje arheoloških najdišč in preteklih komunikacij,
- geološko kartiranje, opazovanje prelomov,
- odkrivanje nafte in rudnin,



Slika 20.1: Uporaba je zadnji korak postopka daljinskega zaznavanja.

- opazovanje vulkanov in potresov,
- opazovanje vojaških objektov in razkrivanje vojnih grozodejstev,
- napovedovanje izbruhov bolezni, ki so povezane s podnebnimi in vegetacijskimi razmerami,
- raziskave osončja, planetov (Mars, Saturn) in njihovih satelitov (Luna) ...

Pregleden opis različnih aplikacij daljinskega zaznavanja močno presega obseg te knjige. Gre namreč za izrazito interdisciplinarno področje, ki je ves čas v razvoju. Novi snemalni sistemi in nove tehnike obdelave dajejo nove rešitve ali vedno boljše odgovore na zastavljena vprašanja. Bralec, ki ga zanimajo možnosti uporabe satelitskih in letalskih podob v določeni stroki, dobi največ informacij v publikacijah specializiranih revij in v svetovnem spletu.

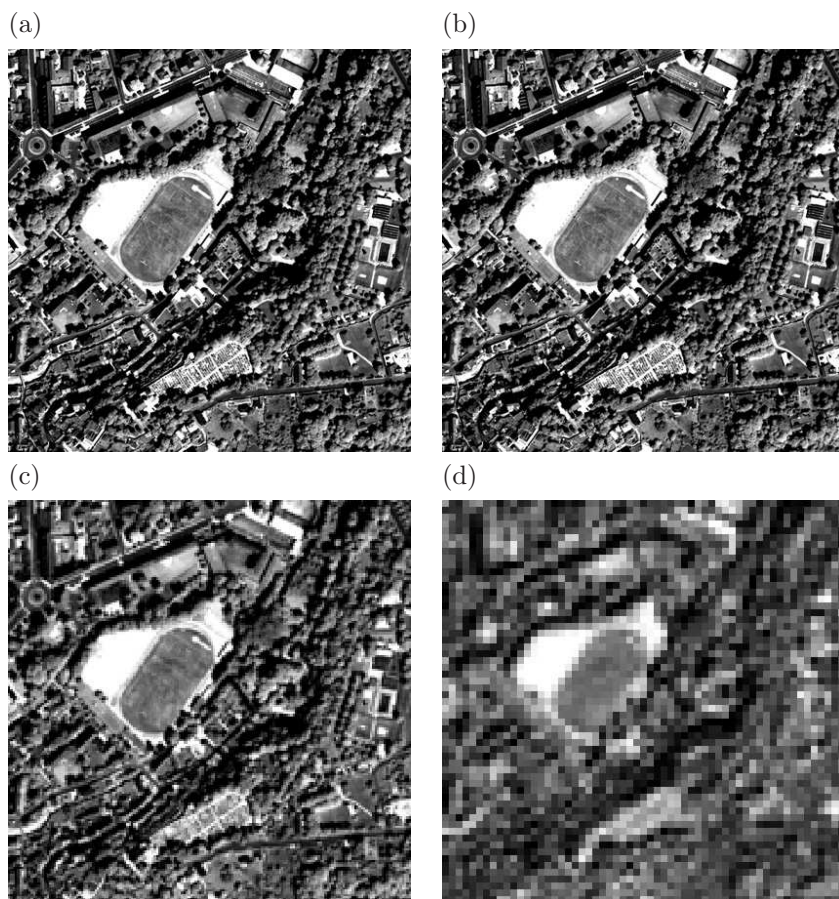
Spletni iskalnik Google v trenutku pisanja knjige indeksira več kot 50 milijonov strani o daljinskem zaznavanju (remote sensing), od katerih jih približno tri petine govorijo o aplikacijah. Poleg splošnih in namenskih knjig, na primer o obdelavi podob, uporabi v posamezni disciplini, obstaja več revij, ki so namenjene samo daljinskemu zaznavanju. Omeniti velja vsaj najpomembnejše, to je *Canadian Journal of Remote Sensing*, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *International Journal of Remote Sensing*, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (PE&RS)* in *Remote Sensing of Environment*. Domače publikacije, ki prinašajo članke o opazovanju iz satelitov in letal, so *Geodetski vestnik*, *Geografski vestnik*, *Geografski zbornik*, *Geologija*, *Življenje in tehnika* ter zborniki simpozijev *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji*.

V nadaljevanju si na kratko oglejmo nekaj primerov uporabe tehnologije daljinskega zaznavanja v Sloveniji. Pregled ne poskuša biti celovit, temelji pa na publikacijah, objavljenih v zadnjih nekaj letih.

20.1 Kartiranje in posodabljanje kart

Topografske karte kljub vse širšemu razmahu številnih topografskih baz ostajajo pomemben vir in način predstavitve podatkov o stanju prostora. Zaradi vizualne nazorosti, celovitosti prikaza in preprostosti uporabe ostajajo podlaga za mnoge aktivnosti, vezane na prostor (Petrovič, 2006). Izdelovanje kart je eno najpomembnejših področij uporabe daljinskega zaznavanja – satelitskega za srednja in manjša merila in letalskega za velika merila.

Najpomembnejši vir podatkov za kartografijo je letalsko snemanje – postopek pridobivanja fotografij, pretežno namenjenih zajemu topografskih podatkov in evidentiranju stanja prostora. V Sloveniji sistematično ciklično snemanje izvajamo že od leta 1975. Fotografije so se zajemale v različnih merilih, od sredine devetdesetih let prejšnjega stoletja pa v enotnem merilu 1 : 17 400. Eden najpomembnejših izdelkov iz letalskih fotografij je ortofoto – skeniran posnetek, ki je z upoštevanjem centralne projekcije po-



Slika 20.2: Primerjava simuliranih pankromatskih posnetkov visoke in srednje ločljivosti – 0,61 m originalni posnetek QuickBird (a), 1 m IKONOS (b), 5 m SPOT 5 (c) in 15 m Landsat 7 (d). Visokoločljivi satelitski posnetki imajo ločljivost, ki je primerljiva z letalsko fotografijo (Oštir, 2004).

snetka in modela višin transformiran (razpačen) v državni koordinatni sistem. Izdelek je v metričnem smislu enak linijskemu načrtu ali karti. Poleg tega so podatki cikličnega snemanja osnovni vir za zajem podatkov za različne topografske karte, v zadnjem času predvsem državne topografske karte v merilu 1 : 5000 (DTK 5) in 1 : 50 000 (DTK 50). Z uporabo stereoparov se določajo trirazsežni prostorski položaj posameznih objektnih tipov na teh kartah, poleg tega pa se uporabijo tudi za določitev tematskih atributov (Duhovnik, 2005; Petrovič, 2006).

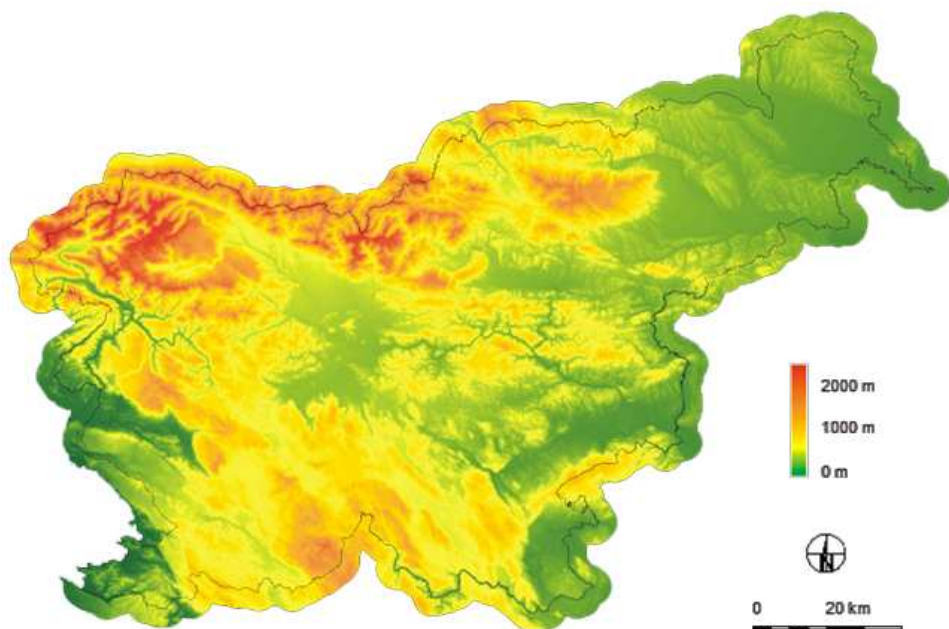
Večspektralni satelitski posnetki so primerni predvsem za tematsko kartiranje, na primer pokrovnosti, temperature tal, vegetacije, stopnje poseljenosti in podobno. Uporabljamo pa jih tudi kot vir podatkov za topografsko kartiranje manjšega merila. Posnetki satelita SPOT, na primer, so primerni za ustvarjanje satelitskih ortopodob in izdelavo kart merila 1 : 50 000 in manj ... Za izdelavo ortopodob so na voljo tudi visokoločljive podobe satelitov IKONOS, QuickBird, OrbView-3, in EROS-1A (Kokalj et al., 2006). Slednje z metrsko ločljivostjo že posegajo do natančnosti, ki jo dosega letalska fotografija (slika 20.2).

20.2 Izdelava digitalnih modelov višin

Digitalni model višin (DMV) je eden najpomembnejših podatkovnih slojev v analizah z geografskimi informacijskimi sistemi. Načini izdelave modelov višin so se sčasoma spreminjali. Še vedno je najbolj v rabi klasična metoda izdelave modelov z interpolacijo, na primer podatkov iz plastnic in značilnih točk, zajetih s topografskih kart, ali pa vseh razpoložljivih višinskih podatkov. Že nekaj časa se uporablja tudi letalska fotografija, katere tehnologijo so prenesli tudi na področje optičnih in radarskih satelitskih sistemov (Triglav Čekada, 2004). Razvoj kinematičnih sprejemnikov GPS in inercialnih navigacijskih sistemov (INS) je olajšal letalsko fotogrametrijo, hkrati pa omogočil tudi razvoj lidarskega snemanja. Lidar je trenutno najbolj natančna tehnika za izdelavo modelov višin.

Prvi poskusi izdelave DMV iz podob daljinskega zaznavanja v Sloveniji so bili omejeni na manjša območja. Sistematična izdelava se je začela s projektom digitalnega ortofota DOF 5. Ob izdelavi slednjega se je namreč z metodo avtomatskega slikovnega ujemanja zajemal tudi višinski model DMR 25 (Kosmatin Fras, 2004). Žal pa je izdelava ortoforta potekala več kot deset let (konec leta 2002 je bila Slovenija pokrita v celoti), zaradi česar so bili izdelani modeli nehomogeni in zelo različne kakovosti. Pri uporabi več »listov« DMR 25 hkrati pride do znatnih odstopanj na robovih.

Bolj homogena in precej hitreje izdelana sta bila modela višin, ki sta ju naročila Ministrstvo za obrambo in podjetje Mobitel. Francosko podjetje SPOT Image je v času od leta 1995 do 1999 izdelalo DMV z ločljivostjo 20 m iz stereo satelitskih posnetkov SPOT. Model zajema Slovenijo in približno stokilometrski pas okrog nje, pri obdelavi pa so bili narejeni tudi ortofoto posnetki ločljivosti 10 m (Logar, 2000). Za potrebe načrtovanja omrežja mobilnih komunikacij pa je Znanstvenoraziskovalni center SAZU s tehniko radarske interferometrije izdelal InSAR DMV 25 z ločljivostjo 25 m (slika 20.3). Model je kot vir uporabil radarske satelitske posnetke ERS-1 in 2 iz obdobja med 1995 in 1999, zajel pa je Slovenijo in 25-kilometrski obmejni pas. Sama obdelava je bila opravljena leta 1999 v manj kot pol leta (Oštir et al., 2000). Do leta 2006 je bil InSAR DMV 25 najbolj natančen in statistično homogen model za območje celotne države.



Slika 20.3: Digitalni model višin, ki je bil izdelan s tehniko radarske interferometrije za načrtovanje omrežja mobilnih komunikacij v podjetju Mobitel (Oštir et al., 2000).

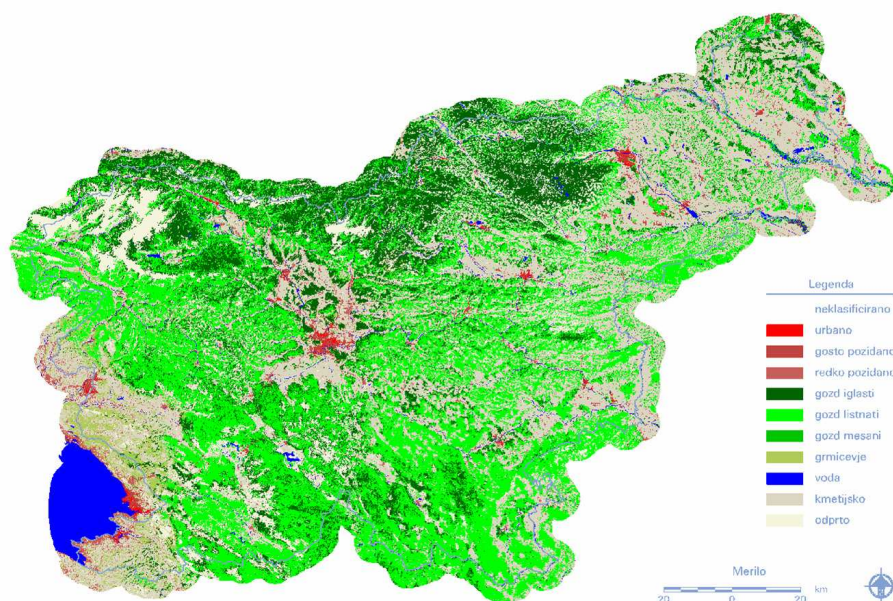
20.3 Določanje pokrovnosti oziroma rabe tal

Raba tal je definirana kot namen, za katerega ljudje izkoriščajo nek kos zemljišča (poljedelstvo, trgovinsko, industrija, rekreacija ...). Gre za precej abstrakten pojem, ki ga včasih ne moremo določiti objektivno niti s podrobnim ogledom. *Pokrovnost* po drugi strani pa predstavlja konkretne podatke o površju (redko pozidano, vegetacija, voda, travniki ...). Pokrovnost lahko neposredno opazujemo s tehnikami daljinskega zaznavanja.

Daljinsko zaznavanje oziroma klasifikacija satelitskih posnetkov predstavljata natančno in cenovno ugodno alternativo klasičnim tehnikam kartiranja pokrovnosti. Terenski pregled je primeren za manjša območja in občasne študije, ne moremo pa z njim v razumnem času z realnimi stroški pokriti večjih površin. Klasifikacija satelitskih in letalskih posnetkov se je v preteklosti izkazala za primerno izbiro, saj omogoča tako podrobno klasifikacijo kot hitro izvedbo in časovne primerjave.

Za celotno območje Slovenije obstajajo številni digitalni sloji pokrovnosti oziroma rabe tal. Na Ministrstvu za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, na primer, so izdelali lokacijsko natančne in lahko dostopne podatke o rabi kmetijskih zemljišč. Na svoji karti ločijo 21 razredov rabe tal, ki so bili dobljeni na podlagi vizualne interpretacije digitalnih posnetkov ortofoto (Kokalj in Oštir, 2005).

Evropska okoljska agencija (European Environment Agency, EEA) je z namenom določitve smiselne razvrstitve pokrovnosti tal in izdelave kakovostne baze podatkov pripravila program za usklajevanje informacij o okolju z imenom CORINE (COoRdination of INformation on the Environment) Land Cover. Interpretacija je bila v Sloveniji prvič opravljena v letih 1996 in 1997, v letu 2003 pa je bil končan projekt I&CLC2000, ki opi-



Slika 20.4: Rezultat klasifikacije satelitskih posnetkov Landsat, ki je bila opravljena za načrtovanje omrežja mobilnih komunikacij. Klasifikacija vsebuje deset razredov, določenih glede na možnost širjenja elektromagnetnega signala (Oštir et al., 2000).

suje stanje iz leta 2000 (Duhovnik, 2004). CORINE zelo natančno določa metodologijo in razdelitev kategorij na tri ravni ter omogoča časovno in prostorsko primerljivost na evropski ravni. Kot osnovni vir podatkov so bili uporabljeni ortorektificirani satelitski posnetki Landsat, sloj pokrovnosti pa je bil pridobljen z vizualno interpretacijo (Kokalj in Oštir, 2005).

Statistični GIS pokrovnosti in rabe tal, izdelan na Statističnem uradu Republike Slovenije, združuje klasifikacijo posnetkov Landsat ter primerjavo in prekrivanje rezultata s pomožnimi zbirkami vektorskih podatkov. Njegova dobra stran je metodološka razčlenjenost in poznavanje metapodatkov virov, iz katerih je bil sloj izdelan, ter redno obnavljanje sloja, v primerjavi s slojem CORINE pa tudi manjša velikost celice (Šabić et al., 1998; Skumavec in Šabić, 2002).

Na Znanstvenoraziskovalnem centru SAZU je bil za potrebe načrtovanja omrežja mobilne telefonije izdelan sloj pokrovnosti s klasično nadzorovano klasifikacijo satelitskih posnetkov Landsat (slika 20.4). Kategorije so opredeljene glede na oviro, ki jo predstavljajo za potovanje elektromagnetnega signala (različne vrste urbanih površin, iglasti, listnati in mešani gozd, grmičevje, kmetijske površine, vode in odprte površine). Podatkovni sloj poleg ozemlja Slovenije vsebuje tudi petkilometrski obmejni pas (Oštir et al., 2000).

Opazovanje satelitskih in letalskih podob, zajetih v različnih časih omogoča tudi časovne primerjave in opazovanje sprememb. Petek et al. (2004) so na primeru Podolševe prikazali uporabnost letalskih posnetkov iz leta 1964. Posnetke so razpačili v obstoječi koordinatni sistem in jih primerjali z najnovejšimi posnetki ortofoto, po metodologiji, ki

je bila uporabljena za interpretacijo rabe tal pri že omenjeni karti kmetijskih zemljišč. Zanimiv pristop je uporabil tudi Krevs (2004), ki je med iskanjem načina izboljšanja kakovosti zajema rabe tal v Ljubljani in njeni mestni regiji preizkusil poševne in navpične stereoposnetke iz balona. Poleg tega je podatke daljinskega zaznavanja povezal s podatki o »uporabnikih prostora« (na primer o prebivalstvu, poslovnih in javnih dejavnostih) in »značilnostih območij« (na primer o reliefu).

20.4 Opazovanje gozdov

Usmerjenost v trajnostni razvoj gozdov in njihovih funkcij zahteva učinkovito zbiranje gozdarskih informacij. V preteklosti je bilo v glavnem v uporabi terestrično opazovanje, ki pa je relativno zamudno in zato drago. Kot primerna alternativa ali celo kot glavni vir se v gozdarstvu uveljavlja daljinsko zaznavanje, še posebej opazovanje s sateliti visoke ločljivosti (SPOT 5, IKONOS, QuickBird). Zadnjih nekaj let pa zbuja vse več pozornosti tehnologija lidarskega snemanja, ki se uveljavlja tudi v Sloveniji (Kobler et al., 2006; Kobler in Zafran, 2006).

Na področju daljinskega zaznavanja zemeljskega površja šteje lidar (laserski analog radarju) med najtočnejše in najpodrobnejše vire podatkov o rastlinskem pokrovu. Zaradi svojih tehnoloških posebnosti (prodiranje v notranjost gozdnega sestoja, trirazsežna narava podatkov, prostorska ločljivost velikostnega reda decimetra ali celo manj) v sposobnosti pri ocenjevanju količine biomase in strukture gozdnih sestojev lidar presega najnovejše pasivne senzorje.

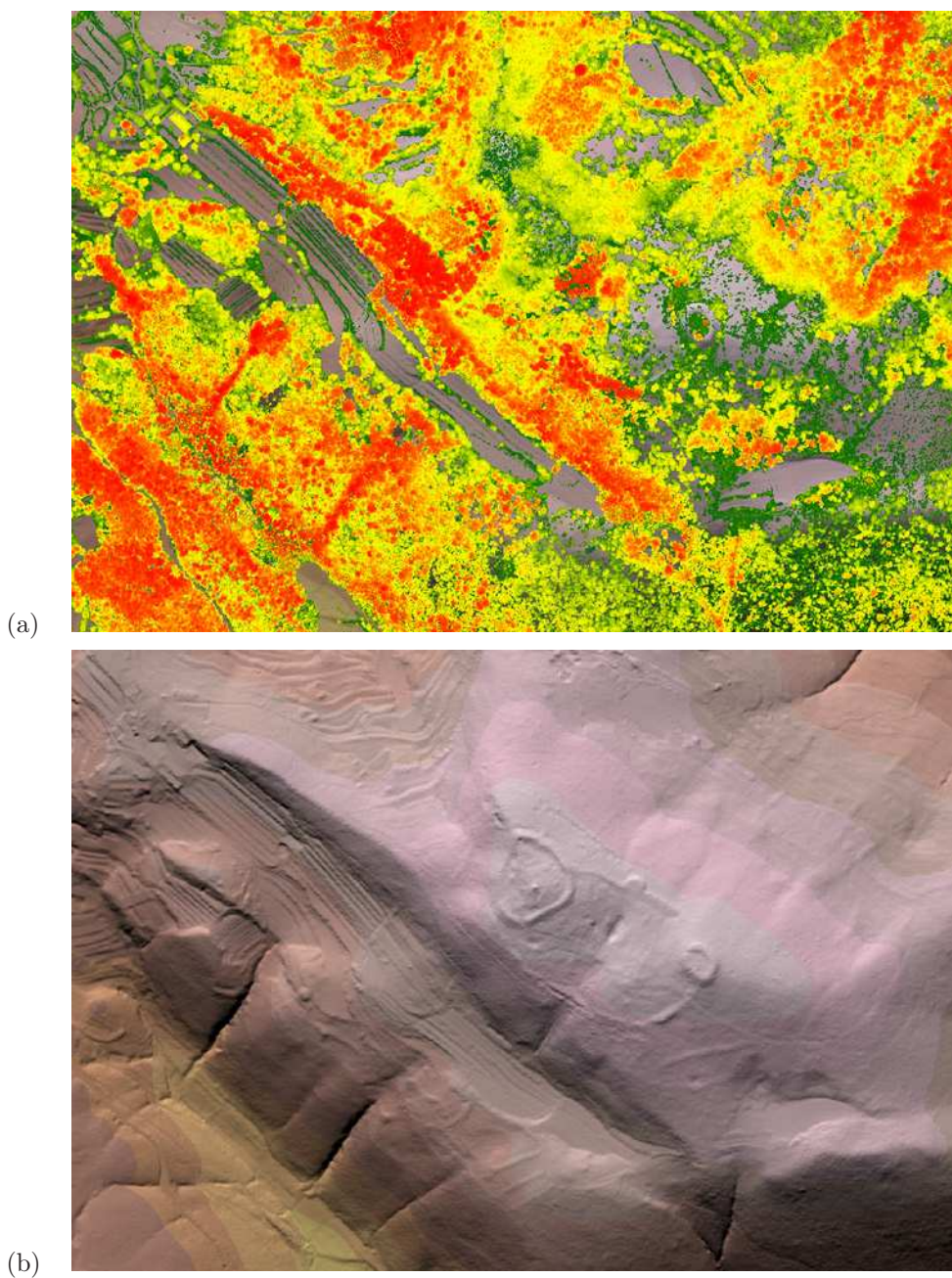
Glavna ovira hitrejšemu uveljavljanju lidarja je – poleg relativno visoke cene – zapletena obdelava podatkov. Lidarski sistem ustvari dve podatkovni zbirki, in sicer podatke o položaju snemalnega sistema, dobljene s sistemom pozicioniranja, in podatke o odbojih oziroma razdaljah. Iz obeh izračunamo točko odboja na površju in ji kot atribut pripišemo red odboja (prvi, drugi ... zadnji) ter, če je mogoče, tudi njegovo jakost. Končni rezultat snemanja je oblak točk, ki predstavljajo odboje na različnih predmetih, tako na tleh kot v vegetaciji in na objektih.

Glavni izdelek obdelave podatkov lidarskega snemanja je digitalni model višin, poleg tega pa lidar prek digitalnega modela površja omogoča tudi pridobivanje podatkov o vegetaciji. Ločevanje odboja na tleh in v vegetaciji je eden najtežjih korakov obdelave in šele v zadnjem času se pojavljajo učinkoviti algoritmi, ki uspešno delujejo tudi v strmejših in vegetacijsko bolj gostih območjih (Kobler et al., 2006). Lidar omogoča opazovanje parametrov gozda in hkrati površja pod njim (slika 20.5).

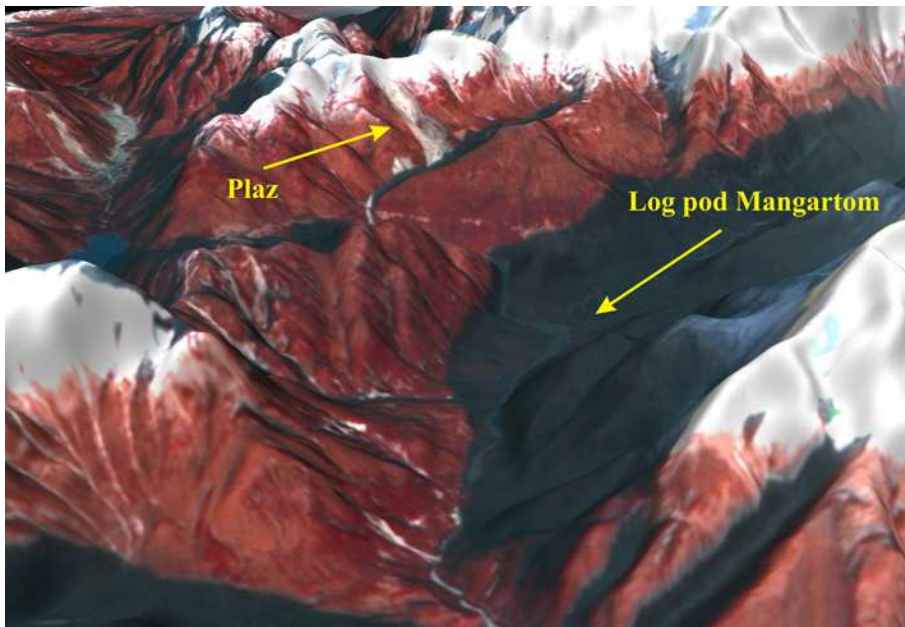
20.5 Opazovanje naravnih nesreč

Naravne nesreče predstavljajo veliko grožnjo prebivalstvu. Povzročajo ogromno materialno škodo in zahtevajo veliko človeških življenj (v zadnjih 20 letih po vsem svetu več kot milijon). Možnosti njihovega napovedovanja so relativno omejene, zato jih je smiselno opazovati z vso razpoložljivo tehnologijo, pri čemer daljinsko zaznavanje pogosto predstavlja edino možnost.

Za učinkovito uporabo satelitske tehnologije v primeru naravnih nesreč so pomembnejše vesoljske agencije ustanovile program *Vesolje in velike nesreče* (Space and Major Disasters Charter). Njegovi pobudnici sta bili leta 2000 Evropska vesoljska agencija (European Space Agency, ESA) in francoski Centre National d'Études Spatiales



Slika 20.5: Lidar omogoča opazovanje podrobnosti pod drevesnimi krošnjami. Primerjava digitalnega modela višin, ki vključuje vegetacijski pokrov (a) in modela golih tal (b) razkriva arheološko najdišče, ki ga na letalskih fotografijah ne opazimo, saj ga zakriva bujno drevesje (Kobler et al., 2006).

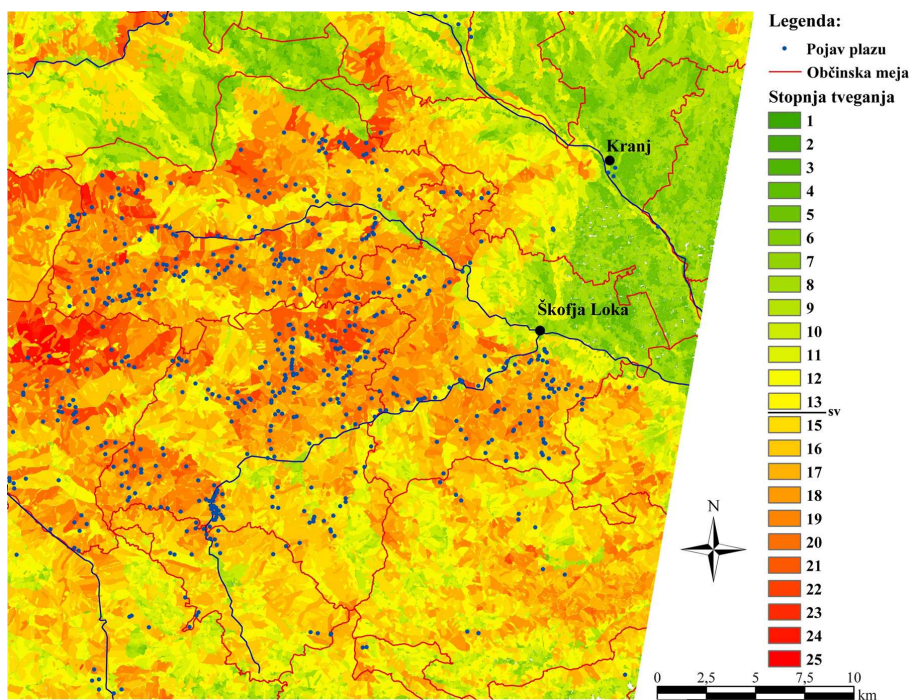


Slika 20.6: Perspektivni pogled območja plazu v Logu pod Mangartom. Prek digitalnega modela višin je napet izostren posnetek satelita SPOT (Oštir et al., 2002).

(CNES), kasneje pa so se jima pridružile še Canadian Space Agency (CSA), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Indian Space Research Organization (ISRO), Argentine Space Agency (CONAE), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) in United States Geological Survey (USGS). Program predstavlja poenoten sistem zajema in distribucije podatkov satelitskega daljinskega zaznavanja ob nesrečah z naravnim ali človeškim vzrokom. Od začetka do danes je program opazoval že več kot sto katastrofalnih dogodkov, kot so poplave, požari, plazovi, potresi, hurikani, cunami, razlitje nafte ... Opazovanje plazu v Logu pod Mangartom predstavlja prvo študijo, ki je bila izvedena v njegovem okviru (Oštir et al., 2002).

Območje zgornjega Posočja je 17. novembra 2000 prizadela ena hujših naravnih nesreč v Sloveniji, ko se je zaradi dolgotrajnega deževja in spleta neugodnih okoliščin s pobočja Mangarta utrgal plaz. Del strokovno večplastnih raziskav, namenjenih proučevanju vzrokov in posledic plazu, je predstavljala tudi obdelava satelitskih posnetkov in njihova povezava v sistem GIS (slika 20.6). Radarski posnetki, narejeni pred nesrečo in po njej, so omogočili določanje vlažnosti tal in opazovanje »odtekanja« vode. Optični posnetki pa so bili skupaj z digitalnim modelom višin InSAR DMV 25 uporabljeni za analizo plazu in njegovega vplivnega območja (Oštir et al., 2002).

Ker je, kot rečeno, napovedovanje naravnih nesreč zelo težavna naloga, se raziskave pogosto usmerjajo v določanje območij, na katerih bi do nesreče lahko prišlo. Komac (2005) se je ukvarjal s pojavljanjem plazenj na območju osrednjega dela Slovenije, zahodno do Ljubljane (slika 20.7). Proučeval je uporabnost visoko- in srednjeločljivih večspektralnih satelitskih posnetkov (Resurs-F2 MK-4 in Landsat TM) pri napovedovanju lokacij plazov. Na podlagi uspešnosti klasifikacije je ugotovil najprimernejšo kombinacijo kanalov satelitskih podob in najprimernejšo metodo klasifikacije za napoved



Slika 20.7: Karta napovedi plazovitih območij, dobljena z analizo satelitskih posnetkov Resurs in Landsat. Z zeleno so obarvana območja z majhno stopnjo tveganja za nastanek plazov, z rdečo pa območja z veliko stopnjo tveganja (Komac, 2005).

plazovitih območij. Pri tem je bila dosežena skoraj 80-odstotna uspešnost klasifikacije plazovitih in neplazovitih območij, s čimer je bilo dokazano, da je mogoče s podatki visokoločljivih satelitskih posnetkov s precejšno natančnostjo napovedovati pojave plazenj, in to kljub prisotnosti vegetacijskega pokrova (Komac, 2005, 2006).

Vprašanja

1. Opiši primer uporabe daljinskega zaznavanja.

Terminološki slovar

Slovenska terminologija, povezana z daljinskim zaznavanjem, še ni v celoti definirana. Hitro razvijajoče se strokovno področje prinaša obilico novih izrazov in bolj ali manj razumljivih okrajšav. V nadaljevanju je zato podan slovar najpogostejših pojmov, skupaj z angleškimi izvirniki in kratkimi definicijami. Seznam skuša podati ustrezna slovenska imena, lahko pa pričakujemo, da se bo z razvojem tehnologije in uveljavljanjem novih tehnik v vsakdanje življenje še spreminjal in dopolnjeval.

Slovar je povzet in prirejen iz več tiskanih in spletnih virov (Canada Centre for Remote Sensing, 2006; Drobne in Podobnikar, 1999; Encyclopædia Britannica, 2006; FOLDOC, 2006; Henderson in Lewis, 1998; National Aeronautics and Space Administration, 2006; Pahor et al., 2002; Strnad, 1991; Šumrada, 2005a,b; Tag's Broadcasting Services, 2006; University of Nebraska-Lincoln, 2006; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2006; Wikipedia, 2006a,b).

absolutna temperatura

absolute temperature

Temperatura, merjena v stopinjah Kelvina.

Ena stopinja Kelvina je enaka stopnji Celzija, ničla 0 K (absolutna ničla) pa je $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Glej tudi temperatura

absorpcija

absorption

Zmanjšanje jakosti elektromagnetnega valovanja pri gibanju v snovi. Absorpcijo določajo dielektrične lastnosti materiala in je močno odvisna od valovne dolžine.

absorpcijski pas

absorption band

Območje valovnih dolžin, ki ga snov (na primer atmosfera) absorbira.

Glej tudi absorpcija

aditivne osnovne barve

additive primary colours

Modra, zelena in rdeča. Osnovne barve, ki s seštevanjem ustvarijo celotno barvno skalo,

seštevek treh čistih osnovnih barv pa je bela.

Glej tudi osnovne barve

Advanced Very High Resolution Radiometer

Skener s petimi kanali, ki omogoča določanje oblačnosti, temperature površja in stanja vegetacije.

Glej tudi vegetacijski indeks, National Oceanic and Atmospheric Administration

AIRSAR

Airborne Synthetic Aperture Radar

akromatični vid

achromatic vision

Občutljivost oči na spremembe svetlosti, ki omogoča zaznavanje črno-belih slik.

Glej tudi barvni vid

aktivni mikrovalovni instrument

active microwave instrument

Najpomembnejši senzor na satelitih ERS; radarski sistem, ki deluje v pasu C.

Glej tudi European Remote-Sensing satellite, radar

aktivni senzor

active sensor

Sistem daljinskega zaznavanja, ki za snemanje uporablja lastni vir elektromagnetnega valovanja. Tovrstni senzorji oddajajo valovanje v smeri proti opazovanim predmetom, nato pa merijo intenziteto odbitega valovanja. Primera aktivnega senzorja sta radar in lidar. *Glej tudi* pasivni senzor, radar, lidar, senzor

albedo

Glej odbojnost

AMI

active microwave instrument

Glej aktivni mikrovalovni instrument

amplituda

amplitude

1. Merilo za jakost signala, »višina« elektromagnetnega vala.
2. Odklon od srednje vrednosti.

Glej tudi valovanje, elektromagnetno valovanje

analiza osnovnih komponent

principal component analysis

Tudi analiza glavnih komponent; tehnika za poenostavitev podatkovnega nabora z zmanjševanjem razsežnosti in povečevanjem informacijske gostote. Gre za linearno transformacijo podatkov v nov koordinatni sistem, ki ga določajo smeri z največjo varianco v padajočem vrstnem redu (prva os predstavlja največje spreminjanje podatkov).

analogna fotografija

analogue photo

Fotografija ali fotografski posnetek, pri kateri (katerem) je zvezno spreminjanje vrednosti prikazano z zveznim spreminjanjem tona (sivine oziroma barve). Omogočajo jo zrna na fotografskem filmu.

Glej tudi podoba, digitalna fotografija

anomalija

anomaly

1. Območje na podobi, ki se opazno razlikuje od povprečja oziroma okolice. Anomalije omogočajo prepoznavenje predmetov.
2. Tudi nepravilnost.

antena

antenna

Naprava za sprejemanje ali oddajanje elektromagnetnih valov.

Glej tudi radar

apogej

apogee

Točka eliptičnega tira nebesnega telesa, ki je najbolj oddaljena od Zemlje.

Glej tudi perigej, tirnica

ASF

Alaska SAR Facility

atmosfera

atmosphere

Tudi ozračje; plinat plašč, ki obkroža Zemljo. Plast ohranja Zemljina gravitacija, njegova sestava se z naraščanjem nadmorske višine ne spreminja, se pa vsakih 5000 m prepolovi gostota. Ozračje sestavljajo dušik, kisik, argon, ogljikov dioksid, vodna para in drugi plini.

atmosfersko okno

atmospheric window

Območje valovnih dolžin, ki ga atmosferski plini (v glavnem vodna para, ozon in ogljikov dioksid) prepuščajo ali le malo absorbirajo. Atmosferska okna določajo valovne dolžine, ki jih lahko uporabimo pri daljinskem zaznavanju.

Glej tudi atmosfera

atmosferski popravki

atmospheric correction

Postopek pri obdelavi podob, ki na podobah skuša odstraniti vpliv potovanja elektromagnetnega valovanja skozi atmosfero.

Glej tudi atmosfera

atribut

attribute

Lastnost predmeta ali pojava, kateri koli imenovani detajl, ki opredeljuje, klasificira ali izraža stanje izbranega predmeta.

AVHRR

Glej Advanced Very High Resolution Radiometer

azimut

azimuth

1. Kot med izbrano smerjo in geografskim severom.

2. Relativni položaj predmeta znotraj vidnega polja radarske antene. Izraz ponavadi uporabljamo za označevanje oddaljenosti v vzdolžni smeri, to je v smeri leta satelita.

azimutna ločljivost

azimuth resolution

Ločljivost, ki je značilna za azimutno (vzdolžno) smer. Azimutno ločljivost določa Dopplerjeva pasovna širina radarskega sistema in je tem boljša, čim večja je dolžina antene.

Glej tudi azimut, radar

bajt

byte

Tudi zlog; enota za količino podatkov oziroma velikost pomnilnika. En bajt ima osem bitov in omogoča 2^8 oziroma 256 vrednosti.

Glej tudi bit

barva

hue

V barvnem sistemu HSI glavna valovna dolžina oziroma barvni odtenek.

Glej tudi barvni prostor HSI

barvni film

colour film

Film, pri katerem barve ustrezajo barvam v naravi. Sestavljen je iz treh slojev, ki so občutljivi na modro, zeleno in rdečo svetlobo.

Glej tudi film, pankromatski film, infrardeči barvni film

barvni prostor HSI

HSI colour space

Koordinatni sistem, ki barvne odtenke podaja z intenziteto, barvo in nasičenostjo.

Glej tudi barvni prostor RGB

barvni prostor RGB

RGB colour space

Koordinatni sistem, ki barvne odtenke podaja z osnovnimi barvami, to je rdečo, zeleno in modro (red, green, blue).

Glej tudi barvni prostor HSI, intenziteta, barva, nasičenost

barvni vid

chromatic vision

Sposobnost očesa za ločevanje barv.

Glej tudi akromatični vid

batimetrija

bathymetry

Določanje oblike morskega dna.

baza

base

Razdalja med optičnima centroma prekrivajočih se podob pri stereo gledanju.

Glej tudi razmerje med bazo in višino

bit

bit

Osnovna in hkrati najmanjša podatkovna enota, ki se uporablja v računalništvu in teoriji informacij. En bit (ime bit izhaja iz angleškega izraza binary digit) predstavlja nek podatek o opazovanem objektu, ki je lahko 1 (da) ali 0 (ne) oziroma kateri koli dve drugi izključujoči se stanji.

Glej tudi bajt

bližnja infrardeča svetloba

near infrared light

Elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami tik nad rdečim delom vidne svetlobe, to je med $0,7\ \mu\text{m}$ in $2\ \mu\text{m}$.

Glej tudi infrardeča svetloba

CCD

Charge-Coupled Detector

Glej detektor CCD

CCRS

Canada Center for Remote Sensing

CEOS

Glej Committee on Earth Observation Satellites

CIS

Conventional Inertial System

Clarkov obroč

Clarke belt

Pas v ekvatorialni ravnini, približno 36 000 km nad površjem, v katerem sateliti krožijo okrog Zemlje s kotno hitrostjo, ki je enaka hitrosti njenega vrtenja. Pas, ki ga je leta 1928 predlagal Herman Potočnik, se imenuje po piscu Arthurju C. Clarku.

Glej tudi geostacionarna tirnica

CNES

Centre National d'Études Spatiales

Committee on Earth Observation Satellites

Mednarodna organizacija, ki spodbuja rabo tehnologij daljinskega zaznavanja, postavlja standarde in določa smernice razvoja.

Coordinated Universal Time

Tudi greenwiški čas; krajevni čas na geografski dolžini greenwiškega observatorija.

CSA

Canadian Space Agency

CTS

Conventional Terrestrial System

CZCS

Coastal Zone Colour Scanner

čakalni čas

dwell time

Čas, ki ga ima detektor na razpolago za opazovanje posamezne celice.

Glej tudi skener

časovna ločljivost

temporal resolution

Časovna ločljivost pove, kako pogosto lahko snemamo iste dele Zemlje oziroma koliko časa preteče med dvema zaporednima snemanjema.

Glej tudi ločljivost

črno telo

blackbody

Predmet, ki absorbira vso vpadno elektromagnetno valovanje. Črno telo ne odbija in ne prepušča valovanja, seva pa lastno valovanje, ki je odvisno od njegove temperature.

Glej tudi Stefan-Boltzmannov zakon

daljinsko zaznavanje

remote sensing

Znanost pridobivanja informacij o površju Zemlje, ne da bi z njo prišli v neposredni stik. Pri tem zaznavamo in zapisujemo odbito ali sevano elektromagnetno valovanje, ga obdelujemo, analiziramo in uporabimo v različnih aplikacijah.

daljnja infrardeča svetloba

far infrared svetloba

Elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami, daljšimi kot pri termični infrardeči, to

je med približno 15 μm in 1000 μm .

Glej tudi infrardeča svetloba

deklinacija

declination

1. Tudi odklon; kot v nebesnem ekvatorialnem koordinatnem sistemu med ravnino nebesnega ekvatorja in umišljeno črto, poteka jočo od opazovalca do nebesnega telesa. Kot je pozitiven v smeri proti severu in negativen v smeri proti jugu.

2. Odklon magnetne igle od smeri sever-jug.

Glej tudi inklinacija

DEM

Digital Elevation Model

Glej digitalni model višin

DEOS

Delft Institute for Earth-Oriented Space Research

detektor

detector

Naprava, ki meri prisotnost in intenziteto elektromagnetnega valovanja. Detektor prek optičnega sistema opazuje valovanje določenega dela površja pri izbrani valovni dolžini.

Glej tudi senzor

detektor CCD

charge-coupled detector

Slikovni detektor, sestavljen iz integriranega vezja z mrežo povezanih svetlobno občutljivih elementov. Vsak izmed slednjih naboj, ki je odvisen od intenzitete vpadne svetlobe, prenese prek svojih sosedov na zunanje vezje, ki ustvari podobo.

Glej tudi detektor

dielektričnost

dielectricity

Snovna konstanta, ki pove, kako se snov (dielektrik) vede v zunanjem električnem polju. Določena je kot razmerje med gostoto električnega polja v snovi in gostoto tega polja v praznem prostoru.

Glej tudi dielektrik

dielektrik

dielectric

Snov, v kateri lahko obstaja statično električno polje, ne da bi po njej teknel električni

tok. Dielektrik delno prepušča, delno pa zadrži elektromagnetno valovanje. Električne lastnosti dielektrikov opišemo z dielektrično konstanto.

Glej tudi dielektričnost

diferencialni interferogram

differential interferogram

Podoba, ki nastane s primerjavo dveh interferogramov. Diferencialni interferogram vsebuje informacije o spremembi v smeri razdalje, to je poševno v smeri gledanja radarske antene.

Glej tudi interferogram

digitalizacija

digitalization

1. Postopek pretvorbe analognega podatka v digitalno obliko.
2. Postopek ustvarjanja rastrske ali vektorske predstavitve podatkov v geografskih informacijskih sistemih.

digitalna fotografija

digital photo

Fotografija, zajeta z elektronskim senzorjem.

Glej tudi podoba, analogna fotografija

digitalna obdelava podob

digital image processing

Uporaba računalniških algoritmov za obdelavo podob. Digitalna obdelava podob omogoča uporabo širokega nabora postopkov, med katerimi so oblikovanje in korekcija podatkov, digitalno izboljšanje podob z namenom olajšanja vizualne interpretacije, pa tudi samodejna klasifikacija, pri kateri predmete v celoti prepozna računalniški sistem.

digitalna vrednost

digital number

Vrednost, ki jo ima piksel na digitalni podobi.

digitalni model reliefa

digital relief model

Računalniška predstavitev glavnih lastnosti reliefa določenega območja. Digitalni model reliefa ne vsebuje le prikaza površja samega, ampak tudi njegov opis z nakloni, ekspozicijo ter plastnicami, padnicami, točkami vrhov ter z drugimi značilnimi črtami in točkami.

Glej tudi digitalni model višin

digitalni model višin

digital elevation model

Računalniška predstavitev višin na določenem območju, preprostejši približek zapisa digitalnega modela reliefa. Največkrat je zapisan kot dvorazsežna celična mreža z višinami kot atributi.

Glej tudi digitalni model reliefa, raster

dinamično območje

dynamic range

Razpon amplitud signalov (jakosti), ki jih nek sistem ima ali so prisotne v podatkovni datoteki. Dinamično območje podajamo z najmanjšo in največjo vrednostjo ali z razmerjem med njima.

DLR

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DMR

Glej digitalni model reliefa

DMV

Glej digitalni model višin

DN

Digital Number

Glej digitalna vrednost

dolžina pulza

pulse length

Trajanje energijskega sunka (signala), ki ga izseva radarska antena ali laser.

Dopplerjev pojav

Doppler effect

Pojav, pri katerem opazovalec, ki se giblje glede na izvir valovanja, zazna valovanje s spremenjeno frekvenco. Ob približevanju se frekvenca poveča, ob oddaljevanju pa zmanjša.

Glej tudi Dopplerjeva frekvenca

Dopplerjeva frekvenca

Doppler frequency

Sprememba frekvenca, ki ga povzroči relativno gibanje senzorja glede na površino, ki jo opazuje. Razpon Dopplerjevih frekvenc pri radarskih sistemih mora biti manjši od frekvenca ponavljanja pulza, sicer opazimo na podobah nepravilnosti.

Glej tudi Dopplerjev pojav

DTM

Digital Terrain Model

Glej digitalni model reliefa

dvigajoča tirnica

ascending orbit

Tirnica, pri kateri satelit potuje od južnega proti severnemu polu.

Glej tudi tirnica

dvojiški številski sistem

binary numeral system

Tudi binarni številski sistem; številski sistem z osnovo 2. Uporablja samo številki 0 in 1, zato ga je preprosto uresničiti z elektronskimi vezji.

Glej tudi bit

ekvator

equator

Tudi ravnik; v geografiji najdaljši vzporednik na Zemljini površini, ki razdeli Zemljo na severno in južno poloblo (hemisfero). Po definiciji je zemljepisna širina ekvatorja enaka 0° . Dolžina ekvatorja je približno 40075 km.

elektromagnetni spekter

electromagnetic spectrum

Oznaka za celoten razpon valovnih dolžin, ki jih lahko zajame elektromagnetno valovanje. Z oznako elektromagnetni spekter pojmuje torej obseg valovanja, ki ga seva, odbija ali prepušča določeno telo. Spekter elektromagnetnega valovanja ponavadi delimo na radijske in mikrovalove, infrardečo, vidno in ultravijolično svetlobo, rentgenske žarke in žarke gama. Senzorji daljinskega zaznavanja lahko opazujejo površje le v manjšem delu spektra.

Glej tudi spekter

elektromagnetno valovanje

electromagnetic radiation

Valovanje električnega in magnetnega polja, ki potuje s hitrostjo svetlobe. Polji v valovanju sta drugo na drugo pravokotni in vzdržujeta drugo drugo, nosita energijo in sicer vsako polje polovico. Temeljne zakone za opis elektromagnetnega valovanja je leta 1873 postavil James Clark Maxwell.

Glej tudi valovanje

elipsoid

ellipsoid

Geometrijsko telo, pri katerem so vsi prerezi

elipse.

Glej tudi referenčni elipsoid, rotacijski elipsoid, geoid

Environmental Satellite

Glej Envisat

Envisat

Tudi Environmental Satellite; satelit za opazovanje Zemlje, ki ga je leta 2002 izstrelila Evropska vesoljska agencija. Gre za naslednika satelitov ERS, ki ima kar devet senzorjev za zbiranje podatkov o površju, vodi, ledu in atmosferi.

Glej tudi European Remote-Sensing satellite

EOS

Earth Observing System

ERS

Glej European Remote-Sensing satellite

ESA

Glej European Space Agency

ESRIN

European Space Research Institute

ETM+

Enhanced Thematic Mapper Plus

Glej Thematic Mapper

European Remote-Sensing Satellite

Satelita, ki ju je (prvega 1991, drugega 1995) izstrelila Evropska vesoljska agencija. Njun najpomembnejši del je aktivni mikrovalovni instrument, to je umetno odprtinski radar, ki deluje v pasu C.

Glej tudi aktivni mikrovalovni instrument, ENVISAT

European Space Agency

Evropska vesoljska agencija (ESA) je evropska nadvladna organizacija, namenjena raziskavam vesolja. Ustanovljena je bila leta 1975 in ima trenutno 17 držav članic. Organizacija s sedežem v Parizu zaposluje približno 2000 ljudi in ima letni proračun 3 milijarde evrov. Njen glavni namen je biti gonilna sila, v precejšnji meri pa tudi izvrševalec evropskega vesoljskega programa. Njeni projekti se ukvarjajo z opazovanjem Zemlje, njene atmosfere, našega osončja in vesolja nasploh. Pomemben del nalog je razvoj satelitske tehnologije (na

primer ERS, Envisat) in storitev ter promocija vesoljske industrije.

faza

phase

1. Količina, ki s časom ali krajem enakomerno narašča in je argument sinusa ali kosinusa pri nihanju. Širše pojmujeemo fazo kot količino, ki določa trenutno vrednost nihajoče količine.
2. Kot, ki ga kompleksno število oklepa z realno osjo.

film

film

Svetlobno občutljiva emulzija, nanešena na plastično podlago (ponavadi poliester ali celuloid).

Glej tudi barvni film, infrardeči barvni film, pankromatski film, infrardeči pankromatski film

filter

filter

1. Optična naprava, ki izbira valovne dolžine.
2. Računska operacija, ki poudari ali zakrije elemente z določeno frekvenco na podobi.

Glej tudi filtriranje

filter mediana

median filter

Prostorski filter, ki vrednosti na podobi nadomesti s srednjo vrednostjo (mediano) v njihovi okolici.

Glej tudi filtriranje

filter povprečja

mean filter

Prostorski filter, ki vrednosti na podobi nadomesti z aritmetično sredino vrednosti v njihovi okolici.

Glej tudi filtriranje

filtriranje

filtering

Metode obdelave podob, ki upoštevajo prostorske razsežnosti podatkov (upoštevajo sosedo). S filtriranjem lahko odstranimo šum na satelitskih posnetkih, zgladimo ali poudarimo meje med homogenimi območji in podobno. Pri tem opazujemo spremembe v intenziteti, ki so praviloma postopne in le redko nenadne, in govorimo o »prostorski frekvenci«.

Glej tudi filter povprečja, filter mediana, Laplaceov filter, neusmerjeni filter, nizkoprepustni filter, smerni filter, visokoprepustni filter

fotografija

photo

Slika predmetov, ki nastane z optičnim sistemom v goriščni ravnini na filmu ali senzorju.

foton

photon

Osnovni delec (energijski kvant) kvantizirane elektromagnetnega polja.

Fourierjeva transformacija

Fourier transform

Matematična operacija, s katero iz prostorske porazdelitve dobimo frekvenčno in obratno. Zelo učinkovit algoritem za opravljanje Fourierjeve transformacije je FFT (Fast Fourier Transform).

frekvenca

frequency

Merilo za »hitrost« nihanja, ki podaja število nihajev v časovni enoti. Za elektromagnetna valovanja je produkt frekvence in valovne dolžine enak hitrosti svetlobe v snovi.

Glej tudi valovna dolžina

frekvenca ponavljanja pulza

pulse repetition frequency

Frekvenca, s katero radar oddaja zaporedne pulze (tudi število pulzov, ki jih radar odda v sekundi).

GCP

Ground Control Point

Glej oslonilna točka

geodetski datum

geodetic datum

Opredelitev določene referenčne ploskve (elipsoid, sferoid, krogla ...), njene lege in orientacije glede na geoid.

Glej tudi geoid, elipsoid

geodezija

geodesy

Znanstvena disciplina, ki se ukvarja z obliko Zemlje in njenimi razsežnostmi (obliko površja, njenim gravitacijskim poljem in geodinamičnimi pojavi) ter določanjem lege in merjenjem na njej.

geografska dolžina

longitude

Tudi zemljepisna dolžina; ena od dveh sfernih koordinat v geografskem koordinatnem sistemu (λ), ki opisuje lego kraja na Zemlji zahodno ali vzhodno od izhodiščnega (greenwiškega) poldnevnik. Geografska dolžina je kot med ravnino izhodiščnega poldnevnik in ravnino poldnevnik, na katerem leži točka; meri se v stopinjah od 0° (Greenwich) do 180° v vzhodni in zahodni smeri.

geografska širina

latitude

Tudi zemljepisna širina; ena od dveh sfernih koordinat v geografskem koordinatnem sistemu (φ), ki opisuje lego kraja na Zemlji severno ali južno od ekvatorja. Geografska širina je kot med ravnino ekvatorja in smerjo normale (pravokotnice) na plašč rotacijskega elipsoida v izbrani točki. Pri geografskem koordinatnem sistemu na krogli bi bil vrh kota v središču krogle, pri rotacijskem elipsoidu pa se vrh kota pomika po ravnini ekvatorja. Geografska širina se meri v stopinjah od 0° na ekvatorju do 90° v smeri proti severu in jugu.

geografski informacijski sistem

geographic information system

Sistem za zajemanje, shranjevanje, vzdrževanje, obdelavo, povezovanje, analiziranje in predstavitev prostorskih geokodiranih podatkov. Geografski informacijski sistem sestavljajo strojna oprema, sistemska in namenska programska oprema, uprabiške aplikacije, zbirke prostorskih podatkov ter vzdrževalci in uporabniki.

geoid

geoid

Nepravilno telo, ki predstavlja obliko Zemlje in se razlikuje od geometrijsko pravilnega elipsoida. Obliko geoida na morju določa površina mirujočih oceanov, na kopno pa ga podaljšamo tako, da je povsod pravokoten na navpičnico. Njegovo površje je nad celinami malo nad površino elipsoida, nad oceani pa malo pod njo.

Glej tudi elipsoid

geokoda

geocode

Glej koordinata

geomatika

geomatics

Znanost oziroma tehnologija za upravljanje geografsko opredeljenih podatkov, vključno z njihovim pridobivanjem, shranjevanjem, proučevanjem in razširjanjem.

geometrijski popravki

geometric correction

Postopek obdelave podob, ki odpravlja ali zmanjšuje njihovo geometrijsko popačenje.

Glej tudi georeferenciranje

georeferenciranje

georeferencing

Tudi geokodiranje ali georegistracija; postopek izvajanja geometrijskih popravkov in vpenjanja daljinsko zaznanih podob v koordinatni sistem. Način določanja prostorskih koordinat objektov in pojavov v prostoru, ki predpostavlja obstoj ustreznega koordinatnega sistema.

Glej tudi geometrijski popravki, oslonilna točka

geostacionarna tirnica

geostationary orbit

Tirnica na višini okrog 36 000 km nad Zemljo, v kateri sateliti ves čas opazujejo isti del nje-nega površja, saj krožijo s hitrostjo, ki ustreza hitrosti kroženja Zemlje. Geostacionarne tirnice imajo ponavadi vremenski in telekomunikacijski sateliti.

Glej tudi Clarkov obroč, tirnica

GIS

Geographic Information System

Glej geografski informacijski sistem

GMS

Geostationary Meteorological Satellite

GMT

Greenwich Mean Time

Glej Coordinated Universal Time

GOES

Geostationary Operational Environmental Satellite

goriščna razdalja

focal length

Razdalja med optičnim centrom objektiva in ravnino, v kateri je slika oddaljenih predmetov ostra.

GPS

Global Positioning System

Glej sistem globalnega pozicioniranja**Greenwich Mean Time***Glej* Coordinated Universal Time**GURS**

Geodetska uprava Republike Slovenije

hiperspektralni skener

hyperspectral scanner

Skener, ki podatke zajema v več sto kanalih hkrati.

Glej tudi skener, večspektralni skener**histogram**

histogram

1. Grafično prikazana primerjava velikosti ali strukture stanja, pojava s strnjenimi stolpci.

2. Grafična ali tabelarična predstavitev vrednosti, ki jih podoba vsebuje. Svetlost (ton) – oziroma vrednosti od 0 do 255 v primeru osem-bitnih podatkov – je prikazana vzdolž abscisne osi grafa. Pogostost ali frekvenca pojavljanja vsake vrednosti na podobi pa je podana kot ordinata.

hitrost svetlobe

speed of light

Ena najpomembnejših naravnih konstant, hitrost potovanja elektromagnetnega valovanja v praznem prostoru ($c_0 = 299\,792\text{ km/s}$). V prozornih snoveh je hitrost svetlobe manjša, enaka je c_0/n , pri čemer je n lomni količnik. Po specialni teoriji relativnosti je hitrost svetlobe zgornja meja za hitrost potovanja delcev, prenašanja energije in prenašanja signalov.**ICA**

International Cartographic Association

IDL

Interactive Data Language

IFOV

Instantaneous Field Of View

Glej trenutno vidno polje**HSI***Glej* barvni prostor HSI**inercialni navigacijski sistem**

inertial navigation system

Sistem, ki omogoča določanje položaja in navigacijo z uporabo optičnih ali mehanskih naprav, kot so žiroskopi – vrtavke, ki so vrtljive okoli treh, med seboj pravokotnih osi.

Glej tudi sistem globalnega pozicioniranja**Inertial Navigation System***Glej tudi* inercialni navigacijski sistem**informacija**

information

Miselni pomen, ki ga ljudje pripisujejo podatkom z znanimi uporabljenimi načini njihove interpretacije in predstavitve.

infrardeča svetloba

infrared light

Elektromagnetno valovanje z valovno dolžino, ki je večja od valovne dolžine vidne svetlobe in manjša od valovne dolžine mikrovalov (od $0,7\text{ }\mu\text{m}$ do približno $1000\text{ }\mu\text{m}$). Segreta trdna telesa izsevajo večji del elektromagnetnega valovanja kot infrardečo svetlobo, ki je človeško oko ne zaznava.*Glej tudi* bližnja infrardeča svetloba, daljnja infrardeča svetloba, srednja infrardeča svetloba, termična infrardeča svetloba**infrardeči barvni film**

infrared colour film

Barvni film, ki je občutljiv na vidni in bližnji infrardeči del spektra. Ponavadi podaja modrozeleno svetlobo v modri barvi, rdečo v zeleni in infrardečo v rdeči.

Glej tudi film, barvni film**infrardeči pankromatski film**

infrared panchromatic film

Film, ki je občutljiv na celotni del vidne in bližnje infrardeče svetlobe.

Glej tudi film, pankromatski film**inklinacija**

inclination

1. Tudi nagnjenost; v splošnem kot med referenčno ravnino in drugo ravnino ali smerjo.

2. Eden od šestih parametrov, ki opisujejo obliko in usmerjenost tirnice satelita. Gre za kotno razliko med tirno in referenčno ravnino (ponavadi ravnino ekvatorja).

3. Odklon magnetne igle od smeri sever-jug.

Glej tudi deklinacija, tirnica

INS

Inertial Navigation System

Glej inercialni navigacijski sistem

InSAR

Interferometric Synthetic Aperture Radar

intenziteta

intensity

Količina, ki v barvnem sistemu HSI podaja svetlost.

Glej tudi barvni prostor HSI

interaktivna obdelava

interactive processing

Način obdelave, pri katerem izvedemo določeno operacijo, si ogledamo rezultat ter glede na želeni cilj spremenimo vhodne parametre in postopek ponovimo.

interferogram

interferogram

Podoba, ki nastane s kompleksno konjugiranim množenjem dveh radarskih posnetkov in vsebuje podatke o faznih razlikah med njima.

Glej tudi interferometrija

interferometrija

interferometry

Postopek obdelave kompleksnih radarskih podob, pri katerem iz razlike njihovih faz dobimo višine nad referenčnim elipsoidom ali opazujemo majhne premike zemeljskega površja.

Glej tudi interferogram

interpretacija

interpretation

Postopek, pri katerem posebej izurjen operater (interpretator) opazuje podobe in iz njih pridobiva informacije.

interpretacijski ključ

interpretation key

Lastnost ali kombinacija lastnosti, ki omogočajo prepoznavanje predmetov na podobi.

Glej tudi interpretacija

IR

Glej infrardeča svetloba

izboljšanje kontrasta

contrast enhancement

Postopek obdelave podob, ki olajša interpretacijo s spreminjanjem kontrasta. Podobe, ki

jih zajemajo senzorji, praviloma zasedejo le manjši del razpoložljivega obsega vrednosti. Z izboljšanjem kontrasta povečamo razpon vrednosti (raztegnemo histogram) in s tem olajšamo interpretacijo.

Glej tudi histogram

izboljšanje podob

image enhancement

Postopki obdelave podob, ki vključujejo tehnike, s katerimi spremenimo videz podobe in olajšamo vizualno interpretacijo. Primera izboljšanja podob sta izboljšanje kontrasta in filtriranje. Pri izboljšanju podob se vrednosti pikslov spremenijo.

Glej tudi izboljšanje kontrasta, filtriranje

Japanese Earth Resources Satellite

Satelit, ki ga je izstrelila Japonska leta 1992 in poleg optičnih senzorjev vsebuje tudi umetno odprtinski radar.

jedro

kernel

Dvorangezna matrika, ki določa operacijo in s tem vrsto filtriranja.

Glej tudi filtriranje

JERS

Glej Japanese Earth Resources Satellite

Jet Propulsion Laboratory

Laboratorij v okviru ameriške vesoljske agencije NASA.

Glej tudi National Aeronautics and Space Administration

JPL

Glej Jet Propulsion Laboratory

JRC

Joint Research Centre

kalibracija

calibration

1. Tudi umerjanje; postopek preverjanja ustreznosti delovanja senzorja (ali druge naprave).

2. Postopek, pri katerem vrednosti na podobi povežemo s fizičnimi količinami, kot so npr. odbojnost, geometrija (položaj in velikost) ali faza.

kanal

band

Tudi pas; območje valovnih dolžin v elektromagnetnem spektru, ki ga opazuje posamezni detektor. Sodobni senzorji daljinskega zaznavanja praviloma snemajo v več kanalih in ustvarjajo večspektralne podobe.

Glej tudi detektor, podoba, spektralna ločljivost, hiperspektralni skener, večspektralni skener

karta

map

Tudi zemljevid; je znakovna slika geografske resničnosti, ki prikazuje izbrane objekte ali lastnosti in je rezultat ustvarjalnega dela avtorja, namenjena uporabi, kjer so bistveni prostorski odnosi. Gre za prikaz objektov, pojavov ali njihovih lastnosti na površini Zemlje ali drugih nebesnih teles. Prikaz je pomanjšan v določenem merilu, pogojno posplošen, pojasnjen s kartografskimi znaki in matematično konstruiran v določeni ravninski projekciji. Karte delimo na splošne geografske in tematske – prve enakovredno prikazujejo prostor z naravnimi (relief, vodovje, pokritost) in zgrajenimi (naselja in objekti, prometnice, meje) objekti in pojavi, medtem ko druge prikazujejo in analizirajo poudarjeno in podrobneje eno ali več vsebin splošne geografske karte, ali pojave, ki jih slednje ne prikazujejo. Topografske karte so splošne geografske karte v velikih merilih (do 1 : 200 000).

kartografija

cartography

Kartografija je znanost o zgodovini, načinih prikaza, izdelavi, oblikovanju, uporabi in vzdrževanju kart in ostalih kartam sorodnih prikazov.

Glej tudi karta

Keplerjevi elementi

Keplerian elements

Nabor šestih neodvisnih konstant, ki določajo tirnico. Vrednosti Keplerjevih elementov določajo elipso ali hiperbolo, njeno usmerjenost in položaj satelita.

Glej tudi Keplerjevi zakoni

Keplerjevi zakoni

Kepler's laws

Eksperimentalno pridobljeni zakoni, ki opisujejo gibanje planetov okoli Sonca. Na osnovi

meritev jih je zapisal nemški astrolog, astronom in matematik Johannes Kepler. Keplerjevi zakoni so:

1. planet se okoli Sonca giblje po elipsi, tako da je Sonce v enem od gorišč elipse;
2. zveznica med Soncem in planetom opiše v enakih časih enake ploščine;
3. količnik kvadrata periode in kuba velike polosi elipse je za vse planete enak.

Keplerjevi zakoni ne veljajo le za gibanje planetov okoli Sonca, ampak splošno za kroženje lažjega telesa okoli dosti težjega telesa, na primer satelita okoli planeta.

Glej tudi Newtonovi zakoni

klasifikacija

classification

Eden najpomembnejših korakov pri obdelavi daljinsko zaznanih podob, ki predstavlja povezavo med daljinskim zaznavanjem in geografskimi informacijskimi sistemi. S klasifikacijo iz rastrske podobe dobimo kvantitativen sloj, ki ga lahko uporabimo v analizah. Pri klasifikaciji gre za prepoznavanje predmetov na zemeljski površini na osnovi njihovih – praviloma spektralnih – lastnosti.

Glej tudi nadzorovana klasifikacija, nenadzorovana klasifikacija, predmetno usmerjena klasifikacija

koherenca

coherence

Absolutna vrednost normaliziranega korelacijskega koeficienta para posnetkov. V primeru, da je enaka ena, so faze med obema posnetkoma povsem »povezane«, kadar pa je njena vrednost nič, med njimi ni popolnoma nobene »zveze«.

Glej tudi interferometrija

koherentni odbojnik

coherent scatterer

Preprosta ali zapletena površina (na primer kotni odbojnik), pri kateri so odbita valovanja med seboj koherentna in tvorijo močnejši signal, kot bi ga dobili pri sipanju na difuzni površini.

Glej tudi razpršeni odboj, zrcalni odboj, koherenca

kompleksno število

complex number

Število z realnim in imaginarnim delom, ki ga

pri radarskih podobah uporabljamo za predstavitve amplitude in faze signalov.

komplementarne barve

complementary colours

Barvi sta komplementarni, če z njunim mešanjem ustvarimo sivo, vključno s črno in belo. V večini barvnih sistemov ležijo komplementarne barve na nasprotnih straneh. Primera komplementarnih barv sta modra in rumena.

Glej tudi aditivne osnovne barve, subtraktivne osnovne barve, osnovne barve

kontekst

context

Odnos med predmetom na podobi in njegovo okolico.

kontrast

contrast

1. Razlika med svetlostima sosednjih območij, na primer med svetlostjo predmeta in njegove okolice. Kontrast je povezan z radiometrično ločljivostjo, to je razponom vrednosti na podobi.

2. Pod pojmom kontrast opisujemo tudi nasprotja med grafičnimi elementi, s katerimi znake, na primer na karti, ločimo med seboj in dosežemo jasnost prikaza.

Glej tudi izboljšanje kontrasta, radiometrična ločljivost

koordinata

coordinate

Tudi geokoda; prostorskemu objektu pripisan podatek, ki podaja informacijo o geografskem položaju objekta v stvarnem okolju. Uporabljamo jo kot ključ za navajanje drugih podatkov, nanašajočih se na prostorski objekt.

koren povprečne kvadratne napake

root mean square error

Kvadratni koren aritmetične sredine kvadratov, odstopanje vrednosti določenega podatka od povprečja.

kot gledanja

look angle

1. Smer gledanja senzorja daljinskega zaznavanja.

2. Kot med ravnino platforme radarskega sistema in smerjo širjenja radarskega valovanja.

kotni odbojnik

angular scatterer

Kombinacija dveh ali več zrcalnih ploskev, ki ne glede na vpadni kot, signal odbijejo natanko v smer, iz katere je prišel. Kotne odbojnike uporabljamo, na primer, pri radarskem snemanju za določanje položaja oslonilnih točk.

Landsat

Skupina satelitov za opazovanje kopnega. Prvi satelit je leta 1972 izstrelila NASA, do sedaj pa je bilo v okviru izredno uspešnega programa zbranih ogromno podatkov, ki so jih zajeli sateliti Landsat 1 do 7. Program je na začetku vodila NASA, leta 1983 pa ga je prevzela NOAA. Dve leti kasneje so ga komercializirali in tako ponudili podatke za najrazličnejše civilne in raziskovalne aplikacije. Vsi sateliti Landsat se nahajajo v skoraj polarinih, sončno sinhronih tirnicah. Prvi trije sateliti (Landsat 1 do 3) so krožili okrog Zemlje na višini približno 900 km, vsi naslednji sateliti pa letijo (oziroma so leteli) nižje, in sicer na višini približno 700 km. Sateliti so bili opremljeni z različnimi senzorji, po vrsti so to Return Beam Vidicon (RBV), MultiSpectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM) in Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). Senzorji ustvarjajo večspektralne podobe velikosti 185 km krat 185 km, ki imajo pri novejših sistemih prostorsko ločljivost 30 m.

Glej tudi MultiSpectral Scanner, Thematic Mapper

Laplaceov filter

Laplace filter

Vrsta neusmerjenega filtra, ki predstavlja drugi odvod podobe (hitrost spreminjanja prvega odvoda) in omogoča odkrivanje robov objektov ali območij.

Glej tudi filtriranje

laser

laser

Okrajšava za Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation oziroma ojačitev svetlobe s spodbujano emisijo sevanja. Laser je naprava, ki z izkoriščanjem prehodov med energijskimi stanji molekul ali atomov ustvarja žarek elektromagnetnega valovanja, ponavadi v ultravijoličnem, vidnem ali infrardečem delu spektra. Značilnosti laserske sve-

tlobe so velika intenziteta, enakomerna porazdelitev intenzitete po preseku žarka, majhna divergenca, koherentnost in značilna valovna dolžina.

Glej tudi lidar

lažno barvna podoba

false colour image

Barvna podoba oziroma prikaz, pri katerem so nevidni deli elektromagnetnega dela spektra podani z eno ali več osnovnih barv (modro, zeleno ali rdečo). Tako dobimo posnetek, ki ne odseva stanja v naravi. Pogosta kombinacija prikazuje bližnjo infrardečo svetlobo v rdeči, rdečo v zeleni in zeleno v modri barvi.

Glej tudi podoba

lidar

lidar

Okrajšava za Light Detection And Ranging oziroma svetlobno zaznavanje in merjenje razdalj ali Laser Imaging Detection And Ranging oziroma lasersko snemanje, zaznavanje in merjenje razdalj. Gre za tehnologijo, podobno radarski, ki omogoča določanje razdalje do objektov ali površin z merjenjem časa potovanja laserskega impulza. Lidar uporablja laserje, ki delujejo v vidnem in bližnjem infrardečem delu elektromagnetnega spektra. Z njim lahko pridobivamo natančne podatke o obliki zemeljskega površja, na primer za izdelavo digitalnega modela višin.

Glej tudi laser, radar

ločljivost

resolution

Sposobnost sistema za ločevanje pojavov ali lastnosti. V daljinskem zaznavanju poznamo prostorsko, radiometrično, spektralno in časovno ločljivost.

Glej tudi časovna ločljivost, prostorska ločljivost, radiometrična ločljivost, spektralna ločljivost

lom svetlobe

refraction

Sprememba smeri širjenja valovanja, ki nastane zaradi spremembe hitrosti valovanja v optično nehomogeni snovi ali pri prehodu iz ene v drugo snov.

Glej tudi lomni količnik

lomni količnik

index of refraction

Razmerje med hitrostjo elektromagnetnega valovanja v praznem prostoru in hitrostjo v snovi. Oznaka za lomni količnik je n .

Glej tudi lom svetlobe

Mercatorjeva projekcija

Mercator projection

Valjna konformna projekcija, ki je primerna za upodabljanje celotne zemeljske površine. Pri Mercatorjevi projekciji se ohranjajo koti, poldnevniki in vzporedniki se sekajo pod pravimi koti, spremenijo pa se površine in razdalje. Velikost popačenja se povečuje z oddaljenostjo od ekvatorja.

merilo

scale

Razmerje med velikostjo na karti ali podobi in velikostjo v naravi.

mešani piksel

mixed pixel

Piksel, ki predstavlja odboj več različnih predmetov. Vrednost odboja je enaka povprečju posameznih odbojev.

Glej tudi piksel

metapodatki

metadata

Podatki o tehničnih in administrativnih značilnostih podatkov. Informacija, ki podaja vsebino podatkovne zbirke, način in čas njenega zajema, pogostost obnavljanja in podobno.

Miejevo sipanje

Mie scattering

Sipanje na delcih v atmosferi, ki so približno enako veliki, kot je valovna dolžina vpadlega valovanja. Najpogostejši viri za to sipanje so prah, cvetni prah, dim in vodna para. Miejevo sipanje močneje vpliva na daljše valovne dolžine in je usmerjeno.

Glej tudi sipanje

mikrovalovanje

microwave radiation

Tudi radarsko valovanje; elektromagnetno valovanje z valovno dolžino med 1 cm in 1 m.

MODIS

MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

MOMS

Modular Optoelectronic Multispectral Scanner

mozaik

mosaic

Podoba, sestavljena iz več, praviloma barvno usklajenih, posnetkov istega območja. Z mozaiki pokrijemo večjo površino s posnetki istega sistema in omogočimo analizo ene same večje podobe.

mreža neenakih trikotnikov

triangulated irregular network

Način shranjevanja digitalnega modela višin, pri katerem površje pokrijemo s trikotniki različnih dimenzij in oblik.

mrežni zapis

grid format

Glej raster

MSS

Glej MultiSpectral Scanner

MultiSpectral Scanner

Snemalni sistem na prvi generaciji satelitov Landsat (1 do 3). MSS je zajemal elektromagnetno valovanje, odbito z zemeljske površine v štirih spektralnih pasovih. V vsakem izmed njih je imel prostorsko ločljivost 60 krat 80 m in šestbitno radiometrično ločljivost (zapisal je torej lahko 64 sivih vrednosti). Snemanje je opravljala vrstična naprava z vrtečim zrcalom. Sistem je v vsakem prehodu zrcala v smeri vzhod–zahod hkrati zajel šest vrstic.

Glej tudi Landsat, Thematic Mapper

nadir

nadir

Tudi podnožišče; točka na zemeljskem površju, ki se nahaja neposredno pod satelitom ali letalom. Nadir je presečišče vektorja med središčem Zemlje in opazovalno platformo z referenčno ploskvijo.

nadzorovana klasifikacija

supervised classification

Oblika klasifikacije posnetkov, pri kateri operater določi učne vzorce, program (algoritem) pa ustvari njihove spektralne podpise. Piksele na podobi nato z uporabo različnih tehnik razdeli glede na podane vzorce, pri čemer lahko nekateri piksli ostanejo neklasificirani.

Glej tudi klasifikacija, nenadzorovana klasifikacija

nagib

roll

Naklon letala v smeri krila.

Glej tudi naklon, zasuk

naklon

pitch

Naklon letala v smeri kljuna in repa, ki povzroči spuščanje ali dviganje letala.

Glej tudi nagib, zasuk

NASA

Glej National Aeronautics and Space Administration

NASDA

National Space Development Agency (of Japan)

nasičenost

saturation

1. V barvnem sistemu HSI čistost barve.

2. Stanje, ki ga detektor doseže ob preveliki vpadni energiji.

Glej tudi barvni prostor HSI

natančnost

precision

Podatek, ki pove, kako zanesljivo določene meritve predstavljajo opazovano količino. V praktičnem pomenu natančnost opredelimo kot razliko med trenutno vrednostjo izbranega podatka in povprečno vrednostjo več meritev (primerljivo bolj natančno vrednostjo istega podatka). Merilo za natančnost je standardni odklon.

Glej tudi točnost

National Aeronautics and Space Administration

Ameriška vladna agencija, odgovorna za vesoljski program in dolgoročne vesoljske raziskave, ki je bila ustanovljena leta 1958. NASA je v prvi vrsti civilna organizacija, ki pa izvaja tudi vojaški vesoljski program. Zgradila, izstrelila in upravljala je številne sisteme daljinskega zaznavanje, na primer Landsat, Aqua, Terra, Shuttle Radar Topography Mission ...

Glej tudi Landsat, Shuttle Radar Topography Mission

National Oceanic and Atmospheric Administration

Ameriška agencija, ki se ukvarja s proučevanjem oceanov in atmosfere, v njenem okviru pa sta tudi meteorološka in geodetska uprava. Odgovorna je za celo paleto satelitov za opazovanje vremena in kopnega, na primer GOES in POES s senzorjem AVHRR.

Glej tudi Advanced Very High Resolution Radiometer

navpično pretiravanje

vertical exaggeration

Stopnja povečanja navpičnega merila v primerjavi z vodoravnim pri stereo modelu.

NDVI

Normalized Difference Vegetation Index

Glej normiran diferencialni vegetacijski indeks

nenadzorovana klasifikacija

unsupervised classification

Oblika klasifikacije, pri kateri piksele razporedimo v razrede glede na njihovo »naravno«
združevanje v spektralnem prostoru. Pri nenadzorovani klasifikaciji v prvem koraku ne potrebujemo informacij o opazovanem površju, v drugem koraku pa moramo razrede prepoznati.

Glej tudi klasifikacija, nadzorovana klasifikacija

neselektivno sipanje

non-selective scattering

Sipanje na delcih, ki so mnogo večji od valovne dolžine valovanja. Povzročajo ga predvsem vodne kapljice in veliki prašni delci. Neselektivno sipanje je ime dobilo zaradi dejstva, da na vse valovne dolžine vpliva približno enako.

Glej tudi sipanje

nesistematično popačenje

nonsystematic distortion

Geometrijske nepravilnosti na podobah, ki niso konstantne in jih ni mogoče napovedati iz lastnosti snemalnega sistema.

Glej tudi popačenje

neusmerjeni filter

nondirectional filter

Filter, ki deluje v vseh smereh enako.

Glej tudi filtriranje, smerni filter

Newtonovi zakoni

Newton's laws

Zakoni, s katerimi je angleški fizik Isaac Newton opisal gibanje teles. Predstavljajo temelj dinamike in klasične mehanike. Newton je zakone prvič formuliral v svojem znanem delu *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Matematična načela naravoslovja), ki je izšlo leta 1687. Z orodji matematične analize, ki jih je razvil, ter z zakonom težnosti je Newton pojasnil Keplerjeve zakone gibanja planetov. Newtonovi zakoni gibanja so:

1. telo miruje ali se giblje premo enakomerno, če nanj ne deluje nobena sila ali pa je vsota vseh sil, ki delujejo nanj enaka nič;
2. pospešek je sorazmeren sili in ima smer sile;
3. če deluje prvo telo na drugo z dano silo, deluje to na prvo z nasprotno enako silo.

Glej tudi Keplerjevi zakoni

NGA

National Geospatial-Intelligence Agency

nihačni čas

period

Čas trajanja enega nihaja. Nihajni čas je obratno sorazmeren s frekvenco.

Glej tudi frekvenca

nizkoprepustni filter

low pass filter

Filter, ki poudarja večje homogene površine, to je take z majhnim spreminjanjem tona, hkrati pa zmanjša drobne detajle na podobi in ga zato uporabljamo za glajenje podob.

Glej tudi filtriranje, visokoprepustni filter

NOAA

Glej National Oceanic and Atmospheric Administration

normiran diferencialni vegetacijski indeks

normalized difference vegetation index

Razmerje razlike med odbojem v infrardečem in rdečem delu spektra in njuno vsoto. Določa stanje vegetacije.

Glej tudi vegetacijski indeks

občutljivost

sensitivity

Stopnja oziroma način odziva senzorja na vpado elektromagnetno valovanje.

obdelava SAR

SAR processing

Postopek pretvorbe zaznanega radarskega signala (odbitega elektromagnetnega valovanja) v podobo. Obdelavo SAR ponavadi naredijo v sprejemni postaji, takoj po zajetju podatkov.

obhodna doba

period

Tudi orbitalna perioda ali tirna doba; čas, ki ga potrebuje planet ali kako drugo telo, da pri svojem gibanju opravi pot enega polnega krožnega tira (tirnice).

Glej tudi tirnica

objektiv

lens

Skupina ali sistem leč v snemalnem sistemu (na primer fotografskem aparatu), ki prenese sliko predmeta na film ali digitalni detektor.

oblika

shape

Zgradba oziroma oris posameznih predmetov. Pogosto je najpomembnejši element interpretacije podob.

odboj

reflection

Sprememba smeri valovanja (na primer zvočnega ali elektromagnetnega) pri stiku s površino.

Glej tudi razpršeni odboj, zrcalni odboj

odbojnost

albedo

Tudi albedo; razmerje med obitim in vpadnim elektromagnetnim valovanjem. Albedo 0 pomeni, da telo ne odbija svetlobe, albedo 1 pa pomeni popolno odbojnost za svetlobo.

Glej tudi črno telo

orbita

Glej tirnica

ortofoto

orthophoto

Podoba, ki je, z upoštevanjem parametrov centralne projekcije podobe in modela reliefa, transformirana (razpačena) v ortogonalno projekcijo podobe v izbranem koordinatnem sistemu. Izdelek je v metričnem smislu enak linijskemu načrtu ali karti.

oslonilna točka

ground control point

Tudi kontrolna točka; točka na zemeljskem površju, ki jo lahko prepoznamo na podobi in ima znane koordinate. Ponavadi gre za predmete z dobro definirano geometrijo, na primer sečišča linijskih elementov (rek, cest, železnic ...) in podobno. Kontrolne točke uporabljamo pri georeferenciranju.

Glej tudi georeferenciranje, vezna točka

osnovne barve

primary colours

Nabor treh barv, ki z različno kombinacijo ustvari celotno paleto barv v vidnem delu spektra. Obstajajo aditivne in subtraktivne osnovne barve.

Glej tudi aditivne osnovne barve, subtraktivne osnovne barve

osončenost

insolation

Gostota energijskega toka Sonca, ki pade na površino Zemlje, izražena v W/m^2 .

ozračje

Glej atmosfera

PAF

Processing and Archiving Facility

paketna obdelava

batch processing

Način obdelave podatkov, pri katerem računalnik več operacij izvede zaporedoma, brez uporabnikovega posredovanja. Pri tem gre lahko za različne operacije z enim naborom podatkov ali eno operacijo z različnimi podatki.

pankromatski

panchromatic

Občutljiv na večji del vidnega spektra. Pankromatski detektorji ne ločijo različnih valovnih dolžin.

pankromatski film

panchromatic film

Tudi črno-beli film; film, ki je občutljiv na celotni del vidne svetlobe.

Glej tudi film, barvni film, infrardeči pankromatski film

paralaksa

parallax

1. Razlika med dvema kotoma, na primer med vidnim kotom iskala (pri fotoaparatu, kameri) in snemalnim kotom objektiva.

2. Kot med premicama, usmerjenima iz dveh različnih opazovališč proti danemu točkastemu telesu.

pas C

band C

Mikrovalovno valovanje z valovno dolžino blizu 5,6 cm (oziroma frekvenco 5,3 GHz). Poleg pasu C uporabljajo radarski senzorji tudi pasove X, S, L in P.

Glej tudi radar

pasivni senzor

passive sensor

Senzor daljinskega zaznavanja, ki meri v naravi obstoječo energijo. S pasivni senzorji lahko zaznavamo samo takrat, ko je vir energije prisoten, za odbito Sončevo svetlobo to pomeni, da lahko snemamo samo podnevi.

Glej tudi aktivni senzor, senzor

PCA

Principal Component Analysis

Glej analiza osnovnih komponent

perigej

perigee

Tudi prizemlje; točka eliptičnega tira nebesnega telesa, ki je najmanj oddaljena od Zemlje.

Glej tudi apogej, tirnica

piksel

pixel

Tudi slikovni element (pixel, picture element); najmanjši – praviloma kvadratni – del podobe. Piksel podaja sivo ali barvno vrednost določenega dela površja, izraženo s številčno vrednostjo.

Glej tudi raster, podoba

Plankov zakon

Planck's law

Zakon, ki podaja odvisnost izsevane energije črnega telesa od valovne dolžine.

Glej tudi Stefan-Boltzmannov zakon, črno telo

platforma

platform

Tudi nosilec; sistem, ki nosi instrumente daljinskega zaznavanja. Platforme, ki jih uporabljamo pri daljinskem zaznavanju, so na tleh, letalih in balonih ter satelitih in vesoljskih plovilih.

podatek

data

Predstavitev dejstev, zamisli in navodil na način, ki je primeren za komuniciranje, interpretacijo ali obdelavo.

podoba

image

Tudi slika; digitalna predstavitev podatkov daljinskega zaznavanja v obliki matrike slikovnih elementov oziroma pikslov. Podoba lahko predstavlja odbojnost ali lastno sevanje površja in je – odvisno od števila kanalov – eno- ali več razsežna. Izraz poleg tega zajema tudi vse rezultate obdelav, od preobdelave prek izboljšanja in transformacij do klasifikacije, modeliranja in simulacij. V najširšem pomenu je podoba vsaka slika v rastrski obliki. Pojem je širši od posnetka, ki je predstavitev resničnosti, kot jo je zajel senzor.

Glej tudi posnetek, analogna fotografija, digitalna fotografija, piksel, raster

podoba odboja

reflectance image

Podoba, ki podaja delež odboja valovanja oziroma razmerje med vpadno in odbito energijo. Vrednosti so podane brezdimenzijsko, so (za razliko od vrednosti na podobi sevanja) neodvisne od količine vpadne energije (osvetlitve) in odražajo fizične lastnosti opazovanega površja (brez atmosferskih in drugih vplivov).

Glej tudi podoba sevanja, podoba

podoba radiance

radiance image

Tudi podoba sevanja; podoba, ki podaja vrednosti energije na senzorju ali površju (količina energije, podana v W/m^2 srad μm). Podobo sevanja na satelitu dobimo iz digitalnih vrednosti z upoštevanjem načina delovanja (prenosne funkcije) detektorja. Pri opazovanju skozi atmosfero na sevanje vplivata sipanje in

absorpcija, zato moramo za določitev sevanja na površju upoštevati atmosferske popravke. Podobe sevanja uporabljamo za kvantitativno opazovanje sprememb, modeliranje in določanje lastnosti površja.

Glej tudi podoba odboja, podoba

podoba razlik

difference image

Podoba, ki jo dobimo z odštevanjem vrednosti ene podobe od vrednosti druge podobe. Pri tem gre lahko za podobe istega ali različnih senzorjev, posnete ob enakih ali različnih časih in podobno.

Glej tudi podoba, podoba sprememb

podoba razmerij

ratio image

Podoba, dobljena z deljenjem vrednosti ene podobe z vrednostmi druge. Pri tem gre praviloma za različne kanale istega večspektralnega posnetka, s čimer dobimo spektralna razmerja ali indekse.

Glej tudi podoba

podoba sprememb

change-detection image

Razlika med podobama posnetima ob različnih časih. Vrednosti so povezane s spremembami, nastalimi v času med zajetjema.

Glej tudi podoba, podoba razlik

pokrovnost

land cover

Konkretna stvarnost, ki pokriva površje Zemlje, in jo lahko neposredno opazujemo, na primer gozd, travnik ...

Glej tudi raba tal

polarizacija

polarization

Usmerjenost vektorja električnega polja v elektromagnetnem valovanju. Polarizacija je pri običajnih radarskih sistemih navpična ali vodoravna, določa pa jo usmerjenost antene. Odbojnost mikrovalovanja je praviloma odvisna od njegove polarizacije.

polarna tirnica

polar orbit

Tirnica satelita, ki leti na razmeroma majhni oddaljenosti (nekaj sto kilometrov) od površja v smeri sever–jug. Z izkoriščanjem vrtenja Zemlje, ki poteka v smeri zahod–vzhod, senzor

v določenem času pokrije večji del površja.

Glej tudi tirnica, skoraj polarna tirnica, geostacionarna tirnica

polsfera

hemisphere

Polovica Zemlje, ponavadi dobljena z delitvijo v smeri sever–jug ali vzhod–zahod.

pometajoči skener

pushbroom scanner

Glej vzdolžni skener

popačenje

distortion

Spremembe oblike in položaja predmetov na podobi glede na njihov položaj v naravi.

posnetek

picture, image

Predstavitev resničnosti ne glede na način in platformo zajema. Posnetek nastane z uporabo optičnih naprav (objektivi, zrcala ...) ter analognega (filmska kamera) ali digitalnega senzorja (večspektralni skener, digitalna kamera). Predstavlja sliko opazovanih predmetov, zajeto v določenem trenutku pri izbrani valovni dolžini. Posnetek za razliko od podobe podaja vrednosti, ki jih je zajel senzor in ki so le malo ali skoraj nespremenjene – zaradi lažjega prikaza in integracije v GIS je lahko geometrično in radiometrično popravljen in izboljššan. Podoba je za razliko od posnetka izključno v digitalni obliki in predstavlja širši pojem, saj poleg podatkov samega senzorja vključuje tudi rezultate analiz, transformacije (na primer spektralna razmerja ali indekse), modele in interpretacijo (na primer karta pokrovnosti).

Glej tudi podoba

poševna fotografija

oblique photograph

Fotografija, ustvarjena poševno proti površju.

poševna razdalja

slant range

Razdalja med radarskim sistemom in točkami na podobi v smeri žarka.

Glej tudi razdalja, razdalja na površju

poudarjanje robov

edge enhancement

Postopek obdelave podob, ki poudari robove in linije na podobi.

Glej tudi rob, Laplaceov filter

povezava

association

Medsebojna razmerja med opazovanim predmetom in drugimi prepoznanimi predmeti ali pojavi v njegovi okolici, ki omogočajo interpretacijo na abstraktni ravni.

povratno sipanje

backscattering

Valovanje, ki ga predmeti na zemeljskem površju izsevajo nazaj proti sprejemni anteni. Intenziteta povratnega valovanja je odvisna od odbojnosti površja.

Glej tudi sipanje

precesija

precession

1. Način gibanja osno simetrične vrtavke (na primer žiroskopa) pod vplivom zunanjega navora, denimo takrat, ko vrtavka ni podprta v težišču. Pri precesiji os vrtenja ne miruje, ampak se giblje tako, da opisuje plašč stožca.
2. Počasno gibanje tirne ravnine satelitov glede na zemeljsko os, ki ga povzroči sploščenost Zemlje na polih.

prečna Mercatorjeva projekcija

transverse Mercator projection

Valjna konformna projekcija, ki je podobna Mercatorjevi projekciji, le da je valj zasukan za 90° in se prilega Zemljinemu elipsoidu v izbranemu poldnevniku.

Glej tudi Mercatorjeva projekcija

prečni skener

cross track scanner

Skener, ki površje opazuje s premikanjem senzorja oziroma njegovega vidnega polja pravokotno na smer gibanja platforme (prečno). Vsako vrstico zabeleži pri prehodu iz ene strani na drugo, pri čemer uporablja nihajoče ali vrteče zrcalo. Ker se nosilna platforma premika naprej, lahko z zaporednimi vrstami sestavi dvorazsežno podobo površine Zemlje.

Glej tudi skener, vzdolžni skener

predmetno usmerjena klasifikacija

object-oriented classification

Postopek klasifikacije podob z upoštevanjem

semantičnih informacij, ki niso prisotne v posameznih pikslih. Pri tem prepoznavamo predmete (objekte) in razmerja med njimi.

Glej tudi klasifikacija

predobdelava

preprocessing

Postopki, s katerimi iz daljinsko zaznanih podob odstranimo nepravilnosti, na primer radiometrične in geometrijske, jih vpnemo v izbrani koordinatni sistem in pripravimo za analize.

prekrivanje

overlap

Delež površja, ki ga pokrivata podobi, posneti iz sosednjih položajev.

prekrivanje v prečni smeri

sidelap

Prekrivanje med podobami sosednjih letov (na primer tirnic).

Glej tudi prekrivanje

prekrivanje v smeri leta

forward overlap

Prekrivanje med podobami v isti liniji leta.

Glej tudi prekrivanje

prevračanje

layover

Skrajna oblika višinskega popačenja oziroma približevanja, pri kateri so vrhovi osvetljenih predmetov (na primer gora) bližje radarju kot njihovi nižji deli (vznožja). Takšni predmeti so videti, kot bi se prevrnili proti radarju.

Glej tudi približevanje

prevzorčenje

resampling

Izračun vrednosti novih pikslov z upoštevanjem starih, praviloma pri geometrijski transformaciji podobe. Matriko nove podobe dobimo iz vrednosti na stari, tako da upoštevamo položaj pikslov in uporabimo enega od interpolacijskih algoritmov (najpogostejše metodo najbližjega sosesa, bilinearno interpolacijo in kubično konvolucijo). Pri prevzorčenju pride običajno do izgube oziroma spremembe vhodnih podatkov.

PRF

Pulse Repetition Frequency

Glej frekvenca ponavljanja pulza

približevanje

foreshortening

Posebna oblika višinskega popačenja, pri kateri so območja, obrnjena proti radarju, v primerjavi z območji na ravnem površju, navidezno stisnjena. Približevanje je posledica naklona površja in je najbolj izrazito za površine, ki so pravokotne na smer radarskega valovanja.

prodiranje

penetration

Vstop in delna prepustnost valovanja v določeni snovi. Mikrovalovi lahko prodirajo v suh pesek ali skozi (nevlažne) drevesne krošnje. Laser lahko prodre skozi vegetacijo.

projekcijski center

projective center

Tudi perspektivni center; optični center podobne.

prostorninsko sipanje

volume scattering

Večkratni odboj valovanja znotraj določene snovi, ki ni pregosta in ne absorbira valovanja v celoti (na primer v drevesnih krošnjah).

Glej tudi sipanje

prostorska ločljivost

spatial resolution

Tudi ločljivost v prostoru; razdalja, pri kateri sosednja predmeta na podobi še lahko ločimo med seboj. Prostorska ločljivost predstavlja velikost najmanjšega predmeta, ki ga na podobi zaznamo.

Glej tudi ločljivost

pulz

pulse

Skupina valov z različnimi valovnimi dolžinami, ki so porazdeljeni znotraj kratkega časovnega intervala. Kratki pulzi imajo lahko veliko energijo.

raba tal

land use

Namen, za katerega ljudje izkoriščajo neko zemljišče, s poudarkom na njegovi funkcijski vlogi v ekonomskih aktivnostih, na primer industrija, rekreativne površine ... Je abstraktna in je včasih ne moremo objektivno določiti niti s podrobnim ogledom.

Glej tudi pokrovnost

radar

radar

Oznaka za RAdio Detection And Ranging, radijsko zaznavanje in določanje razdalje. Elektromagnetni senzor, ki meri jakost mikrovalovnega signala, ki ga izseva antena in odbijajo oddaljene površine oziroma predmeti na njih. Osnovni sestavni deli radarja so oddajnik, antena, sprejemnik in sistem za obdelavo podatkov. Umetno odprtinski radarji imajo tudi poseben del za obdelavo podob, ki pa je lahko fizično povsem ločen od prej omenjenih. Radarji delujejo pri različnih valovnih dolžinah oziroma frekvencah (pasovih X, C, S, L, P).

Glej tudi umetno odprtinski radar, radar bočnega pogleda, pas C

radar bočnega pogleda

side looking radar

Radar, ki površje Zemlje opazuje nekoliko vstran od nadirja. Tako danes delujejo vsi satelitski in večina letalskih radarskih sistemov.

Glej tudi radar, umetno odprtinski radar

RADARSAT

Radarski satelitski sistem, ki ga je Kanada izstrelila leta 1995 in z radarjem pasu C opazuje Zemljo v različnih slikovnih načinih.

radianca

radiance

Tudi sevanje; postopek oddajanja energije v obliki valovanja. Radianco podajamo s količino energije, ki gre skozi ali jo oddaja površina v določenem kotu in smeri (enota je $W/m^2 srad$).

Glej tudi elektromagnetno valovanje, podoba radiance

radiometrična ločljivost

radiometric resolution

Sposobnost senzorja za ločevanje (sivih) vrednosti na podobi. Tovrstna ločljivost pove, kako dobro sistem ločuje majhne razlike v energiji valovanja oziroma koliko različnih svin (barv) lahko poda. Izražamo jo v bitih, na primer 8-bitna, 11-bitna ...

Glej tudi ločljivost

raketoplan

space shuttle

Tudi vesoljski čolniček; vesoljsko plovilo s posadko, ki vzleti kot raketa in pristane kot letalo. NASA uporablja raketoplane za številne projekte opazovanja površja, od katerih je verjetno najpomembnejši Shuttle Radar Topography Mission.

Glej tudi Shuttle Radar Topography Mission

raster

raster

Oblika zapisa podatkov, pri kateri vrednosti podajamo v središčih ali ogliščih pravilne kvadratne mreže. Vrednosti so podane z matrikami številskih vrednosti. Točnost rastrske predstavitev je odvisna od velikosti mrežnih celic, ki jo sestavljajo. V mrežnem zapisu vedno podajamo podobe daljinskega zaznavanja, pogosto pa tudi modele višin ali druge interpolirane spremenljivke.

Glej tudi piksel, podoba, vektor

Rayleighovo sipanje

Rayleigh scattering

Sipanje na delcih v ozračju, ki so majhni v primerjavi z valovno dolžino valovanja (prah, molekule dušika in kisika). Sipanje je bolj izrazito pri krajših valovnih dolžinah in je prevladujoče v zgornjih plasteh atmosfere. Zaradi Rayleighovega sipanja je nebo videti modro.

Glej tudi sipanje

razdalja

range

1. Dolžina črte med dvema predmetoma ali točkama.

2. Oddaljenost sistema od predmeta, ki ga opazuje. Pri posnetkih umetno odprtinskega radarja uporabljamo izraz tudi za označevanje koordinate v smeri gledanja radarske antene, torej pravokotno na smer leta satelita oziroma letala.

Glej tudi razdalja na površju, razdaljna ločljivost

razdalja na površju

ground range

Razdalja, ki jo dobimo s projekcijo razdalje radarja bočnega pogleda na referenčno ravnino. Če ne upoštevamo modela reliefa, pride pri tem do popačitev, na primer prevračanja, približevanja in podobno.

Glej tudi razdalja

razdaljna ločljivost

range resolution

Ločljivost v smeri razdalje; določa jo dolžina radarskega pulza (krajši ko je ta, boljša je ločljivost).

Glej tudi ločljivost, razdalja

razgibanost površja

relief variation

Merilo za stopnjo spreminjanja višin in za značilne razdalje na površju. Razgibanost je velika, če so spremembe velikostnega reda valovne dolžine uporabljenega valovanja.

razmerje med bazo in višino leta

base height ratio

Razmerje razdalje med optičnima centroma stereo podob (bazo) in višino leta letala ali satelita, ki določa navpično pretiravanje.

Glej tudi baza, navpično pretiravanje

razmerje signal šum

signal-to-noise ratio

Vrednost, ki podaja stopnjo signala (njegovo amplitudo oziroma jakostjo) glede na neželene pojave (šum).

Glej tudi signal, šum

razpršeni odboj

diffuse reflection

Tudi difuzni odboj; odboj svetlobe na hrapavi ploskvi (v primerjavi z valovno dolžino vpadnega valovanja), pri katerem se svetloba odbije na vse strani.

Glej tudi odboj, zrcalni odboj

razrez na nivoje

density slicing

Postopek prikaza črno-bele podobe v barvah, pri katerem sive vrednosti na podobi razdelimo na več ravni in prikažemo z različnimi barvami.

razvijanje faze

phase unwrapping

Postopek odpravljanja nedoločenosti faze kompleksne radarske podobe. Z razvijanjem faze iz interferograma dobimo model višin.

Glej tudi interferogram

redundanca

redundancy

Tudi presežek; informacija na podobi, ki je bodisi ne potrebujemo za interpretacijo ali pa je

ne vidimo. Presežek pri podobah daljinskega zaznavanja je lahko prostorski ali spektralni. Pri spektralnem presežku na večspektralnih podobah zaradi velike korelacije sosednji kanali ne vsebujejo različnih informacij in zato le otežujejo interpretacijo.

referenčni elipsoid

reference ellipsoid

Dogovorno izbran rotacijski elipsoid, ki kar se da najbolje ustreza obliki geoida na delu zemeljskega površja.

Glej tudi elipsoid, geoid, geodetski datum

registracija

registration

Postopek poravnave dveh ali več podob, s katerim omogočimo njihovo primerjavo.

Glej tudi georeferenciranje, vezna točka

reliefno popačenje

relief displacement

Geometrijska napaka na podobah, ki nastane zaradi oblike (razgibanosti) zemeljskega površja. Predmeti nad ali pod referenčno ploskvijo so zaradi različne geometrije gledanja lahko bližje ali dlje od njihove projekcije.

RGB

Glej barvni prostor RGB

RMSE

Root Mean Square Error

Glej koren povprečne kvadratne napake

rob

edge

Hitra sprememba sivih vrednosti, ki je praviloma povezana z antropogenimi dejavniki, na primer cestami, mejami med zemljišči, posekami ...

Glej tudi poudarjanje robov, Laplaceov filter

rotacijski elipsoid

ellipsoid of revolution

Geometrijsko telo, dobljeno z rotacijo elipse okoli ene od osi.

Glej tudi elipsoid

SAR

Synthetic Aperture Radar

Glej umetno odprtinski radar

satelit

satellite

Naravni ali umetni predmet, ki se giblje po tirnici okoli drugega nebesnega telesa, na primer Zemlje. Primer naravnega satelita je Luna, umetni sateliti pa so tisti, ki jih je ustvaril človek in so namenjeni za daljinsko zaznavanje, telekomunikacije, telemetrijo (določanje položaja in navigacijo).

Glej tudi tirnica

satelitski navigacijski sistem

satellite navigation system

Sistem, ki omogoča določanje natančnega položaja z merjenjem časa, ki ga potrebuje signal za potovanje od satelita do opazovane točke. Edini trenutno delujoči sistem je GPS, v gradnji pa sta še evropski Galileo in ruski GLO-NASS.

Glej tudi sistem globalnega pozicioniranja

scena

scene

Tudi posnetek; območje na površju, ki ga pokrije podoba ali fotografija. Scena je osnovna enota pri naročanju podatkov satelitskega daljinskega zaznavanja.

segmentacija

segmentation

Postopek delitve podobe na homogena območja (množice sosednjih pikslov). Segmentacija je praviloma prvi korak predmetno usmerjene klasifikacije.

Glej tudi predmetno usmerjena klasifikacija

senca

shadow

1. Območje, ki je za določeno visoko strukturo in ga iz položaja, v katerem je vir valovanja (radar, Sonce), ne moremo videti.

2. Element interpretacije, ki podaja podatke o višini in višinskem profilu predmetov.

senzor

sensor

Naprava, ki zaznava vpadno valovanje in odvisno od njegove intenzitete ustvari (ponavadi električni) odziv. Senzorji daljinskega zaznavanja pridobivajo informacije o lastnostih oddaljenih predmetov z merjenjem njihovega odbitega ali sevanega valovanja. Ponavadi so sestavljeni iz več detektorjev, ki delujejo pri različnih valovnih dolžinah in z različno natančnostjo. Podatke, ki jih senzor zazna, lahko opazujemo neposredno na zaslonu ali pa jih

zabeležimo, praviloma v digitalni obliki, in shranimo na pomnilniški medij.

Glej tudi detektor

Shuttle Imaging Radar

Oznaka radarskega sistema, ki je občasno nameščen na vesoljskem plovilu Space Shuttle.

Glej tudi Shuttle Radar Topography Mission

Shuttle Radar Topography Mission

Radarski interferometrični sistem, ki je, nameščen na vesoljskem plovilu Endeavour, od 11. do 21. februarja 2000 zajemal podatke o višinah. Z njim so ustvarili model višin za večji del kopnih površin Zemlje.

signal

signal

V splošnem vsako valovanje ali pulz. Ponavadi z izrazom signal označujemo podatke, ki jih dobimo pri opazovanju, tako pred zajetjem kot med zajetjem in pri poznejših obdelavah.

Glej tudi razmerje signal šum

sipalec

scatterer

Predmet, na katerem se valovanje siplje oziroma razprši.

Glej tudi sipanje

sipanje

scattering

Tudi razprševanje; pojav, pri katerem vzbudi elektromagnetno valovanje, ki pada na predmete (na primer v atmosferi), nihanje nabitih delcev v njih. Ti sevajo sipano elektromagnetno valovanje na vse strani.

Glej tudi Miejevo sipanje, neselektivno sipanje, Rayleighovo sipanje, sipalec

SIR

Glej Shuttle Imaging Radar

sistem globalnega pozicioniranja

global positioning system

Sistem za globalno določanje lege (global positioning system, GPS), ki temelji na tehnologiji vesoljske radijske navigacije. Sistem je začelo leta 1973 vzpostavljati ameriško obrambno ministrstvo, danes pa ga sestavlja 27 satelitov (21 aktivnih, 3 rezervni in 3 nadomeščeni, a še vedno delujoči). To mu omogoča natančno in zanesljivo določanje položaja kjer koli na

zemeljski obli.

Glej tudi satelitski navigacijski sistem

sistematično popačenje

systematic distortion

Geometrijske nepravilnosti na podobah, ki so znane in predvidljive ter jih je mogoče odpraviti z upoštevanjem delovanja snemalnega sistema.

Glej tudi popačenje, nesistematično popačenje

skener

scanner

Snemalni sistem, ki opazuje površje z detektorji, ki imajo majhno vidno polje. Senzor s premikanjem detektorjev po površini Zemlje ustvarja dvorazsežne podobe. Snemanje poteka točko za točko, vrstico za vrstico, kombinacija gibanja detektorjev (ponavadi zasuka) in gibanje platforme pa ustvarja dvorazsežno podobo. Glavni vrsti skenerjev sta prečni in vzdolžni.

Glej tudi podoba, prečni skener, vzdolžni skener

skoraj polarna tirnica

near polar orbit

Polarna tirnica, ki je rahlo nagnjena glede na premico, ki poteka med severnim in južnim polom. Nagnjenost poskrbi za kroženje ravne tirnice glede na položaj Sonca.

Glej tudi polarna tirnica

SLAR

Side Looking Airborne Radar

Glej tudi radar bočnega pogleda

sled

ground track

Pot, ki jo na površju Zemlje opiše projekcija satelita (oziroma njegov nadir). Pri polarnih satelitih gre za linijo, ki poteka od severnega pola proti južnemu in se zaradi vrtenja Zemlje pomika proti zahodu. Geostacionarni sateliti so glede na površje pri miru in zato je njihova sled ena sama točka.

Glej tudi tirnica, nadir

SLR

Side Looking Radar

Glej radar bočnega pogleda

smerni filter

directional filter

Filter, ki na podobi poudari linije ali spre-membe v določeni smeri.

Glej tudi filtriranje, neusmerjeni filter

snemalni pas

swath

Pas na zemeljskem površju, ki ga opazuje sa-telit.

Glej tudi tirnica

SNR

Signal-to-Noise Ratio

Glej razmerje signal šum

Sonce

Sun

Edina zvezda in glavno telo našega Osončja. Sonce je velikanska vrteča se krogla žarečih plinov. Sestavljena je iz vodika in helija ter sledov kisika, ogljika in drugih elementov. V samem središču Sonca je sredica, ki ima tem-peraturo 14 milijonov stopinj Celzija. Ener-gija, ki se sprosti v sredici, prehaja skozi se-valno plast v konvektivno plast. Od tod vroči plini privrejo na površje, kjer se ohladijo in potonejo. Energija doseže fotosfero, nato pa seva navzven skozi Sončevo atmosfero. Sončna svetloba je najpomembnejši vir energije pri daljinskem zaznavanju.

Glej tudi Zemlja

Sončev obsev

solar radiation energy

Količina Sončevega sevanja, ki pade na površino Zemlje, podana v J/m^2 .

sončno sinhrona tirnica

sun-synchronous orbit

Tirnica satelita, ki omogoči opazovanje istih delov površja vedno ob istem krajevnem času. Z drugimi besedami to pomeni, da je položaj Sonca na določeni zemljepisni širini ob pre-hodu satelita v enakih letnih časih enak. S tem poskrbimo za enako osvetlitev površja in primerljivost podob, ki so bile zajete v različ-nih letih ali pa v nekaj zaporednih dneh.

Glej tudi tirnica

spekter

spectrum

1. Pri valovanju je spekter porazdelitev go-stote energijskega toka valovanja po frekvenci.

Kadar je porazdelitev diskretna, govorimo o črtastem spektru, kadar je zvezna, pa o zvez-nem spektru. Spekter izsevanega valovanja je emisijski spekter, spekter prepuščenega valo-vanja absorpcijski spekter, spekter odbitega valovanja pa odbojni spekter.

2. Porazdelitev med raznolikimi možnostmi.

Glej tudi elektromagnetni spekter

spektralna ločljivost

spectral resolution

Tudi valovna ločljivost; natančnost sistema pri opazovanju elektromagnetnega valovanja različnih valovnih dolžin. Spektralna ločljivi-vost je boljša, če sistem predmete opazuje v več ozkih kanalih (večspektralno ali celo hi-perspektralno).

Glej tudi ločljivost

spektralni pas

spectral band

Merilo, ki določa razpon valovnih dolžin v opazovanem signalu.

spektralni podpis

spectral signature

Tudi spektralni odziv; opis načina odboja elektromagnetnega valovanja na predmetu v odvisnosti od valovne dolžine.

Glej tudi klasifikacija

spektralni prostor

feature space

Abstraktni prostor, kjer vsaka sivinska vrednost piksla predstavlja koordinato v n-razsežnem prostoru, katerega dimenzije so določene z radiometrično ločljivostjo podobe.

Glej tudi klasifikacija

SPOT

Glej Systeme Pour l'Observation de la Terre

sprejemna postaja

receiving station

Infrastruktura, ki omogoča sprejem, predob-delavo in arhiviranje podatkov satelitov za opazovanje Zemlje.

spuščajoča tirnica

descending orbit

Tirnica, pri kateri satelit potuje od severnega proti južnemu polu.

Glej tudi tirnica

srednja infrardeča svetloba

middle infrared light

Elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami med bližnjo in termično infrardečo svetlobo, to je med 2 in 8 μm .

Glej tudi infrardeča svetloba

SRTM

Glej Shuttle Radar Topography Mission

Stefan-Boltzmannov zakon

Stefan-Boltzmann law

Zakon o sevanju črnega telesa, ki pravi, da je gostota energijskega toka sorazmerna četrti potenci njegove termodinamične temperature. Sorazmernoostna fizikalna konstanta je znana kot Stefanova konstanta ali Stefan-Boltzmannova konstanta.

stereo model

stereo model

Trirazsežen vtis, ki ga dobimo pri opazovanju prekrivajočih se podob s stereoskopom.

stereopar

stereo-pair

Prekrivajoči se podobi ali fotografiji, posneti pod različnimi koti, ki ju lahko opazujemo stereoskopsko.

stereoskop

stereoscope

Naprava s katero opazujemo stereopar (vsako fotografijo ali podobo z enim očesom), ter dobimo prostorski vtis.

subtraktivne osnovne barve

subtractive primary colours

Rumena, magentno rdeča in ciano modra. Z uporabo filtrov v subtraktivnih barvah iz vpadne svetlobe odstranimo modro, zeleno in rdečo, njihov seštevek pa da črno.

Glej tudi osnovne barve

svetloba

light

Del elektromagnetnega valovanja. Po navadi s pojmom svetloba mislimo na vidno svetlobo, ki jo zaznava človeško oko, širše gledano pa gre lahko tudi za radijske valove, vidno, infrardečo in ultravijolično valovanje. Svetlobo in elektromagnetno valovanje v splošnem lahko opišemo s tremi neodvisnimi parametri intenziteto (enakovredno lahko tudi s svetlostjo ali

amplitudo), frekvenco (ali valovno dolžino), ki jo ljudje zaznamo kot barvo svetlobe ter polarizacijo, smer ravnine, v kateri niha električna komponenta elektromagnetnega polja. Zaradi valovno-delčnega dualizma svetloba izraža lastnosti tako valovanja kot delcev.

Glej tudi elektromagnetno valovanje

svetlost

brightness

Merilo za intenziteto (jakost) odboja ali lastnega sevanja.

Glej tudi barvni prostor HSI

Systeme Pour l'Observation de la Terre

Skupina francoskih polarnih satelitov, ki jih odlikuje dobra prostorska ločljivost in snemanje z vrstičnim skenerjem. SPOT (oznaka pomeni sistem za opazovanje Zemlje) je bil eden prvih komercialnih satelitskih sistemov za opazovanje Zemlje. Vsak od satelitov ima dva senzorja, ki lahko delujeta vsak zase ali skupaj, pri čemer vsak od senzorjev opazuje površje bodisi v pankromatskem načinu z visoko ločljivostjo oziroma v večspektralnem načinu z nekoliko slabšo ločljivostjo. Smer gledanja snemalnega sistema lahko zasukamo, tako da lahko ustvari stereoskopske pare posnetkov.

šum

noise

Vsak nezaželen element, ki zmanjšuje jasnost osnovnega signala. Pri daljinskem zaznavanju gre za »motnje« v delovanju senzorjev, prenosnih sistemov, elektronike in tako dalje.

Glej tudi razmerje signal šum

Tagged Image File Format

Oblika digitalnega zapisa rastrskih slikovnih podatkov, ki jo je razvilo podjetje Aldus, skupaj z Microsoftom. Njegova razširitev GeoTIFF omogoča shranjevanje podatkov o lokaciji in projekciji podobe neposredno v format zapisa.

tandemsko snemanje

tadem mission

Način opazovanja zemeljskega površja z dvema radarskima satelitskima sistemoma hkrati ali v zelo kratkem časovnem razmiku. Tandemsko snemanje sta v letih 1995 in 1996 izvajala satelita ERS-1 in 2.

tekstura

texture

Značilna razporeditev in frekvenčno spreminjanje tona na posameznih območjih podobe. Tekstura je eden najpomembnejših elementov za prepoznavanje predmetov na podobah.

telemetrija

telemetry

1. Merjenje in zbiranje podatkov na daljavo.
2. Določanje položaja in navigacija.

temperatura

temperature

Ena osnovnih termodinamičnih spremenljivk. Povezana je z gibanjem atomskih in podatomskih delcev snovi.

termična infrardeča svetloba

thermal infrared light

Tudi dolgovalovna infrardeča svetloba; elektromagnetno valovanje z valovnimi dolžinami med 8 in 15 μm .

Glej tudi infrardeča svetloba

Thematic Mapper

Snemalni sistem novejšje generacije satelitov Landsat (4 do 7). Thematic Mapper (TM) je prečni snemalni sistem, ki hkrati zajame šestnajst vrstic za vsak netermični kanal (v termičnem pa štiri). Pri tem uporablja nihajoče zrcalo, ki snemanje opravlja tako pri poti od vzhoda proti zahodu kot tudi v obratni smeri. TM ima sedem kanalov, njegova prostorska ločljivost je 30 m za vse kanale razen termičnega, v katerem je prostorska ločljivost 120 m. Vrednosti vseh kanalov so podane v razponu med 0 in 255, čemur ustreza osem-bitna radiometrična ločljivost. Satelit Landsat 7 ima nekoliko izboljšan skener Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+). ETM+ ima tudi pankromatski kanal z ločljivostjo 15 m, ki pokriva zeleni, rdeči in bližnji infrardeči del spektra, poleg tega pa je ločljivost termičnega kanala 60 m.

Glej tudi Landsat, MultiSpectral Scanner

TIFF

Glej Tagged Image File Format

TIN

Triangulated Irregular Network

Glej mreža neenakih trikotnikov

tirna ravnina

orbital plane

Ravnina, ki vsebuje tirnico satelita in gre skozi središče Zemlje.

Glej tudi tirnica

tirnica

orbit

Krivulja, ki podaja pot gibajočega se delca, ponavadi okoli osrednjega nebesnega telesa pod vplivom gravitacije.

Glej tudi polarna tirnica, geostacionarna tirnica

TIROS

Television and Infrared Observation Satellite

TM

Glej Thematic Mapper

točnost

accuracy

Podatek, ki pove, kako dobro določene meritve predstavljajo vrednost opazovane količine. Točnost opredelimo kot razliko med trenutno vrednostjo izbranega podatka in pravo (ali privzeto) vrednostjo istega podatka. Merilo za točnost je koren povprečne kvadratne napake.

Glej tudi koren povprečne kvadratne napake, natančnost

ton

tone

Relativna svetlost ali barva predmetov na podobi. Ton je glavni element za ločevanje med različnimi predmeti in pojavi.

topografska normalizacija

topographic normalization

Postopek predobdelave podob, ki odpravi vpliv različne osvetlitve zaradi oblike površja in s tem olajša primerjavo podob. Gre za umetno odstranitev senc na podobah z upoštevanjem digitalnega modela višin.

transformacija podobe

image transformation

Postopki, ki iz obstoječih informacij ustvarijo nove, pogosto z upoštevanjem več kanalov. Pri tem gre lahko za kanale istega večspektralnega senzorja ali podatke dveh ali več podob istega območja, ki so zajete ob različnih časih. Primeri transformacij so aritmetične

operacije, spektralni indeksi, analiza osnovnih komponent in podobno.

trenutno vidno polje

instantaneous field of view

Kot oziroma odprtina, prek katere detektor zaznava valovanje. Pri skenerjih trenutno vidno polje določa velikost območja, ki ga na površju opazujemo v izbranem trenutku.

učni vzorec

training sample

Tudi učno območje; območje na površju s poznanimi lastnostmi. Učna območja uporabljamo pri nadzorovani klasifikaciji podob, zato da določimo spektralne lastnosti opazovanih predmetov.

Glej tudi klasifikacija, nadzorovana klasifikacija

učno območje

training area

Glej učni vzorec

ultravijolična svetloba

ultraviolet radiation

Elektromagnetno valovanje z valovno dolžino krajšo od valovne dolžine vidne svetlobe, vendar daljšo od valovne dolžine rentgenskih žarkov.

Glej tudi elektromagnetno valovanje

umetno odprtinski radar

synthetic aperture radar

Radarski sistem, pri katerem tako imenovano azimutno ločljivost povečamo z obdelavo signalov, posnetih iz sosednjih točk. Pri tem umetno odprtinski radar z upoštevanjem Dopplerjevega premika valovanja sestavi več zaporednih signalov (odbojev), ki jih radar sprejme med premikanjem v smeri leta, in s tem poveča ločljivost sistema.

Glej tudi radar, radar bočnega pogleda

USGS

United States Geological Survey

UTC

Glej Coordinated Universal Time

UV

Glej ultravijolična svetloba

valovanje

wave

Širjenje motnje, navadno sinusnega nihanja, v sredstvu ali v polju. Z izjemo elektromagnetnega valovanja in gravitacijskih valov, ki se širita v elektromagnetnem oziroma gravitacijskem polju, potrebuje valovanje za širjenje sredstvo, ki je prožno, tako da lahko delci snovi izmenjujejo energijo, ne da bi pri tem trajno spremenili svojo lego.

Glej tudi elektromagnetno valovanje

valovna dolžina

wavelength

Razdalja med dvema sosednjima točkama v smeri potovanja valovanja, v katerih je nihanje v valovanju sočasno. Valovna dolžina je obratno sorazmerna s frekvenco.

Glej tudi frekvenca, valovanje

valovno število

wavenumber

Obratna vrednost valovne dolžine, število valovnih dolžin v valovanju na enoto dolžine v smeri potovanja valovanja.

Glej tudi valovna dolžina

varianca

variance

Merilo za razpršenost vrednosti, ki je določeno kot povprečna vrednost kvadratov odklonov spremenljivk od aritmetične sredine.

večkanalna kamera

multiband camera

Sistem, ki hkrati zajema fotografije pri različnih valovnih dolžinah, na primer pankromatsko, barvno, pankromatsko infrardeče in barvno infrardeče.

večspektralni skener

multispectral scanner

Skener, ki podatke hkrati zajema v več (štiri do več kot deset) kanalih.

Glej tudi skener, hiperspektralni skener

vegetacijski indeks

vegetation index

Indeks, ki opredeljuje stanje vegetacije. Podan je kot razmerje med odbojem v infrardečem in rdečem delu elektromagnetnega spektra. Vegetacija (oziroma klorofil v njej) zelo močno odbija infrardečo svetlobo, rdečo pa slabo. Vegetacijski indeks za vegetacijo je torej zelo visok, medtem ko je za nevegetacijo ali poškodovano vegetacijo nizek.

Glej tudi normiran diferencialni vegetacijski indeks

vektor

vector

Oblika predstavitve objektov, ki temelji na vzliščih (točkah) ter povezavah med njimi, to je usmerjenimi segmenti ali loki (linijami). Vektorsko predstavitev objektov pogosto uporabljamo kot metodo predstavitve objektov na topografski karti. Povezavo geometričnih in opisnih (atributnih) podatkov običajno izvedemo s posebno identifikacijsko šifro ali ključem.

Glej tudi raster

velikost

size

Eden od elementov interpretacije, ki omogoča ločevanje predmetov. Pomembna je tako absolutna velikost, ki je povezana z merilom, kot tudi relativna velikost, ki ločuje podobne predmete.

vesoljska postaja

space station

Tudi orbitalna postaja; umetno nebesno telo, ki kot satelit kroži okoli Zemlje, ima človeško posadko in opravlja raziskave. Mednarodna vesoljska postaja (International Space Station, ISS) je skupni projekt vseh večjih vesoljskih agencij in predstavlja enega od vrhuncev vesoljske tehnologije.

vezna točka

tie point

Točka na površju, ki je skupna dvema ali več podobam. Vezne točke uporabljamo za registracijo podob.

Glej tudi registracija, oslonilna točka

vidna svetloba

visible spectrum

Elektromagnetno valovanje, na katerega je najbolj občutljivo človeško oko. Valovne dolžine vidne svetlobe so med 400 in 700 nm.

vidno polje

field of view

Razpon kotov, ki jih lahko opazujemo s snemalnim sistemom.

Glej tudi trenutno vidno polje

visokoprepustni filter

high pass filter

Filter, ki poudari podrobnosti na podobah in jih s tem izostri. Visokoprepustni filtri delujejo nasprotno kot nizkoprepustni in ustrezajo matematični operaciji odvajanja.

Glej tudi filtriranje, nizkoprepustni filter

višinomer

altimeter

1. Tudi altimeter; instrument, ki deluje po načelu barometra in meri višino nad morsko gladino.

2. Aktivni instrument, na primer laser, ki ga uporabljamo za merjenje višine predmetov nad referenčno površino.

vpadni kot

incidence angle

Kot med smerjo žarka (vpadnega elektromagnetnega valovanja) in krajevno navpičnico (normalo na površje).

vpogledna tabela

look-up table

Tabela, ki omogoča preslikavo vrednosti podob v vrednosti, namenjene prikazu na zaslonu (ali nadaljnji obdelavi). Vpogledna tabela vsebuje seznam vhodnih in njim ustreznih izhodnih vrednosti ter deluje kot nekakšen vmesnik med datoteko in zaslonom.

vrstični skener

line scanner

Glej prečni skener

vzdolžna smer

alongtrack direction

1. Smer gibanja platforme.

2. Koordinata v smeri tirnice radarjevega nosilca, ki ji pravimo tudi azimut.

vzdolžni skener

along-track scanner

Skener, ki naenkrat zajame celotno vrstico podob. Z izkoriščanjem gibanja snemalnega sistema ustvari podobo v smeri gibanja, torej vzdolžno. Tovrstni senzorji imajo vrsto (več tisoč) detektorjev, ki se nahajajo v goriščni razdalji sistema leč. Ker njihovo delovanje spominja na pometanje z metlo, jih imenujemo tudi pometajoči (pushbroom).

Glej tudi skener, prečni skener

vzorec

pattern

Pravilna porazdelitev in ponavljanje podobnih tonov in tekstur, ki omogoča interpretacijo »urejene« razporeditve predmetov.

WGS 84

Glej World Geodetic System 1984

World Geodetic System 1984

Svetovni geodetski sistem, določen leta 1984; najbolj razširjen geocentrični koordinatni sistem.

zasuk

yaw

Zasuk letala okrog navpične osi.

Glej tudi nagib, naklon

zaznavanje

sensing

Postopek določanja jakosti odbitega signala za piksele na posnetku. Z izrazom zaznavanje pojmujeemo celoten proces od oddaje signala do njegove pretvorbe v računalniško obliko.

Zemlja

Earth

Eden izmed planetov Osončja. Po oddaljenosti od Sonca je tretji, po velikosti pa peti planet Sončevega sistema. Predstavlja največji trdni planet in edini prostor v vesolju, za katerega je znan obstoj življenja. Zemljina notranjost je sestavljena iz več razmeroma aktivnih plasti. V središču se nahaja verjetno trdno železovo jedro, ki ustvarja Zemljino magnetno polje. Obdaja ga tekoči plašč, tega pa

trda skorja. Površina Zemlje in njena atmosfera sta danes močno preoblikovani zaradi bioloških in človeških dejavnikov. Okoli 70 odstotkov zemeljske površine pokrivajo oceani s slano vodo, preostanek pa zapolnjujejo celine ter otoki.

Glej tudi Sonce

zemljepisna dolžina

Glej geografska dolžina

zemljepisna širina

Glej geografska širina

zniževanje tirnice

period decay

Zmanjševanje višine tirnice, ki je posledica atmosferskega upora in gravitacije. Predmeti v bližnjih tirnicah zaradi zniževanja tirnice padajo v atmosfero in zgorijo.

Glej tudi tirnica

zrcalni odboj

specular reflection

Odboj na površinah, ki so gladke v primerjavi z valovno dolžino vpadnega valovanja. Pri tem se vsa – ali skoraj vsa – vpadna energija odbije stran od odbojne površine v eni sami smeri, odbojni kot pa je enak vpadnemu.

Glej tudi odboj, razpršeni odboj

zrnatost

speckle

Statistično spreminjanje svetlosti pikslov na radarski podobi, ki je posledica konstruktivne in destruktivne interference naključno porazdeljenih sipalcev. Zrnatost je najbolj nezaželen pojav na radarskih posnetkih.

Literatura

Canadian Space Agency. CSA – Home Page of Canadian Space Agency, 2006.
<http://radarsat.space.gc.ca/asc/eng/default.asp>

Alaska Satellite Facility. Japanese Earth Resources Satellite, JERS-1, 1995.
<http://www.asf.alaska.edu/reference/general/JERS.pdf>

Atlantis. *EarthView InSAR – User's guide*. Atlantis, Nepean, 1997.

E. C. Barrett in L. F. Curtis. *Introduction to Environmental Remote Sensing*. Stanley Thornes, Cheltenham, 4. izdaja, 1999.

R. E. Blahut. *Theory of remote image formation*. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.

C. Brenner. Registration and 3D modeling of aerial laser scanner data. V: *International Summer School Digital Recording and 3D Modelling*, Aghios Nikolaos, 2006. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich.

P. A. Burrough. *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Clarendon Press, Oxford, 1986.

J. B. Campbell. *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis, London, 3. izdaja, 2002.

Zelo lepo in jasno napisan učbenik daljinskega zaznavanja. Izdaja je dopolnjena in posodobljena.

Canada Centre for Remote Sensing. Glossary of remote sensing terms, 2006.
http://ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_e.php

R. G. Congalton in K. Green. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data : Principles and Practices*. Lewis, Boca Raton, 1999.

S. Dech. *Mountains from space : peaks and ranges of the seven continents*. Harry N. Abrams, New York, 2005.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt. Mapping the Earth from Space. Tehnično poročilo, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Cologne, Germany, 1999.

- S. Drobne in T. Podobnikar. Osnovni pojmi v geografskih informacijskih sistemih, 1999.
http://www.fgg.uni-lj.si/~sdrobne/GIS_Pojm/
- M. Duhovnik. I&CLC2000 v Sloveniji. V: T. Podobnikar, D. Perko, M. Krevs, Z. Stančič, D. Hladnik in M. Čeh, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2003–2004*, strani 125–130, Ljubljana, 2004. Založba ZRC.
- M. Duhovnik. Zajem topografskih podatkov DTK 5. *Geodetski vestnik*, 49(3): 441–443, 2005.
- Encyclopædia Britannica. Encyclopædia Britannica Online, 2006.
<http://www.britannica.com>
- European Space Agency. ESA Earthnet ERS Design, 2006.
<http://earth.esa.int/object/index.cfm?fobjectid=4221>
- FOLDOC. Free Online Dictionary of Computing, 2006.
<http://foldoc.org/>
- G. M. Foody in P. M. Atkinson, ur. *Uncertainty in remote sensing and GIS*. Wiley, Chichester, 2002.
- T. Fujii in T. Fukuchi, ur. *Laser remote sensing*. Taylor & Francis, Boca Raton, 2005.
- P. J. Gibson in C. H. Power. *Introductory remote sensing : digital image processing and applications*. Routledge, London, 2000.
- R. P. Gupta. *Remote sensing geology*. Springer, Berlin, 2. izdaja, 2003.
- F. M. Henderson in A. J. Lewis, ur. *Manual of remote sensing – Principles and application of imaging radar*. John Wiley and Sons, New York, USA, 3. izdaja, 1998.
- D. Hladnik, M. Krevs, D. Perko, T. Podobnikar in Z. Stančič, ur. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1999–2000*, Ljubljana, 2000. Znanstvenoraziskovalni center SAZU.
- A. Kobler, N. Pfeifer, P. Ogrinc, L. Todorovski, K. Oštir in S. Džeroski. Using redundancy in aerial lidar point cloud to generate DTM in steep forested relief. V: T. Koukal in W. Schneider, ur., *3D remote sensing in forestry*, strani 264–269, Vienna, Austria, 2006. University of Natural Resources and Applied Life Sciences.
http://www.rali.boku.ac.at/fileadmin/_/H85/H857/workshops/3drsforestry/Proceedings_3D_Remote_Sensing_2006.pdf
- A. Kobler in J. Zafran. Podatki letalskega lidarskega snemanja in njihova uporaba pri gospodarjenju z gozdom. V: D. Hladnik, ur., *Monitoring gospodarjenja z gozdom in gozdnato krajino*, strani 83–96, Ljubljana, 2006. Biotehniška fakulteta.
- Ž. Kokalj in K. Oštir. Ugotavljanje pokrovnosti iz satelitskih posnetkov in vrednotenje pokrajinskoekoloških tipov Slovenije. *Geografski obzornik*, 52(4): 12–18, 2005.
- Ž. Kokalj, K. Oštir in A. Marsetič. Izdelava ortopodob iz satelitskih posnetkov. V: D. Perko, J. Nared, M. Čeh, D. Hladnik, M. Krevs, T. Podobnikar in R. Šumrada, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2005–2006*, strani 23–32, Ljubljana, 2006. Založba ZRC.

- M. Komac. *Napoved verjetnosti pojavljanja plazov z analizo satelitskih in drugih prostorskih podatkov*. Geološki zavod Slovenije, Ljubljana, 2005.
- M. Komac. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology*, 74: 17–28, 2006.
- G. Konecny. *Geoinformation : remote sensing, photogrammetry and geographic information systems*. Taylor & Francis, London, 2003.
- M. Kosmatin Fras. Vpliv kakovosti vhodnih podatkov na kakovost ortofota. *Geodetski vestnik*, 48(2): 167–178, 2004.
- H. J. Kramer. *Observation of the earth and its environment: survey of missions and sensors*. Springer, Berlin, 4. izdaja, 2002.
- K. Kraus in W. Schneider. *Fernerkundung – Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. Dümmler, Bonn, 1988.
- M. Krevs. Spreminjanje urbane rabe tal v ljubljani. *Dela*, 22: 55–65, 2004.
- M. Krevs, D. Perko, T. Podobnikar in Z. Stančič, ur. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1997–1998*, Ljubljana, 1998. Znanstvenoraziskovalni center SAZU.
- K. Kvamme, K. Oštir, Z. Stančič in R. Šumrada. *Geografski informacijski sistemi*. Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti, Ljubljana, 1997.
- Leica Geosystems. *ERDAS Field Guide*. Norcross, 2005.
- A. J. Lewis in M. H. Floyd. Radar fundamentals – the geoscience perspective. V: F. M. Henderson in A. J. Lewis, ur., *Manual of remote sensing – Principles and application of imaging radar*, zvezek 2, poglavje 3, strani 131–181. John Wiley and Sons, New York, 3. izdaja, 1998.
- T. M. Lillesand in R. W. Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York, 5. izdaja, 2004.
- Pregledna knjiga o daljinskem zaznavanju.
- M. Logar. Digitalno dohiteli najsodobnejše armade. *Slovenska vojska*, VIII(10): 15–16, 2000.
- P. M. Mather. *Computer Processing of Remotely Sensed Images: An Introduction*. John Wiley and Sons, Chichester, 3. izdaja, 2004.
- Zelo dobra knjiga o obdelavi podob daljinskega zaznavanja. Preprosto, a hkrati matematično korektno, obdelava vse dele postopka, navaja osnovne in napredne tehnike. Knjigi je priložen CD s programom MIPS in testnimi podatki.
- R. M. McCoy. *Field methods in remote sensing*. Guilford Press, New York, 2005.
- V. Mesev, ur. *Remotely sensed cities*. Taylor & Francis, London, 2003.
- National Aeronautics and Space Administration. The Remote Sensing Tutorial, 2006.
<http://rst.gsfc.nasa.gov>

- National Space Development Agency of Japan. FUYO-1 Japanese Earth Resources Satellite (JERS-1), 2006.
http://www.nasda.go.jp/projects/sat/jers1/index_e.html
- K. Oštir. Lastnosti in uporaba visoko ločljivih satelitskih posnetkov QuickBird. V: T. Podobnikar, D. Perko, M. Krevs, Z. Stančič, D. Hladnik in M. Čeh, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2003–2004*, strani 349–356, Ljubljana, 2004. Založba ZRC.
- K. Oštir, Z. Stančič, T. Podobnikar in Z. Vehovar. Pridobivanje in uporaba prostorskih podatkov visoke ločljivosti pri načrtovanju omrežja mobilne telefonije. V: D. Hladnik, M. Krevs, D. Perko, T. Podobnikar in Z. Stančič, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1999–2000*, strani 143–152, Ljubljana, 2000. Znanstvenoraziskovalni center SAZU.
- K. Oštir, T. Veljanovski, T. Podobnikar in Z. Stančič. Uporaba daljinskega zaznavanja pri opazovanju plazov v Logu pod Mangartom. V: T. Podobnikar, D. Perko, M. Krevs, Z. Stančič in D. Hladnik, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2001–2002*, strani 197–209, Ljubljana, 2002. Založba ZRC.
- D. Pahor, M. Drobnič, V. Batagelj, S. Bratina, V. Djurdjič, P. Gabrijelčič, M. Gams, M. Klančar, R. Ključevšek, J. Koklič, U. Mesojedec, K. Oštir, M. Potrč, B. Robič, D. Sečnik, S. Simič in J. Toth. *Leksikon računalništva in informatike*. Pasadena, Ljubljana, 2002.
- D. Perko, J. Nared, M. Čeh, D. Hladnik, M. Krevs, T. Podobnikar in R. Šumrada, ur. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2005–2006*, Ljubljana, 2006. Založba ZRC.
- F. Petek, V. Bric in T. Rotar. Uporaba starih letalskih posnetkov pri ugotavljanju sprememb rabe tal. V: T. Podobnikar, D. Perko, M. Krevs, Z. Stančič, D. Hladnik in M. Čeh, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2003–2004*, strani 295–302, Ljubljana, 2004. Založba ZRC.
- D. Petrovič. Ocena kakovosti državne topografske karte v merilu 1 : 50.000. *Geodetski vestnik*, 50(2): 187–200, 2006.
- T. Podobnikar, D. Perko, M. Krevs, Z. Stančič in D. Hladnik, ur. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2001–2002*, Ljubljana, 2002. Založba ZRC.
- T. Podobnikar, D. Perko, M. Krevs, Z. Stančič, D. Hladnik in M. Čeh, ur. *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2003–2004*, Ljubljana, 2004. Založba ZRC.
- G. L. Prost. *Remote sensing for geologists : a guide to image interpretation*. Gordon & Breach, New York, 2. izdaja, 2001.
- D. A. Quattrochi in J. C. Luvall, ur. *Thermal remote sensing in land surface processes*. CRC Press, Boca Raton, 2004.
- R. K. Raney. Radar fundamentals – technical perspective. V: F. M. Henderson in A. J. Lewis, ur., *Manual of remote sensing – Principles and application of imaging radar*, zvezek 2, poglavje 2, strani 9–130. John Wiley and Sons, New York, 3. izdaja, 1998.

- J. A. Richard in X. Jia. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Springer, Berlin, 4. izdaja, 2006.
Učbenik daljinskega zaznavanja, ki pregledno podaja informacije o obdelavi podob.
- R. Richter. *ATCOR for IMAGINE 9.1*. Geosystems, München, 2006.
- F. F. Sabins. *Remote Sensing – Principles and Interpretation*. W. H. Freeman, New York, 1997.
Obsežno in pregledno delo, ki veliko pozornosti posveča uporabi daljinskega zaznavanja.
- R. A. Schowengerdt. *Remote Sensing : Models and Methods for Image Processing*. Academic Press, San Diego, 1997.
- A. Skidmore, ur. *Environmental modelling with GIS and remote sensing*. Taylor & Francis, London, 2002.
- D. Skumavec in D. Šabić. Vzdrževani statistični GIS pokrovnosti tal in njegova uporaba za prikaz podatkov iz popisa prebivalstva 2002. V: T. Podobnikar, D. Perko, M. Krevs, Z. Stančič in D. Hladnik, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2001–2002*, strani 151–164, Ljubljana, 2002. Založba ZRC.
- J. Strnad. *Fizika 2. del*. Društvo matematikov, fizikov in astronomov, Ljubljana, 1985.
- J. Strnad. *Fizika*. Cankarjeva založba, Ljubljana, 1991.
- D. Šabić, E. Lojović in A. Tretjak. Statistični GIS pokrovnosti in rabe tal Slovenije z oceno spremembe pokrovnosti tal med letoma 1993 in 1997. V: M. Krevs, D. Perko, T. Podobnikar in Z. Stančič, ur., *Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 1997–1998*, strani 233–242, Ljubljana, 1998. Znanstvenoraziskovalni center SAZU.
- R. Šumrada. *Strukture podatkov in prostorske analize*. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2005a.
- R. Šumrada. *Tehnologija GIS*. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana, 2005b.
- Tag's Broadcasting Services. The Satellite Encyclopedia ONLINE, 2006.
<http://www.tbs-satellite.com/tse/online/>
- M. Triglav Čekada. Izdelava digitalnih modelov reliefa planetov s poudarkom na klinometriji. *Geodetski vestnik*, 48(3): 340–350, 2004.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Glossary of Terms and Acronyms, 2006.
<http://www.unesco.org/csi/pub/source/rs15.htm>
- United States Geological Survey. Shuttle Radar Topography Mission Home Page, 2006.
<http://srtm.usgs.gov/>
- University of Nebraska-Lincoln. CASDE Remote Sensing Glossary, 2006.
<http://casde.unl.edu/glossary/>
- M. Vidmar in J. Budin. Tehnološke značilnosti satelitov. V: D. Matko, ur., *Uporaba vesoljskih tehnologij*, strani 109–136. Didakta, Radovljica, 1996.

C. Weitkamp, ur. *Lidar : range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. Springer, New York, 2005.

Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia, 2006a.

http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page.

Wikipedia je brezplačna spletna enciklopedija, ki jo urejajo prostovoljci. V nekaj letih je postala zelo priljubljen in presenetljivo popoln vir informacij.

Wikipedia. Wikipedija, prosta enciklopedija, 2006b.

http://sl.wikipedia.org/wiki/Glavna_stran.

Wikipedija je slovenska različica brezplačne enciklopedije, ki poleg prevodov najpomembnejših člankov vsebuje tudi številna izvirna gesla.

Poleg navedene literature obstaja še precej revij, namenjenih daljinskemu zaznavanju. Najpomembnejše so:

- IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (Institute of Electrical and Electronics Engineers),
- International Journal of Remote Sensing (Taylor & Francis),
- Photogrammetric Engineering & Remote Sensing (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing),
- ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing),
- Remote Sensing Reviews (Taylor & Francis),
- Remote Sensing of Environment (Elsevier) in
- Canadian Journal of Remote Sensing (Canadian Aeronautics and Space Institute).

Kazalo slik

1.1	Postopek daljinskega zaznavanja.	14
2.1	Galileo Galilei je podobe daljinskega zaznavanja zapisoval na papir.	15
2.2	Baloni so omogočili opazovanje Zemlje od zgoraj.	16
2.3	Golobi s fotografskimi kamerami.	17
2.4	Letalski posnetek preskusnega poligona raket V-2.	17
2.5	Prve slike Zemlje iz vesolja so posneli v okviru programa Apollo.	18
2.6	Območje Damaska, ki ga je na enem prvih posnetkov opazoval satelit Landsat.	19
3.1	Elektromagnetno valovanje je nihanje električnega in magnetnega polja.	22
3.2	Valovanje opišemo z amplitudo, frekvenco in valovno dolžino.	22
3.3	Spekter elektromagnetnega valovanja je zelo širok.	23
4.1	Potovanje elektromagnetnega valovanja skozi atmosfero.	26
4.2	Sipanje valovanja v atmosferi.	26
4.3	Rayleighovo sipanje močnejše vpliva na krajše valovne dolžine kot na daljše.	27
4.4	Absorpcija valovanja v atmosferi.	28
4.5	Prepustnost zemeljske atmosfere v odvisnosti od valovne dolžine določa okna, ki jih lahko uporabljamo za daljinsko zaznavanje.	28
4.6	Lom svetlobe pri prehodu iz optično redkejši snovi v optično gostejšo in potovanje žarka svetlobe skozi atmosfero.	30
5.1	Ko valovanje pride do zemeljskega površja, z njim interagira.	31
5.2	Poznamo tri osnovne načine interakcije valovanja s površjem, in sicer absorpcijo, transmisijo in odboj.	32
5.3	Odboj valovanja na površju: zrcalni in razpršeni.	32
5.4	Interakcija elektromagnetnega valovanja z vegetacijo in vodo.	33
5.5	Spektralni podpis podaja odvisnost odboja od valovne dolžine.	34
6.1	Zapis elektromagnetnega valovanja s senzorjem.	37
6.2	Senzorji daljinskega zaznavanja so nameščeni na tleh, letalih, vesoljskih plovilih in satelitih.	38
6.3	Geostacionarna in skoraj polarna tirnica satelita.	39
6.4	Primerjava polarne in skoraj polarne tirnice satelita.	40

6.5	Dvigajoča in spuščajoča tirnica satelita.	41
6.6	Območje, ki ga satelit posname na zemeljski površini, se imenuje pas. . . .	43
6.7	Pokritost površja z eno tirnico in dnevna pot satelita.	43
6.8	Aktivni in pasivni način opazovanja zemeljskega površja.	44
7.1	Vidno polje določa prostorsko ločljivost.	48
7.2	Podoba nizke in visoke ločljivosti.	49
7.3	Spektralni podpis podobnih predmetov.	50
7.4	Spektralna ločljivost fotografij.	50
7.5	Zapis linearne krivulje z enobitno in štiribitno radiometrično ločljivostjo. .	51
7.6	Primerjava dvo- in osembitne radiometrične ločljivosti.	51
7.7	Časovno ločljivost lahko povečamo s sistemi, ki lahko senzorje zasukajo. .	53
8.1	Snemalni sistem pri fotografiranju.	55
8.2	Spektralna občutljivost različnih filmskih emulzij pri črno-belem in barv- nem filmu.	56
8.3	Primerjava naravne in lažno barvne podobe.	57
8.4	Letalo z več preleti posname večje površje.	58
8.5	Prečni skener.	59
8.6	Vzdolžni skener.	61
8.7	Termično snemanje.	62
8.8	Termogram območja med Kranjem in Ljubljano, posnet s satelitom Landsat. 63	
9.1	Radar usmeri impulz proti površju in meri njegov odboj.	66
9.2	S premikanjem nosilca in s tem odtisa na površini ustvarimo radarsko podobo. 67	
9.3	Ustvarjanje umetne odprtine s premikanjem antene radarja.	68
9.4	Vpliv vpadnega kota na jakost odbitega mikrovalovanja.	69
9.5	Zrcalni, razpršeni in pravokotni oziroma popolni odboj radarskih valov. . .	69
9.6	Zrnatosti se pri radarskih posnetkih ne moremo izogniti.	70
10.1	Delovanje lidarskega sistema.	74
10.2	Lidar določa razdaljo med senzorjem in površjem z merjenjem časa poto- vanja valovanja.	75
10.3	Skenerji pri lidarskih sistemih za usmerjanje laserja uporabljajo nihajoča zrcala, vrteča zrcala in optična vlakna.	76
10.4	Oblak lidarskih točk.	77
10.5	Postopek obdelave lidarskih meritev.	77
10.6	Lidarski podatki vsebujejo informacijo o točki odboja valovanja.	78
10.7	S klasifikacijo in modeliranjem iz oblaka točk dobimo trirazsežne modele. .	78
11.1	Hurikan Andrew, ki ga je posnel satelit GOES-7.	82
11.2	Temperatura morja in vegetacijski indeks ustvarjen s posnetki AVHRR. . .	85
11.3	Način snemanja s sistemom Meteosat.	87
11.4	Posnetek Evrope, ki ga je ustvaril MSG-1.	88
11.5	Satelit Landsat 7 pri opazovanju Zemlje.	89
11.6	Delta reke Geba v Gvineji Bissau, ki jo je posnel satelit Landsat 7.	93
11.7	Satelit SPOT.	94
11.8	Stranski pogledi in sosednje gledanje pri satelitu SPOT.	95
11.9	Opazovanje krožnih namakalnih polj v Saudovi Arabiji s satelitom SPOT. 96	

11.10	Pankromatski posnetek piramid v Gizi, ki ga je zajel satelit IKONOS. . .	97
11.11	Naravno barvna podoba Eifflovega stolpa, ki jo je zajel QuickBird.	99
11.12	Koncentracija fitoplanktona, kot jo izmeril senzor CZCS.	100
11.13	Povprečna koncentracija klorofila, ki jo je izmeril sistem SeaWiFS.	101
11.14	Satelit ERS-2 tik pred izstrelitvijo.	102
11.15	Interferogram prikazuje obliko površja in bi ga lahko povezali s plastnicami. . .	103
11.16	Veččasovni barvni kompozit posnetkov ASAR, ki zajema vzhodno Slovenijo in Madžarsko.	106
11.17	Posnetek satelita RADARSAT, ki prikazuje naftni madež v bližini otočja Galapagos.	107
11.18	Vesoljsko plovilo Endeavour z interferometričnim radarskim sistemom SRTM. . .	109
12.1	Prenos podatkov od satelita do sprejemne postaje.	111
12.2	Sprejemne postaje satelitov SPOT in njihovo »pokrивно« območje.	112
13.1	Interpretacija in analiza podob je pomemben korak daljinskega zaznavanja. . .	113
13.2	Analogna in digitalna obdelava podob.	114
13.3	Sistem za obdelavo geografskih podob sestavlja strojna in namenska pro- gramska oprema.	115
13.4	Izboljšanje kontrasta podobe.	116
13.5	Klasifikacija satelitskih posnetkov.	117
14.1	Elementi vizualne interpretacije podob.	120
15.1	Manjkajoče vrstice na podobi lahko nadomestimo z vrednostmi sosednjih pikslov.	124
15.2	Vodoravne proge, ki jih opazimo na podobah satelitov Landsat.	125
15.3	Registracija podobe.	127
15.4	Interpolacija novih vrednosti pri prevzorčenju z metodo najbližjega sosedu, z bilinearno interpolacijo in s kubično konvolucijo.	129
15.5	Na signal, ki ga zazna detektor, vplivajo različna vpadna valovanja.	130
15.6	Opazovanje in odštevanje odbojnih vrednosti temnih predmetov je najpre- prostejši način atmosferske korekcije.	130
15.7	Regresijska krivulja pri primerjavi infrardečega in vidnega kanala določa prispevek atmosfere.	131
15.8	Mozaičenje ustvari iz posameznih satelitskih posnetkov navidezno enega samega.	132
15.9	Topografska normalizacija posnetka Landsat.	133
15.10	Delovanje senzorja Landsat ETM+ z nizkim in visokim prirastkom.	134
16.1	Prerez človeškega očesa.	138
16.2	Spektralna občutljivost človeškega očesa.	138
16.3	Barvna modela RGB in HSI.	139
16.4	Primerjava črno-belega in barvnega prikaza podobe.	140
16.5	Podoba satelita Landsat, prikazana z vrednostmi, ki jih je zaznal senzor. . .	142
16.6	Linearni razteg kontrasta izboljša jasnost podobe.	143
16.7	Uravnoteženje ustvari zelo kontrastno podobo z enakomeno razporejenimi vrednostmi v histogramu.	146
16.8	Normalna ali Gaussova porazdelitev.	147

16.9	Gaussov razteg ustvari kontrastno podobo, ki ima normalno razporejen histogram.	150
16.10	Razrez podobe temperatur na nivoje omogoča hitro določanje različno toplih območij.	151
16.11	Pri psevdobarvni transformaciji črno-beli podobi spremenimo deleže posameznih barv in ustvarimo navidezne barve.	152
16.12	Pri konvolucijskem filtriranju prek podobe pošljemo računsko okno in v njem izvedemo določeno operacijo.	154
16.13	Nizkoprepustni filter oziroma filter povprečenja podobo zglati in s tem odpravi šum.	154
16.14	Filter mediana podobo zglati, pri čemer ohrani robove in ne ustvari novih vrednosti.	155
16.15	Gaussov filter podobo zglati, pri čemer stopnjo glajenja določamo z vrednostjo standardnega odklona.	156
16.16	Z visokoprepustnim filtriranjem iz podobe dobimo podrobnosti.	158
16.17	Primerjava filtrov za odkrivanje robov.	159
17.1	Z odštevanjem lahko določimo spremembe, do katerih je prišlo med zajetjem podob.	162
17.2	Razlika podob poudari spremembe, nastale v času med snemanjema. . . .	163
17.3	Razmerje kanalov je zelo podobno na osvetljenem in na senčnem delu podobe.	164
17.4	Vegetacijski indeks NDVI območja okolice Ljubljane.	165
17.5	Transformacija PCA zmanjša število kanalov s povečevanjem informacijske gostote.	167
17.6	Kanali 1 do 7 podobe satelita Landsat Ljubljane in okolice.	168
17.7	Osnovne komponente 1 do 7 podobe Ljubljane in okolice.	169
17.8	Kauth-Thomasova transformacija podobe senzorja Landsat TM.	171
17.9	Združevanje večspektralne in pankromatske podobe s transformacijo med prostoroma HSI in RGB.	173
18.1	Spektralni podpis različnih tipov tal.	176
18.2	Gruče v spektralnem prostoru.	179
18.3	Spektralni podpisi učnih vzorcev.	180
18.4	Pri klasifikaciji uporabljamo več različnih algoritmov.	181
18.5	Rezultat nadzorovane klasifikacije satelitskega posnetka.	182
19.1	Integracija podatkov daljinskega zaznavanja.	185
19.2	Intergracija posnetkov različnih ločljivosti in različnih senzorjev.	186
19.3	Intergracija podatkov optičnega in radarskega senzorja.	187
19.4	Perspektivni pogled in integracija podatkov v sistemih GIS.	187
20.1	Uporaba je zadnji korak postopka daljinskega zaznavanja.	190
20.2	Primerjava simuliranih pankromatskih posnetkov visoke in srednje ločljivosti.	191
20.3	Digitalni model višin, ki je bil izdelan s tehniko radarske interferometrije. .	193
20.4	Rezultat klasifikacije satelitskih posnetkov Landsat.	194
20.5	Lidar omogoča opazovanje podrobnosti pod drevesnimi krošnjami.	196
20.6	Perspektivni pogled območja plazu v Logu pod Mangartom.	197
20.7	Karta napovedi plazovitih območij, dobljena z analizo satelitskih posnetkov Resurs in Landsat.	198

Kazalo tabel

4.1	Plasti atmosfere.	25
4.2	Atmosferska okna so področja, ki so uporabna za daljinsko zaznavanje. . .	29
9.1	Najpomembnejši mikrovalovni pasovi.	66
11.1	Kanali satelitov GOES.	83
11.2	Kanali senzorja AVHRR.	84
11.3	Načini zajemanja podatkov senzorja AVHRR.	84
11.4	Kanali senzorja SEVIRI na satelitih Meteosat.	86
11.5	Kronologija izstrelitev satelitov Landsat.	89
11.6	Kanali senzorja MSS na satelitih Landsat.	90
11.7	Kanali senzorjev TM in ETM+ na satelitih Landsat.	91
11.8	Kanali senzorja HRV na satelitih SPOT.	95
11.9	Kanali sistema IKONOS.	97
11.10	Kanali sistema QuickBird.	98
11.11	Kanali sistema SeaWiFS.	100
13.1	Primerjava vizualne interpretacije in digitalne obdelave podob.	115
15.1	Število potrebnih kontrolnih točk v odvisnosti od stopnje polinomske transformacije.	128
15.2	Kalibracijski parametri za senzor Landsat ETM+.	134
16.1	Uravnoteženje histograma zahteva izračun kumulativnega indeksa.	145
16.2	Število pikslov v odvisnosti od novih digitalnih vrednosti pri uravnoteženju histograma.	147
16.3	Določitev števila pikslov za posamezno digitalno vrednost pri Gaussovem raztegu.	148
16.4	Za določanje novih digitalnih vrednosti pri Gaussovem raztegu primerjamo teoretično in dejansko kumulativno število pikslov.	148
16.5	Število pikslov v odvisnosti od novih digitalnih vrednosti pri Gaussovem raztegu.	149
17.1	Korelacija med kanali podobe satelita Landsat.	167
17.2	Osnovne komponente s pripadajočimi variancami za podobo	167

17.3	Koeficienti Kauth-Thomasove transformacije v primeru senzorja Landsat TM.	171
18.1	Dvokanalni podpisi značilnih tipov površja.	176
18.2	Matrika napak pove, kako zanesljivo so določeni posamezni razredi.	183
18.3	Ocena natančnosti klasifikacije, dobljena s primerjavo kontrolnih točk in posnetkov ortofoto.	183

Stvarno kazalo

- absolutna temperatura, 199
- absorpcija, 27–29, 31, 199
- absorpcijski pas, 199
- aditivne osnovne barve, 199
- Advanced Very High Resolution Radiometer, 84–85, 199
- AIRSAR, 199
- akromatični vid, 199
- aktivni mikrovalovni instrument, 102, 199
- aktivni senzor, 44, 200
- albedo, *glej* odbojnost
- AMI, *glej* aktivni mikrovalovni instrument
- amplituda, 200
- analiza osnovnih komponent, 166–170, 200
- analiza podob, 14, 113
- analogna fotografija, 200
- analogna obdelava podob, 114
- anomalija, 200
- antena, 200
- apogej, 200
- aritmetične operacije, 162–164
- ASF, 200
- atmosfera, 25, 200
- atmosferski popravki, 129–131, 200
- atmosfersko okno, 29, 200
- atribut, 200
- ATS, 81
- AVHRR, *glej* Advanced Very High Resolution Radiometer
- azimut, 200
- azimutna ločljivost, 67, 201
- bajt, 201
- barva, 201
- barvni film, 56, 201
- barvni prostor, 137–140
- barvni prostor HSI, 139, 201
 - barva, 201
 - intenziteta, 208
 - nasičenost, 212
- barvni prostor RGB, 138, 201
- barvni vid, 201
- batimetrija, 201
- baza, 201
- bilinearno prevzorčenje, 128
- bit, 201
- bližnja infrardeča svetloba, 201
- CCD, *glej* detektor CCD
- CCRS, 201
- CEOS, *glej* Committee on Earth Observation Satellites
- CIS, 201
- Clarkov obroč, 201
- CNES, 201
- Committee on Earth Observation Satellites, 201
- Coordinated Universal Time, 202
- CSA, 202
- CTS, 202
- čakalni čas, 60, 202
- čas ponovnega obiska, 42
- čas ponovnega snemanja, 42
- časovna ločljivost, 202
- CZCS, 99, 202
- človeški vid, 137–140
- črno telo, 202
- daljinsko zaznavanje
 - definicija, 13–14, 202
 - lidarsko, 73–79
 - optično, 55–63
 - platforme, 37–39

- radarsko, 65–71
- sistemi, 37–44
- uporaba, 189–198
- zgodovina, 15–19
- daljnja infrardeča svetloba, 202
- deklinacija, 202
- deljenje podob, 164
- DEM, *glej* digitalni model višin
- DEOS, 202
- detektor, 202
- detektor CCD, 202
- dielektričnost, 202
- dielektrik, 202
- diferencialna interferometrija, 104
- diferencialni interferogram, 104, 203
- difuzni odboj, 219
- digitalizacija, 203
- digitalna fotografija, 203
- digitalna obdelava podob, 114, 203
- digitalna vrednost, 203
- digitalni model reliefa, 203
- digitalni model višin, 192, 203
- dinamično območje, 203
- diskretni lidar, 74
- DLR, 203
- DMR, *glej* digitalni model reliefa
- DMV, *glej* digitalni model višin
- DN, *glej* digitalna vrednost
- določanje pokrovnosti, 193–195
- določanje rabe tal, 193–195
- dolžina pulza, 203
- Dopplerjev pojav, 67, 203
- Dopplerjeva frekvenca, 203
- DTM, *glej* digitalni model reliefa
- dvigajoča tirnica, 41, 204
- dvojiški številski sistem, 204
- ekvator, 204
- elektromagnetni spekter, 23–24, 204
- elektromagnetno valovanje, 21–24, 65, 204
- elipsoid, 204
 - rotacijski, 220
- Endeavour, 108
- Environmental Satellite, *glej* Envisat
- Envisat, 103–107, 204
- EOS, 204
- ERS, *glej* European Remote-Sensing satellite
- ERTS, 88
- ESA, *glej* European Space Agency
- ESRIN, 204
- ETM+, *glej* Thematic Mapper
- European Remote-Sensing satellite, 101–103, 204
- European Space Agency, 204
- faza, 205
- film, 55, 205
 - barvni, 56, 201
 - infrardeči barvni, 207
 - infrardeči pankromatski, 56, 207
 - pankromatski, 55
- filter, 205
 - Gaussov, 156
 - Laplaceov, 210
 - mediana, 155–156, 205
 - neusmerjeni, 213
 - nizkoprepustni, 154–155, 213
 - povprečja, 205
 - Robertsov, 159
 - robov, 158–160
 - smerni, 221
 - Sobelov, 159
 - visokoprepustni, 157–158, 226
- filter mediana, 155–156, 205
- filter povprečja, 205
- filter robov, 158–160
- filtriranje, 71, 77, 152–160, 205
 - konvolucijsko, 153–154
 - prostorsko, 137
- fotografija, 205
 - analogna, 200
 - digitalna, 203
- fotografska kamera, 55–58
- fotogrametrija, 58
- foton, 205
- Fourierjeva transformacija, 153, 161, 205
- frekvenčni premik, 67
- frekvenca, 65, 205
 - laserskih pulzov, 75
- frekvenca ponavljanja pulza, 205
- Gaussov filter, 156
- Gaussov razteg histograma, 146–149
- GCP, *glej* oslonilna točka
- geodetski datum, 205
- geodezija, 205
- geografska dolžina, 205

- geografska širina, 206
 geografski informacijski sistem, 206
 geografski prostor, 177
 geoid, 206
 geokoda, *glej* koordinata
 geomatika, 206
 geometrijski popravki, 116, 125–129, 206
 georeferenciranje, 126, 206
 geostacionarna tirnica, 39, 206
 GIS, *glej* geografski informacijski sistem
 GMS, 206
 GMT, *glej* Coordinated Universal Time
 GOES, 82–83, 206
 GOME, 102
 goriščna razdalja, 206
 GPS, *glej* sistem globalnega pozicioniranja
 Greenwich Mean Time, *glej* Coordinated Universal Time
 gručenje, 178
 GURS, 207
 hiperspektralni skener, 50, 207
 histogram, 141, 207
 - Gaussov razteg, 146–149
 - linearni razteg, 142–143
 - minimum, 130
 - psevdoobarvna transformacija, 151–152
 - razrez na nivoje, 150–151
 - ujemanje, 125
 - uravnoveženje, 143–146
 hitrost svetlobe, 207
 HSI, *glej* barvni prostor HSI
 ICA, 207
 IDL, 207
 IFOV, *glej* trenutno vidno polje
 IKONOS, 96–98
 inercialni navigacijski sistem, 76, 207
 informacija, 207
 informacijski razredi, 178
 infrardeča svetloba, 24, 207
 - bližnja, 201
 - daljnja, 202
 - srednja, 222
 - termična, 224
 infrardeči barvni film, 207
 infrardeči pankromatski film, 56, 207
 inklinacija, 207
 INS, *glej* inercialni navigacijski sistem
 InSAR, 208
 integracija podatkov, 185–188
 intenziteta, 208
 interakcija
 - mikrovalov s površjem, 68–71
 - s površjem, 13, 31–34
 - z atmosfero, 25–30
 - z vegetacijo, 33
 - z vodo, 33
 interaktivna obdelava, 208
 interferogram, 208
 interferometrija, 104, 208
 - diferencialna, 104
 interpretacija, 208
 - analogna, 114
 - digitalna, 114
 - podob, 14, 113–117
 - vizualna, 119–121, 175
 interpretacijski ključ, 208
 IR, *glej* infrardeča svetloba
 ISODATA, 178
 izboljšanje kontrasta, 137, 208
 izboljšanje podob, 116, 137–160, 208
 izdelovalčeva natančnost, 182
 Japanese Earth Resources Satellite, 208
 jedro, 208
 JERS, *glej* Japanese Earth Resources Satellite
 Jet Propulsion Laboratory, 208
 JPL, *glej* Jet Propulsion Laboratory
 JRC, 208
 K-Means, 178
 kalibracija, 132–135, 208
 kanal, 139, 208
 karta, 209
 kartiranje, 191–192
 kartografija, 209
 Kauth-Thomasova transformacija, 170
 Keplerjevi elementi, 209
 Keplerjevi zakoni, 209
 klasifikacija
 - metoda najmanjše razdalje, 180
 - metoda največje verjetnosti, 180
 - paralelepipedna metoda, 180
 klasifikacija podob, 117, 175–183, 209
 - nadzorovana, 179–181, 212
 - nenadzorovana, 178–179, 213

- ovrednotenje, 181–183
- predmetno usmerjena, 217
- spektralni podpis, 222
- učni vzorec, 225
- koherenca, 209
- koherentni odbojnik, 209
- kompleksno število, 209
- komplementarne barve, 210
- kontekst, 210
- kontrast, 210
 - izboljšanje, 137, 140–149, 208
- kontrolna točka, 127, 214
- konvolucijsko filtriranje, 153–154
- koordinata, 210
- koren povprečne kvadratne napake, 210
- kot gledanja, 210
- kotni odbojnik, 210
- krajevni vpadni kot, 68
- kubična konvolucija, 128
- Landsat, 88–90, 210
- Laplaceov filter, 210
- laser, 210
- lasersko skeniranje, 76
- lažno barvna podoba, 211
- lidar, 73–79, 211
 - delovanje, 73–76
 - diskretni, 74
 - filtriranje, 77
 - obdelava podatkov, 76–79
 - tehnične lastnosti, 75
 - valovni, 74
- linearna regresija, 130
- linearni razteg histograma, 142–143
- linearni razteg z nasičenjem, 143
- ločljivost, 47–54, 211
 - azimutna, 67, 201
 - celica, 48
 - časovna, 53–54, 202
 - nizka, 48
 - prostorska, 47–49, 218
 - radiometrična, 50–52, 218
 - razdaljna, 66, 219
 - spektralna, 49–50, 222
 - visoka, 48
- ločljivostna celica, 48
- lom svetlobe, 29–30, 211
- lomni količnik, 211
- manjkajoče vrstice, 124
- matrika napak, 182
- Mercatorjeva projekcija, 211
- merilo, 211
- mešani piksel, 211
- metapodatki, 211
- Meteosat, 86–87
- Miejevo sipanje, 27, 211
- mikrovalovanje, 211
- mikrovalovi, 23
- množenje podob, 163
- moč laserja, 75
- modeliranje, 79
- MODIS, 211
- MOMS, 211
- mozaik, 131, 212
- mreža neenakih trikotnikov, 212
- mrežni zapis, 212
- MSG, 86
- MSS, *glej* Multispectral Scanner
- Multispectral Scanner, 59, 89, 212
- nadir, 212
- nadzorovana klasifikacija, 179–181, 212
- nagib, 212
- naklon, 212
- naravne nesreče, 195–198
- NASA, *glej* National Aeronautics and Space Administration
- NASDA, 212
- nasičenost, 212
- natančnost, 212
- National Aeronautics and Space Administration, 212
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 84, 212
- navpično pretiravanje, 213
- NDVI, *glej* normiran diferencialni vegetacijski indeks
- nenadzorovana klasifikacija, 178–179, 213
- neselektivno sipanje, 27, 213
- nesistematično popačenje, 213
- neusmerjeni filter, 213
- Newtonovi zakoni, 213
- nihajni čas, 213
- NIMA, 213
- nizka ločljivost, 48
- nizkoprepustni filter, 154–155, 213
- NOAA, *glej* National Oceanic and Atmospheric Administration

- normiran diferencialni vegetacijski indeks,
165, 213
- občutljivost, 213
- obdelava SAR, 67, 213
- obhodna doba, 214
- objektiv, 214
- oblika, 121, 214, 226
- odboj, 32, 214
pravokotni, 69
razpršeni, 32, 69, 219
zrcalni, 32, 69, 227
- odbojnost, 214
- odprava napak v delovanju senzorjev,
123–125
- odstranitev prog, 125
- odštevanje podob, 162
- ogljivkov dioksid, 27
- opazovanje gozdov, 195
- opazovanje naravnih nesreč, 195–198
- optični senzor, 55–63
- orbita, *glej* tirnica
- ortofoto, 214
- oslonilna točka, 214
- osnovne barve, 214
aditivne, 199
komplementarne, 210
subtraktivne, 223
- osončenje, 214
- ovrednotenje klasifikacije, 181–183
- ozon, 27
- ozračje, *glej* atmosfera
- PAF, 214
- paketna obdelava, 214
- pankromatski, 214
- pankromatski film, 55, 214
- paralaksa, 215
- pas C, 215
- pasivni senzor, 44, 215
- PCA, *glej* analiza osnovnih komponent
- perigej, 215
- permanentni sipalci, 104
- piksel, 48, 70, 215
mešani, 211
- Plankov zakon, 215
- platforma, 37–39, 47, 215
- podatek, 215
- podatki
integracija, 185–188
- načini prenosa, 111
- prenos in sprejem, 14, 111–112
- sprejemna postaja, 112
- podatkovna fuzija, 172
- podoba, 215
interpretacija, 14, 113–117
izboljšanje, 116, 137–160, 208
klasifikacija, 117, 175–183, 209
lažno barvna, 211
odboja, 215
predobdelava, 14, 116, 123–135, 217
radiance, 215
razlik, 216
razmerij, 216
sprememb, 216
transformacije, 116, 161–172, 224
- podoba odboja, 215
- podoba radiance, 215
- podoba razlik, 162, 216
- podoba razmerij, 164, 216
- podobe sprememb, 216
- pokrovnost, 193, 216
- polarizacija, 65, 216
- polarna tirnica, 40, 216
- polsfera, 216
- pometajoči skener, *glej* vzdolžni skener
- popačenje, 216
nesistematično, 213
sistematično, 221
- popravki
atmosferski, 129–131
geometrijski, 116, 125–129
manjkajočih vrstic, 124
napak v delovanju senzorjev, 123–125
odstranitev prog, 125
osvetlitve in vpliva terena, 131–132
radiometrični, 116
- posnetek, 216
- posodabljanje kart, 191–192
- poševna fotografija, 216
- poševna razdalja, 216
- pot leta, 58
- poudarjanje robov, 216
- povezava, 121, 217
- povprečenje, 154
- povratno sipanje, 217
- precesija, 217

- prečna Mercatorjeva projekcija, 217
- prečni skener, 59–60, 217
- predmetno usmerjena klasifikacija, 217
- predobdelava podob, 14, 116, 123–135, 217
- prekrivanje, 217
 - v prečni smeri, 217
 - v smeri leta, 217
- premer laserskega žarka, 75
- prenos in sprejem podatkov, 14, 111–112
- prepoznavanje razredov, 179
- pretvorba radiance v odbojnost, 130
- prevodnost, 70
- prevračanje, 217
- prevzorčenje, 128–129, 217
 - bilinearno, 128
 - kubična konvolucija, 128
 - metoda najbližjega sosedu, 128
- PRF, *glej* frekvenca ponavljanja pulza
- približevanje, 217
- prodiranje, 218
- programska orodja, 116
- projekcija
 - Mercatorjeva, 211
 - prečna Mercatorjeva, 217
- projekcijski center, 218
- prostorninsko sipanje, 218
- prostorska ločljivost, 218
- prostorsko filtriranje, 137
- psevdoobarvna transformacija, 151–152
- psevdoobarvni prikaz, 150–152
- pulz, 218
- QuickBird, 98
- raba tal, 193, 218
- radar, 65–71, 218
 - bočnega pogleda, 65–68, 218
 - pas C, 215
 - umetno odprtinski, 67–68, 225
- radar bočnega pogleda, 218
- RADARSAT, 107–108, 218
- radarski sateliti, 101–108
- radarsko daljinsko zaznavanje, 65–71
- radianca, 133, 218
- radijski valovi, 23
- radiometrična ločljivost, 218
- radiometrični popravki, 116
- raketoplan, 218
- raster, 219
- Rayleighovo sipanje, 26, 219
- razdalja, 219
- razdalja na površju, 219
- razdaljemer, 74
- razdaljna ločljivost, 66, 219
- razgibanost površja, 69, 219
- razmerje med bazo in višino leta, 219
- razmerje signal šum, 219
- razpršeni odboj, 219
- razpršeni odboj, 32, 69
- razredi
 - informacijski, 178
 - spektralni, 178
- razrez na nivoje, 150–151, 219
- razvijanje faze, 219
- redundanca, 219
- referenčni elipsoid, 220
- registracija, 125–129, 220
- reliefno popačenje, 220
- rentgenski žarki, 24
- RGB, *glej* barvni prostor RGB
- RMSE, 220
- rob, 220
 - poudarjanje, 158–160, 216
- Robertsov filter, 159
- rotacijski elipsoid, 220
- SAR, *glej* umetno odprtinski radar
- satelit, 220
 - radarski, 101–108
 - vremenski, 81–87
 - za opazovanje kopnega, 87–98
 - za opazovanje morja, 99–101
- satelitski manevri, 42
- satelitski navigacijski sistem, 76, 220
- satelitski sistemi, 81–108
- Satellite Pour l’Observation de la Terre, 92–95
- scena, 220
- SeaWiFS, 100–101
- segmentacija, 220
- senca, 121, 220
- senzor, 44, 220
 - aktivni, 44, 200
 - optični, 55–63
 - pasivni, 44
 - talni, 38
 - termični, 62

- ul>
- seštevanje podob, 162
- SEVIRI, 86
- Shuttle Imaging Radar, 221
- Shuttle Radar Topography Mission, 108, 221
- signal, 221
- sipalec, 70, 221
- sipanje, 25–27, 65, 221
 - Mijevo, 27, 211
 - neselektivno, 27, 213
 - povratno, 217
 - prostorninsko, 218
 - Rayleighovo, 26, 219
- SIR, *glej* Shuttle Imaging Radar
- sistem globalnega pozicioniranja, 221
- sistematično popačenje, 221
- skener, 59, 221
 - hiperspektralni, 207
 - pometajoči, 216
 - prečni, 59–60, 217
 - večspektralni, 58, 59, 62, 225
 - vzdolžni, 60–61, 226
- skeniranje
 - lasersko, 76
- SLAR, 221
- sled, 221
- SLR, *glej* radar bočnega pogleda
- smerni filter, 221
- snemalni pas, 41, 222
- SNR, *glej* razmerje signal šum
- Sobelov filter, 159
- Sonce, 222
- sončno sinhrona tirnica, 40, 222
- spekter, 222
- spektralna ločljivost, 222
- spektralni odziv, 49, 175
- spektralni pas, 139, 222
- spektralni podpis, 34, 49, 175, 222
- spektralni prostor, 177, 222
- spektralni razredi, 178
- spektralno prepoznavanje vzorcev, 175
- SPOT, *glej* Systeme Pour l’Observation de la Terre, 223
- sprejemna postaja, 112, 222
- spuščajoča tirnica, 41, 222
- srednja infrardeča svetloba, 222
- SRTM, *glej* Shuttle Radar Topography Mission
- Stefan-Boltzmannov zakon, 223
- stereo model, 223
- stereopar, 223
- stereoskop, 223
- stransko gledanje, 93
- subtraktivne osnovne barve, 223
- svetloba, 23, 223
- svetlost, 223
- Systeme Pour l’Observation de la Terre, 223
- šum, 223
- Tagged Image File Format, 223
- tandemsko snemanje, 101, 223
- tekstura, 121, 137, 223
- telemetrija, 224
- temperatura, 224
 - absolutna, 199
- termična infrardeča svetloba, 224
- termični senzor, 62
- termično snemanje, 62–63
- termogram, 62
- Thematic Mapper, 89, 224
- TIFF, 224
- TIN, *glej* mreža neenakih trikotnikov
- tirna ravnina, 224
- tirnica, 39–44, 224
 - dvigajoča, 41, 204
 - geostacionarna, 39, 206
 - perioda, 42
 - polarna, 40, 216
 - ravnina, 224
 - skoraj polarna, 40, 221
 - sončno sinhrona, 40, 222
 - spuščajoča, 41, 222
 - zniževanje, 227
- TIROS, 81, 224
- TM, 224, *glej* Thematic Mapper
- točnost, 224
- ton, 119, 224
- topografska normalizacija, 132, 224
- transformacija
 - aritmetične operacije, 162–164
 - Fourierjeva, 161
 - HSI, 171–172
 - Kauth-Thomasova, 170
 - valčna, 161
- transformacije podob, 116, 161–172, 224
- transmisija, 32

- trenutno vidno polje, 47, 225
- učni vzorec, 179, 225
- učno območje, *glej* učni vzorec
- ujemanje histograma, 125
- ultravijolična svetloba, 24, 225
- umetno odprinski radar, 67, 225
- uporaba daljinskega zaznavanja, 14, 189–198
- uporabnikova natančnost, 182
- uravnoteženje histograma, 143–146
- USGS, 225
- UTC, *glej* Coordinated Universal Time
- UV, *glej* ultravijolična svetloba
- valčna transformacija, 161
- valovanje, 225
 - pot skozi atmosfero, 13
- valovna dolžina, 65, 225
 - laserja, 75
- valovni lidar, 74
- valovno število, 225
- varianca, 225
- veččasovna integracija, 186
- večkanalna kamera, 225
- večločljivostna integracija, 186
- večsenzorska integracija, 186
- večspektralni skener, 50, 58, 59, 62, 225
- večspektralno skeniranje, 59–61
- vegetacijski indeks, 164–166, 225
 - normiran diferencialni, 165, 213
- vektor, 226
- velikost, 121
- vesoljska postaja, 226
- vezna točka, 226
- vidna svetloba, 24, 226
- vidno polje, 226
- vir elektromagnetnega valovanja, 13
- visoka ločljivost, 48
- visokoprepustni filter, 157–158, 226
- višinomer, 226
- vizualna interpretacija, 119–121, 175
- vlažnost, 170
- vodna para, 28
- vpadni kot, 226
- vpogledna tabela, 144, 226
- vremenski sateliti, 81–87
- vrstični skener, *glej* prečni skener
- vzdolžna smer, 226
- vzdolžni skener, 60–61, 226
- vzorec, 121, 226
- WGS 84, *glej* World Geodetic System 1984
- World Geodetic System 1984, 227
- zasuk, 227
- zaznavanje, 14, 227
- združevanje podob, 172
- zelenost, 170
- Zemlja, 227
- zemljepisna dolžina, *glej* geografska dolžina
- zemljepisna širina, *glej* geografska širina
- zniževanje tirnice, 227
- zrcalni odboj, 32, 69, 227
- zrnatost, 70, 227
- žarki gama, 24

Daljinsko zaznavanje je veda, s katero se srečujemo ves čas svojega življenja. Ko se sprehajamo po mirni naravi ali hitimo po neskončnih cestah, ko zremo v oblake na nebu, mežikamo v močno Sonce, zasanjano opazujemo oddaljene zvezde ali prebiramo debele knjige. Ne da bi se prav zavedali, zaznavamo oddaljene predmete z očmi – »instrumentom«, ki ga nobeno tehnično sredstvo ne more zamenjati. Pa vendar včasih svoj pogled usmerimo tudi onkraj vidnega, vzamemo v roke mikroskop, se zazremo skozi teleskop ali si na računalniškem zaslonu ogledamo satelitske posnetke. Tehnologija zajema podatkov iz letal in satelitov postaja vsakodnevno orodje v najrazličnejših študijah – od arheologije, biologije in ekologije, prek geografije, meteorologije, geologije in gozdarstva do geodezije. Razvoj internetnih tehnologij, predvsem hitrejših spletnih povezav, in dejavnost tehnološko vplivnih podjetij, kot sta, na primer, Google in Microsoft, sta satelitske podobe prinesela na zaslone sodobnih internavtov.



Dr. KRIŠTOF OŠTIR je raziskovalec na Inštitutu za antropološke in prostorske študije ZRC SAZU in predavatelj več dodiplomskih in podiplomskih predmetov na Univerzi v Ljubljani. Ukvarja se z optičnim in radarskim daljinskim zaznavanjem, ki ga uporablja pri opazovanju naravnih nesreč, opazovanju pokrovnosti in zaznavanju sprememb površja, analizi arheoloških najdišč ter modeliranju paleo okolja. Je avtor številnih člankov iz daljinskega zaznavanja, geografskih informacijskih sistemov in računalništva.

<http://zalozba.zrc-sazu.si>



ZALOŽBA
ZRC

ISBN 961-6568-72-8



5.272 SIT / 22 €

9 789616 568722