

3. Adatfeldolgozás

3.1. A felvételek előfeldolgozása

A távérzékelés felvételeinek – mint minden más adatnak – értelmezéséhez feltétlenül szükséges az, hogy tudjuk: mire vonatkozik. Az érzékelők számos különböző forrásból származó sugárzás összesített hatását detektálják. A feladat tehát az, hogy határozzuk meg a helyet, ahonnan a minket érdeklő információ származik, és szűrjük ki a máshonnan hozzákeveredő zajokat. A képalkotó módszereknél ezt egyidejűleg valamennyi képpontra (pixelre) meg kell tenni. Az értelmezés előtti, térbeli elhelyezéssel foglalkozó geometriai eljárások összefoglaló neve **fotogrammetria**, míg a sugárzás tulajdonságaival összefüggő eljárásokat **radiometriai feldolgozás** név alatt foglaljuk össze.

A fény intenzitás-jellegű tulajdonságait nemcsak a sugárzó energia mennyisége, hanem az emberi szem számára érzékelhető, és egyébként egzakt módon mérhető fényesség alapján is le lehet írni, így minden radiometriai mennyiségnek megvan a maga **fotometriai** párja. Itt az alapvető intenzitásparaméter a *fényerősség*, melynek mértékegysége a *kandela* [cd]. Mivel a távérzékelésben alkalmazott érzékelők a besugárzott teljesítményt rögzítik, a továbbiakban többnyire a radiometria fogalmait használjuk.

A légi- és űrfelvételek előfeldolgozásának csoportjai:

1. Radiometriai korrekciók:

- a. **Szenzor-érzékenység korrekciója:** a detektorok érzékenysége a felvétel készítésének ideje alatt változik, illetve ha több detektor vesz részt a képalkotásban, azok eleve nem tökéletesen azonos érzékenységgűek. Így ugyanaz a valóságos reflektancia más intenzitással jelentkezik a kép egyes részein (pl. egy vonalankénti felvételen csíkosságot okoz). Ide tartoznak a lencsehibák (2.2.1. fejezet) korrekciói is.
- b. **A megvilágítás korrekciója:** a felszín görbületéből és a lejtők hajlásszögének és kitettségének különbségeiből fakadóan a napfény beesésének szöge más és más a földfelszín egyes részletein; időben (napszakosan és évszakosan) szintén változik a beesési szög.
- c. **Atmoszferikus korrekció:** a légkör EM-hullámvezető képessége nagy mértékben függ a benne lebegő részecskéktől, azok szóró és reflektáló hatásai helyről helyre eltérőek lehetnek.

A korrekcióhoz meg kell becsülni az egy-egy képelemhez tartozó hatás mértékét. Ez az adat származhat kiegészítő közvetlen mérésből, vagy a felszín egyes részleteinek ismert reflektanciájával való összevetésből, vagy valamilyen elméleti modellből.

2. Geometriai korrekciók:

- a. **A felvételkedészítés körülményeinek korrekciója:** a szállítóeszköz (repülőgép, műhold) pálya menti mozgása nem tökéletesen egyenletes; ugyanígy a képalkotó egység részeinek (pl. lengő tükrök) mozgása sem. Korrigálni kell továbbá a földfelszín görbületéből és elfordulásából származó hibákat.
- b. **A leképezés korrekciója:** ha fotópapíron dolgozunk, a papír maga változtathatja méretét (megnyúlhat vagy összehúzódhat) az előhívási eljárás során vagy később. Digitális rögzítés és feldolgozás esetén ez a hibaforrás nem létezik.
- c. **Vetületi korrekciók:** a kép eredeti centrális perspektivikus vetületének megváltoztatása célszerű és szükséges lehet, leginkább térképi vetületekhez való igazítással.

Több átfedő felvétel egyesítése, illetve együttes kiértékelése esetén mindezt úgy kell végrehajtani, hogy valamennyi kép egységes vetületi és radiometriai bázisra legyen hozva.

3.2. Fotogrammetria

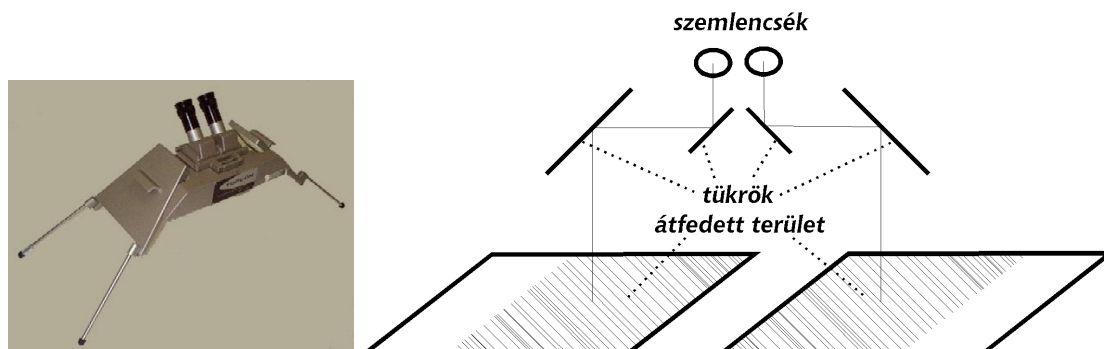
3.2.1. Sztereoszkópia

Bár szemeink képalkotása optikailag a kamerákéhoz teljesen hasonló, látásunk mégis térbeli. Ez annak köszönhető, hogy két szemünk van, amelyek optikai tengelyei egymástól bizonyos távolságra helyezkednek el. Amikor ránézünk egy pontra, a két tengelynek abban a pontban kereszteznie kell egymást, vagyis minél közelebb van a szóban forgó pont, annál erősebben kell kancsalítani. Agyunk ennek mértékéből képes távolságot becsülni. Minthogy azonban a szemeink közötti távolság alig néhány centiméter, az optikai tengelyek által bezárt szög már néhány dekaméternyi távolság esetén is olyan kicsiny lesz, hogy ez a becslés nem működik igazán jól.

Ezt a *binokuláris* (kétszemű) látást a fényképezéssel is tudjuk utánozni, ha ugyanarról a tárgyról felvételt készítünk két különböző pontból, és az egyik szemünkkel csak az egyik, a másik szemünkkel pedig csak a másik képet nézzük. A felvételkészítéskor lehetőségünk van arra, hogy a két kamerát tetszőlegesen távolra helyezzük, így a látószögműködés megváltozik, tehát a térhatást fokozzuk. Amikor a képpárt szemléljük, akkor természetesen úgy érzékeljük mindezt, hogy a tárgyat a szemeink és a kamerák gyújtópontjainak távolságai arányában kicsinyítve és közelítve látjuk magunk előtt, mint egy távcsőben, de a távcsővel szemben a szemünk mozdításával – egyik pontról a másikra vándorló pillantással – a térhatás is érzékelhető, úgyhogy a látvány inkább egy terepasztaléhoz hasonlítható.

A képpár egyetlen képként látása természetesen némi gyakorlatot igénylő, és a szemet igénybe vevő művelet, és csak akkor működik jól, ha a két kép tónusa és rajtuk a tárgyak mérete nem nagyon különbözik. Elérhető úgy is, hogy a képpárt magunk elé helyezve (pl. az asztalra fektetve) egy élével az ornyergünk elé, a képek közé tartott, semleges színű (leginkább fehér) lappal választjuk el a két szemünk látóterét, de könnyebb, ha **sztereoszkópot** használunk. Ez egy két szemlencsével felszerelt, lábaival a képek fölé állítható műszer, ahol a két lencse látótereibe helyezhetjük a képpár megfelelő darabjait. A lencsék rendszerint kétszeres (olykor változtatható) nagyításúak, és távolságuk az egyéni szemtávolságnak megfelelőre állítható.

Ha mérőképeket, vagy más nagy formátumú felvételpárt akarunk szemlélni, jobb, ha *tükrös sztereoszkópot* használunk az egyszerű lencses helyett. Itt a szemlencsék alatt ferdén elhelyezett tükrökpárok húzzák össze a két lencsére jutó sugarak menetét, így a képek viszonylag nagy felülete szemlélhető egyidejűleg (25. ábra).



25. ábra: Tükrös sztereoszkóp és sugármenete



26. ábra: Anaglif kép a kaliforniai Pleasant Hill városka fölötti dombokról, egymástól 30 m-re készített fényképekből, azonos magasságból – és a sztereoszkopikus látáshoz szükséges színszűrős szemüveg



Egy másfajta segítség a szemünknek, ha a képpár képeit monokromatikussá konvertáljuk, de más (leginkább vörös és kékeszöld, vagy vörös és zöld) színben, és egyetlen képfelületre vetítjük (26. ábra). Ezt **anaglif eljárásnak**⁴⁶ nevezik. Ha ezt olyan szemüvegen át nézzük, amely a két képnek megfelelő színszűrőket rak a szemünk elé, egyetlen, sztereoszkopikus hatású képet fogunk látni. Legjobb komplementer színeket alkalmazni, amelyeket a látásunk együtt valamilyen szürkeárnyalatként képes értékelni. A színszűrős szemüveg a sztereoszkópnál jóval egyszerűbb és olcsóbb eszköz.

Mozgóképeknél a térhatást leginkább *polárszűrőkkel* lehet biztosítani; ilyenkor a szemüveg egyik oldala vízszintes, a másik pedig függőleges, vagy jobbkézes cirkuláris, illetve balkezes cirkuláris polarizációjú szűrővel van ellátva, és a képernyőn – nagy frekvenciás változással – hol az egyik, hol a másik kamera által felvett kép jelenik meg a megfelelő polarizációval. Ehhez olyan digitális kivetítő szükséges, amely két grafikus kártyáról tud dolgozni gyors váltásokkal.

A sztereoszkopikus látás némi szoktatással elérhető, kivéve azoknál, akiknek valamilyen okból erős a *szemdominanciájuk*, pl. egyik szemükre rövidlátók. Ezek az emberek csak a pár egyik képét látják, és nincs részük a térhatásban, de ettől még lehetnek jó fotointerpretátorok.

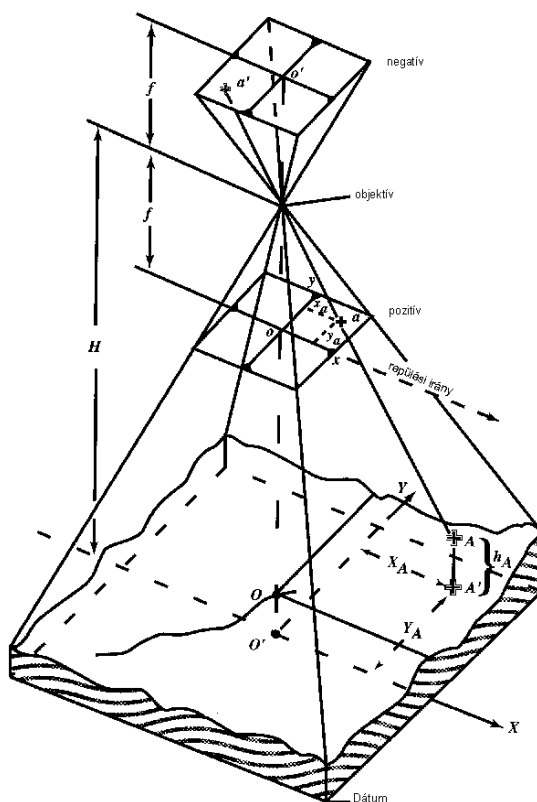
3.2.2. Koordináta-meghatározás a felvételen

A fényképen egy pont pozícióját **képi koordinátarendszer** bevezetésével adhatjuk meg. Szokás szerint ennek origója a kép *optikai főtárgyja*, azaz ahol a vetítés optikai tengelye metszi a képsíkot: a függőleges tengelyű légi- vagy űrfelvételen a *nadírpon*t, amely pontosan felülnézetből látszik. Mérőképen ez a négy sarokbeli keretjel között húzott átlók metszéspontjaként határozható meg.

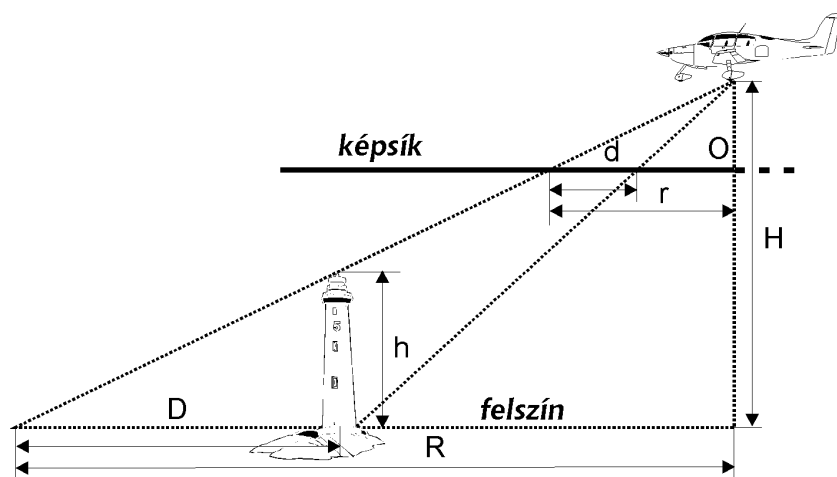
Ha a kép egy vízszintes, sík felületről készült, akkor az azon mért távolságok a kép méretarányának megfelelően számíthatóak át valós távolságokká. Ez a méretarány (**M**) a kameraállandó (vagyis a gyújtótávolság) (**f**) és a felvételkészítés magasságának (továbbiakban *repülési magasság*, **H**) a hányadosa, **M = f / H**. A valóságos felszín azonban sohasem tökéletesen sík; a magasabban fekvő területek közelebb vannak, mint az alacsonyabbak (itt **H** értéke kisebb), tehát a méretarányuk nagyobb lesz; a felvétel sem tökéletesen függőleges tengelyű. További probléma, hogy a főtárgytól távolodva a tereptárgyak egyre inkább ferde nézőszögből, és nem felülnézetből látszanak, tehát a képsíkban függőleges kiterjedésük rövidült vetülete is megjelenik. Ennek megfelelően a képen két pont között mért távolság csak akkor számítható át valóságos távolsággá, ha a pontok magassági koordinátáit is ismerjük.

⁴⁶ Az *anaglif* szó jelentése kb. „mély véset”; a kép domborműszerű hatására utal. A technika a XIX. századból való, csaknem egyidős a fényképezéssel.

A h_A magasság ismeretében a *képi* (x_a, y_a) koordináta könnyen egy vízszintes alapsíkra vonatkoztatott **földi** (X_A, Y_A) **koordinátává**⁴⁷ transzformálható (27. ábra): $X_A = x_A / M_A$ és $Y_A = y_A / M_A$, ahol $M_A = f / (H - h_A)$ az A pontban érvényes méretarány, $H - h_A$ pedig az A pontra vonatkozó repülési magasság. Minél nagyobb h_A abszolút értéke, annál nagyobb M_A eltérése M -től, így a koordináták változása is jelentősebbé válik a síkbeli elrendeződés alap- esetéhez képest; ezt **relief-áthelyeződésnek** szokták nevezni. Ugyanez x_A és y_A négyzetössze- gére is igaz: minél távolabb vagyunk az optikai főponttól, a relief-áthelyeződés annál na- gyobb. A h_A érték negatív is lehet: ekkor a relief-áthelyeződés az optikai főpont irányába kö- vetkezik be, egyébként attól távolabbra.



27. ábra: A képi koordinátarendszer paraméterei és áttérés földi koordinátákra

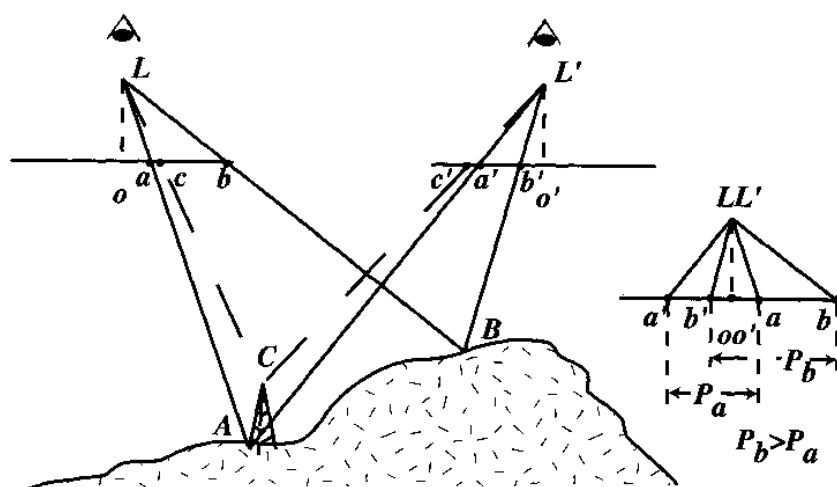


28. ábra: Függőleges tereptárgy magasságának meghatározása

⁴⁷ A földi (X, Y) koordináta egy olyan derékszögű koordinátarendszer paramétere, amelynek origója a nadírpont; nem azonos a geodéziai koordinátával! A transzformáció ferde tengelyű képről is lehetséges, de a számítás bo- nyolultabb.

Egy függőleges tereptárgy magassága (h) is meghatározható, ha a talppontjának magassági koordinátája, így a hozzá tartozó repülési magassági érték (H) ismert (28. ábra). A képen a torony d hosszúságúnak látszik, és talpa a kép optikai főpontja (O) felé mutat; csúcsa a főponttól r távolságra van; ugyanezek a távolságok a torony talpának megfelelő magasságú felszínre vetítve D -nek és R -nek felelnek meg. Az ábrázolt háromszögek hasonlósága alapján belátható, hogy $D / h = R / H$, és $d / r = D / R$. Ebből következik, hogy $d / h = r / H$, azaz $h = d \cdot H / r$.⁴⁸

Valamennyi ponthoz meghatározható a repülési magasság a **parallaxis** révén, ha képpárt használunk, és ismerjük a két kép elkészítési helye közötti távolságot. A függőleges tengelyű légi- és űrfelvételek esetében ez az $\rightarrow$ *epipoláris geometria* egy speciális esete, amikor a képsíkok egybeesnek. Az egyik kép optikai főpontjának vetülete a másik képen az epipólus; a főpontot az epipólussal összekötő vonal az epipoláris vonal, ami ilyenkor szintén egybeesik, és **bázisvonalnak** nevezzük. Célszerűen a képi koordinátarendszert úgy kell megválasztanunk, hogy az x tengely a bázisvonal irányába mutasson, vagyis a légifotónál a repülési irányral párhuzamos legyen. A parallaxis ekkor a pontok x koordinátái közötti eltérést jelenti a két különböző nézőpontú képen⁴⁹, míg az y koordináták értéke – ha M nem változott – azonos kell, hogy legyen. Ezt mutatja a 29. ábra, amely az x tengely mentén készült metszet. Az L nézőpontból készült felvételen az A és B pontok képe a és b helyen látszik, az L' nézőpontból készültön pedig a' és b' helyen. Koordinátáik (x_a, y_a) , (x_b, y_b) , $(x_{a'}, y_{a'})$ és $(x_{b'}, y_{b'})$, ahol az y értékek a parallaxis szempontjából közömbösek. A parallaxis értéke $p_a = x_a - x_{a'}$ és $p_b = x_b - x_{b'}$. A két optikai tengely egymásra illesztésével (29. ábra jobb oldala) az is jól látható, hogy a magasabb helyzetű b pont parallaxisa nagyobb a mélyebben fekvő a ponténál.



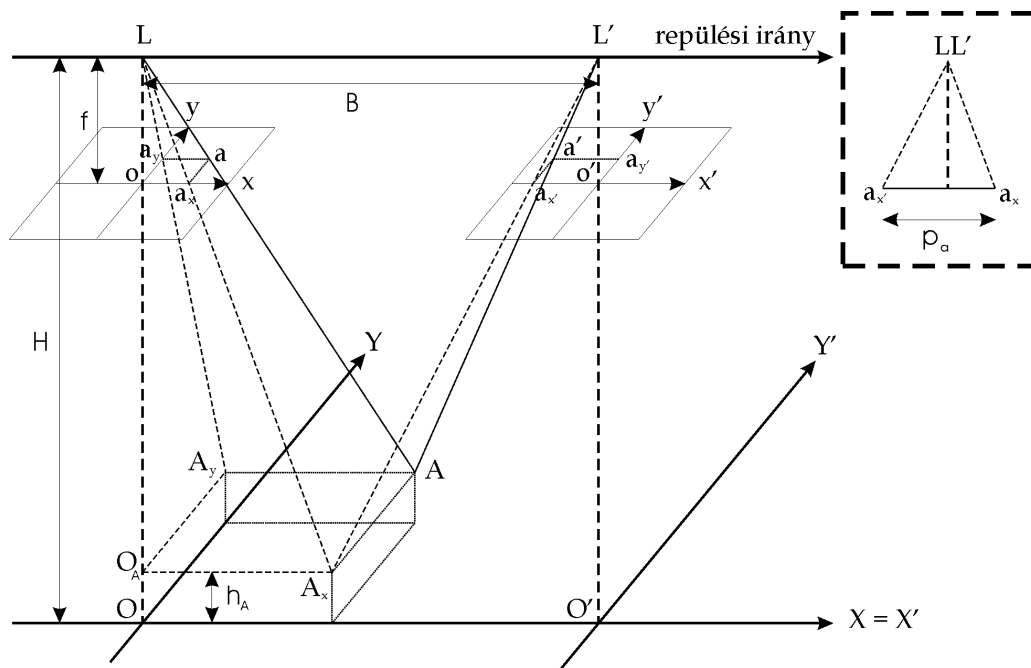
29. ábra: Parallaxis a képpáron

Az a és b pontokra érvényes repülési magasság kiszámításához ismerni kell még L és L' pontok távolságát, amit *légi bázisvonalnak* (B) szokás nevezni. Ennek felhasználásával $H_a = B \cdot f / p_a$ és $H_b = B \cdot f / p_b$ (f a gyújtótávolság). Innen a földi koordináták is kiszámíthatók: $X_a = B \cdot x_a / p_a$ és $Y_a = B \cdot y_a / p_a$, és ugyanez b -re is hasonló. Ezeket *parallaxis-egyenleteknek* hívják. Ha a H repülési magasság tengerszint feletti magasságértékként van megadva, akkor a magassági koordináták is közvetlenül kiszámíthatóak: $Z_a = H - H_a$.

⁴⁸ Az állítás megfordítva is igaz: egy ismert magasságú tereptárgy képe alapján meghatározható a repülési magasság.

⁴⁹ A csillagászatban szögkoordinátákkal dolgoznak, ennek megfelelően ott a parallaxis értéke is ívmásodpercben vagy radiánban van megadva.

A parallaxisegyenletek a 30. ábra alapján vezethetők le. Figyeljük meg, hogy az $LL'A_x$ háromszög és a jobb oldali kis bekerített rajz $(LL')a_xa_x'$ háromszöge, ahol egymás mellé toltuk az $L'a_x'o'$ és az La_xo háromszögeket, hasonlóak, hiszen a vízszintes oldalakon lévő szögek megegyeznek. A vízszintes oldalak hossza B és p_a , míg a háromszögek magassága $H-h_A$ és f . A hasonlóság miatt ezek arányainak azonosnak kell lennie: $B / (H - h_A) = p_a / f$. Innen $H - h_A = B \cdot f / p_a$. Az $LO_A A_x$ és $Lo_a x$ háromszögek szintén hasonlóak; ebből az $X_A / (H - h_A) = x_a / f$ aránypár adódik. Ide behelyettesítve a $H - h_A$ előző kifejezését és X_A -t kifejezve azt kapjuk, hogy $X_A = (x_a / f) \cdot (B \cdot f / p_a) = x_a \cdot B / p_a$. Az $LO_A A_y$ és $Lo_a y$ háromszögekből ezzel analóg arány adódik: $Y_A / (H - h_A) = y_a / f$, ahol a $H - h_A$ ugyanúgy behelyettesíthető, vagyis $Y_A = (y_a / f) \cdot (B \cdot f / p_a) = y_a \cdot B / p_a$.



30. ábra: A parallaxisegyenletek levezetéséhez felhasznált geometriai elemek

Az egyes pontokban kiszámított magasságértékek alapján lehet a felvételekből **digitális magasságmodelleket** (Digital Elevation Model vagy Digital Terrain Model) készíteni. A magasságmodell egy négyzetrács vagy egyenlő oldalú háromszögekből álló rács az (X, Y) síkon, amelynek minden rácspontjához egy adott magasságérték (Z) van hozzárendelve. Nem szükséges, hogy ehhez minden rácspont helyét azonosítsuk a képeken, ahol a relief-áthelyeződés miatt természetesen nem szabályos hálózatot alkotnak; a Z értékeket kiszámíthatjuk a rácsponthoz közeli, azonosított pontok Z értékeinek valamilyen átlagaként is. Ha a már adott felbontású DEM birtokában kell meghatároznunk egy pont magasságát, azt ehhez hasonlóan a közeli rácspontok közötti interpolációval tehetjük meg.

3.2.3. Ortofotó készítése

Ha a centrális perspektívájú fényképet ortogonális síkvetületbe transzformáljuk – azaz egy nézőpont helyett a kép minden pontját más-más nézőpontból, de mindig egymással párhuzamos nézőirányokból mutató képet készítünk –, akkor **ortofotót** állítottunk elő. Ha a felülnézeti (függőleges nézőirányú) kép mérete olyan, hogy a földfelszín görbülete elhanyagolható, vagy a vetítési eljárásban ezt a görbületet is figyelembe vettük, akkor ez gyakorlatilag egy térképnek felel meg, és a képi koordinátarendszerről a képen azonosítható, ismert helyzetű **földi referenciapontok** segítségével áttérhetünk egy geodéziai vagy földrajzi koordinátarendszer alkalmazására. Egy vagy több képnek adott (közös) képsíkra való vetítését, ami ilyenkor a koordinátarendszerhez tartozó térképi vetületnek felel meg, **rektifikálásnak** szokás nevezni. Digitális képekhez a képfájl részeként vagy kiegészítő fájlban (.tif-hez .tfw, .jpg-hez .jgw kiterjesztéssel) lehet megadni a projekció alapadatait, amit **georeferálásnak** hívunk. Az

ortofotó így egy digitális magasságmodellhez illeszthető, és valódi 3D-s kép állítható elő belőle.

Hagyományos filmek esetén optikai kiértékelő műszereket, sztereoszkóppal felszerelt vagy anaglif képpár kivételével dolgozó *sztereoplottert* lehet alkalmazni; a számítástechnika 1980-as évekbeli elterjedése előtt jellemzően ezeket használták. A kivetítők helyzetét, a vetítés irányát és a fókusz távolságát egy referenciapontokat mutató alaptérkép segítségével be lehet állítani úgy, hogy az a felvételkészítés helyzetének feleljen meg (megfelelő méretarányban kicsinyítve). A műszer lelke egy „lebegő jel”: egy olyan jelpár a két képen, amelynek egyik tagját vízszintesen, vagy függőlegesen mozgatva a műszer kezelője a megfelelő parallaxis beállításával ráilleszthet a kép ábrázolt felszínére. A plotterek térképek rajzolására alkalmasak: egy gyakorlott kezelő képes lehet a lebe-



31. ábra: Az 1964-ben épített T-64 ortofotoszkóp

gő jelet azonos magasságban tartva végigvinni a felszínen, miközben a hozzá kapcsolt toll egy szintvonalat rajzol a térképre. A plotterek továbbfejlesztésével konstruálták meg az *ortofotoszkópot*. Az ortofotoszkóp lebegő jele egy rés egy filmnegatív előtt, amelyen keresztül az egész felvételt újraexponálják. A kezelő személy ezzel a résszel végigszkenneli a képet oly módon, hogy a parallaxist a rés magasságának változtatásával szabályozza, így a relief-eltolódás eltűnik.

Jelenleg a feldolgozás már teljesen számítógépes alapú. Digitális felvételek esetén a képpár valamennyi pixelére ki kell számítani a földi koordinátákat, és annak megfelelően kell elhelyezni azokat a képsíkon, az átfedéseket átlagolással elsimítva, a hiányokat interpolációval kitöltve. Ezt általában polinomiális vagy véges elemes eljárással végzik. A problémát az összetartozó pontok megkeresése jelenti a képpáron, ami általában radiometriai tulajdonságaik alapján lehetséges (3.3. fejezet). Ezek a pontok az egymáshoz képest helyesen tájékozott képeken mindig a bázisvonal iránya mentén helyezkednek el.

Földi referenciapontok és digitális magasságmodell birtokában egyetlen képből is lehet ortogonális vetítéssel ortofotót készíteni. Ekkor azonban nincs lehetőség a fotón a különböző magasságú tereptárgyak által kitakart, de felülnézetből látható területről információt nyerni, a kép tehát óhatatlanul hiányos marad.

3.3. Radiometriai feldolgozás

3.3.1. Radiometriai adatok a képeken

A radiometriai adatok hordozzák azt az információt, amit a távérzékelés útján nyerni igyekszünk. Úgy tekinthetjük ezeket, mint egy *mintát* abból a *sokaságból*, amelyről megállapításokat szeretnénk tenni. Minta, sokaság: ezek a $\rightarrow$ *statisztika* fogalmai, és a feldolgozás során a statisztika eljárásai és az adathalmaz statisztikai paraméterei kapnak szerepet.

A képek radiometriai feldolgozása mindig digitalizált formában történik, számítástechnikai úton. Erre számos, a digitális fényképezés és az internet elterjedése óta széles körben használt program képes valamilyen szinten, és a gépek teljesítményének növekedésével már az egyébként nagyon számításigényes eljárások is aránylag gyorsan végrehajthatóak. A hagyományos fotókat a feldolgozás érdekében újra kell szkennelni. A szkennер CCD-i által biztosított pixelméret jóval meghaladja az ezüstatomok méretét, ezért a művelet a felbontás romlásával jár; e hatás nagyítással csökkenthető.

A szenzoroknak nemcsak a hullámhossz, hanem az intenzitás függvényében is megvan a maguk érzékenységi tartománya, amit a gyártó (vagy üzemeltető) az érzékelhető *sugársűrű-*

ség⁵⁰ (L , mértékegysége $W / m^2 \cdot sr$) alsó és felső határával ad meg (L_{min} , L_{max}). A multispektrális szkennereken ez csatornánként más és más lehet. Az érzékelő-berendezés által rögzített **digitális szám** [Digital Number] e határokon belül arányos a mért sugársűrűséggel. Ha a számot egy byte-on ábrázoljuk, és az arányosság egyenes, akkor ez az $L = L_{min} + DN \cdot (L_{max} - L_{min}) / 256$ képlettel számítható át sugársűrűség-értékre. A digitális szám tehát a beeső sugárzás mennyiségével arányos, így, bár dimenzió nélküli, maga is intenzitás-jellegű mennyiségként fogható fel. Csak egész szám lehet, tehát az $(L_{max} - L_{min}) / 256$ értéknél kisebb különbségek azonos értéként tárolódnak el.

A három csatornából összeállított színes, raszteres digitális felvétel pixeleinek rögzítése általában 3 byte-on történik; ez $2^{24} = 16777216$ szín megkülönböztetésére elegendő. Ez körülbelül megfelel az emberi színlátás árnyalatfelbontó képességének, ezért *színhű* [true color] ábrázolásnak szokás nevezni. Háromféle kódolási rendszer is használatos. Az RGB vörös-zöld-kék csatornákból additív, a CMY ezek komplementereiből, zöldeskék-lila-sárga csatornákból szubtraktív színkeveréssel valósítja meg a szín összetételét; utóbbi esetben DN nagyobb értékei kisebb intenzitást jelentenek. Az IHS vagy HSI egy kicsit más rendszer szerint kódol: az árnyalat (*hue*) a színkörön való helyet, a telítettség (*saturation*) a minden alapszín egyenlő arányban tartalmazó szürkéhez képesti eltérést, a fényesség (*intensity*) pedig a világosságot, a fekete és a fehér közötti helyzetet adja meg. A kódrendszerek egyszerűen konvertálhatóak. A távérzékelési műholdak szkennervelvételeihez az RGB a megfelelő, hiszen összegzendő csatornákon készülnek; ugyanígy a képernyők is ezt használják. A CMY a festékekkel dolgozó nyomtatók jellemző modellje. Az IHS leginkább a képfeldolgozási műveletek során kap szerepet.

A képernyők és nyomtatók által az ember számára megjelenített kép nem azonos a DN-ek által kódolt sugársűrűségű sugárzással; pl. a megjeleníthető színmélység sok esetben elmarad a színhűségtől. Minden kimeneti eszközhöz tartozik egy (bizonyos korlátok között változtatható) kódtábla, a **LUT** [Look-Up Table], amely meghatározza, hogy adott DN-értékek milyen kimenő jelnek feleljenek meg. Ez voltaképpen már olyan képtranszformációs műveleteket jelent, amelyekről a továbbiakban szó lesz.

3.3.2. Képhelyreállítás és képjavítás

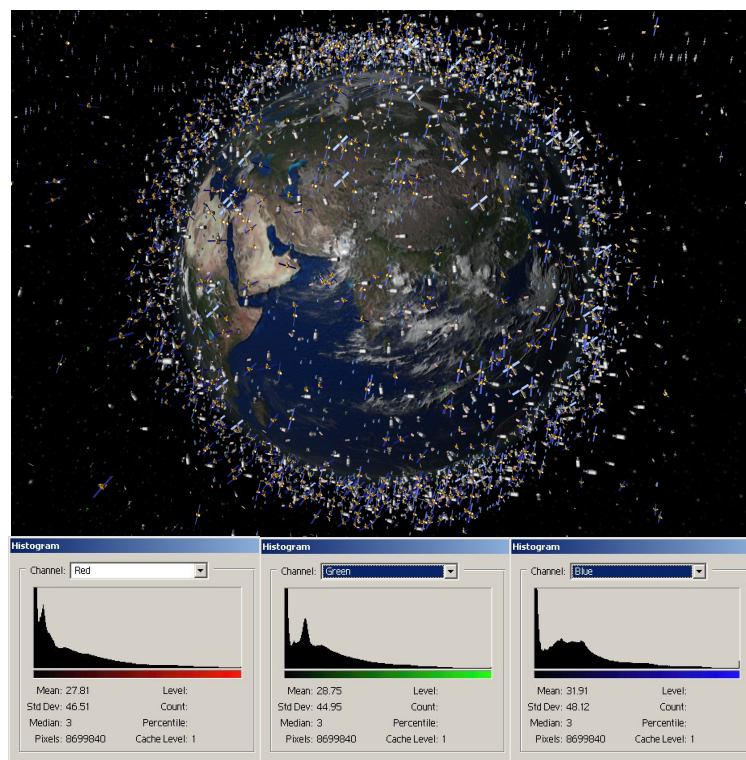
A radiometriai feldolgozás két cél elérésére törekedhet. A **képhelyreállítás** [restoration] a zavaró hatásoktól való mentesítés, egy ideálisnak tekintett látási és megvilágítási viszonyoknak megfelelő kép előállítása. A **képjavítás** [enhancement] az értelmezés számára való előkészítést szolgálja, gyakran az eredeti információtartalom csökkentése árán. A különféle eljárások mindkét célra felhasználhatóak, bár nem egyforma mértékben.

A digitalizált kép matematikailag egy helykoordinátákhoz rendelt vektorhalmaz, amely a pixelek középpontjainak megfelelő koordinátákban vesz fel diszkrét értékeket. A vektorok elemei az egyes csatornákhöz tartozó DN-értékek. A feldolgozás egy ezekre az értékekre alkalmazott függvénnyel végzett műveletsort jelenti. Ezt olyan esetben, amikor bizonyos tulajdonságok kiemelése a cél, **szűrés** névvel illetik, mivel a hatás hasonló az optikai szűrők hullámhosszfüggő áteresztőképessége által produkálthoz. A szűrések gyakran *konvolúció*sak: nemcsak az adott pixel értékét, hanem annak környezetét (legegyszerűbb esetben a közvetlenül szomszédos pixeleket) is figyelembe vevő operátorfüggvények, amelyeket mátrixokkal lehet leírni. A szűrés többlépcsős is lehet, vagyis a függvények kombinálhatóak egymással.

A változó erősségű megvilágítás azt eredményezi, hogy ugyanolyan reflektancia-különbség a kevésbé erősen megvilágított helyek között kisebb DN-különbségben nyilvánul meg, mint a jól megvilágítottakon, vagyis a kép nem elég **kontrasztos**. A kontraszt adott

⁵⁰ A sugársűrűség az adott térszögben (irányban), egységnyi felületen egységnyi idő alatt átáramló energia; a sugárerősség (intenzitás) egységnyi felületre eső része.

szintre való beállítása a DN-ek statisztikai eloszlásának megváltoztatásával érhető el; lényegében a sűrűségfüggvényt kell transzformálni úgy, hogy a pixelek DN-jei ne egy gyakori érték körül koncentrálódjanak. Mivel ez a függvény nem folytonos (csak a diszkrét pixelekben vesz fel értékeket), grafikus megjelenítése *hisztogram* formájában szokásos (32. ábra). A kontrasztnövelés a csúcsos hisztogram széthúzását, ellapítását szokta eredményezni, ezért *hisztogram-kiegyenlítés*nek hívják, különösen akkor, ha lapos (gyakorisági csúcsok nélküli) hisztogram létrehozására törekszünk (azaz az eloszlást az egyenleteshez közelítjük).



32. ábra: Fantáziakép a Föld körül keringő üresközökről eredetiben 8694840 pixelen, 3 byte-on ábrázolt (true color) színekkel és az RGB-modell szerinti csatornák hisztogramjai

A kontrasztnövelés legegyszerűbb módja mindamelllett a DN-ek átskálázása, vagyis egy **normálás**⁵¹ végrehajtása: kiválasztjuk azokat a DN értékeket, amelyeknél az összes pixel DN-jeinek x%-a (pl. 99%-a) nagyobb, illetve kisebb ($DN_{1\%}$, $DN_{99\%}$), az ebből kieső x-x%-nyi (a példában 1-1%-nyi) pixelhez a DN lehetséges minimális, illetve maximális értékeit rendeljük hozzá ($DN_{\min}$, $DN_{\max}$), a köztes intervallumot pedig széthúzzuk a teljes lehetséges DN-intervallumra: $DN_{i \text{ új}} = (DN_{\max} - DN_{\min}) \cdot (DN_i - DN_{1\%}) / (DN_{99\%} - DN_{1\%})$, ahol DN_i az i-edik pixelhez tartozó DN érték.

A két kép között különböző erősségű megvilágításból adódó különbségek úgy is kiegyenlíthetőek, ha a DN értékeket az egyik képen egységesen megnöveljük vagy lecsökkentjük, a kép **világosságát** változtatjuk meg. Ezt egy konstans hozzáadásával, vagy egy szorzó alkalmazásával is elérhetjük. Ha nem lineárisan végezzük el a széthúzást, hanem egy exponenciális függvényvel úgy, hogy a közepes értékek tartományában legyen a legerősebb, azt *gamma korrekciónak* nevezzük; ez egyúttal a kontrasztjavításhoz is hozzájárul.

A **színegyensúly** vagy **fehéregyensúly** a színek állandóságával összefüggő kérdés. Egy fehér felület a képeken más-más színűnek fog látszani a megvilágító fény spektrális összetéte-

⁵¹ Azokat a műveleteket, melyek során számszerű adatainkat – a köztük lévő különbségek arányait és eredeti eloszlásuk formáját megtartva – egy adott intervallumra visszük át, normálásnak nevezzük. A statisztikában pl. gyakori a 0-100 intervallumra való normálás.

létől és intenzitásától függően (lásd pl. a felhőket a 32. ábrán). A színegyensúly helyreállítása matematikailag a (modelltől függő) három érték valamilyen tényezővel való megszorzását jelenti a fentebb leírtakhoz hasonló módon, de a három csatornát külön kezelve. A gyakorlatban egy fehér referenciafelszín mért értékei és az elméleti fehérhez tartozó értékek hányadosait lehet alkalmazni.

A **képvágás** az a művelet, amikor a digitális számok lehetséges értékeit kisebb számú intervallumra osztjuk fel (adott számú *szintre vágjuk*), és a különböző intervallumokba eső számokat egy önkényesen választott, az intervallumon belül egységes értékkel (általában egy középértékkel) helyettesítjük. Így egy olyan képet kapunk, amelynek intenzitásbeli felbontása kicsi, viszont éles kontrasztok alakíthatóak ki az eltérő osztályba sorolt pixelek között. **Képosztályozásnak** nevezzük, ha a képet részterületekre osztjuk fel valamilyen hasonlósági jellemzők alapján. Itt a valamilyen szempontból homogén részterületek és a határok megtalálása a feladat. Ezek a műveletek a **tematikus térképek** készítésének az alapjai, ha az intervallumhoz/osztályhoz tartozás megfeleltethető valamilyen objektumtípus felületéről kapott visszaverődésnek; pl. víz és szárazföld, növényzet és sziklák különíthetők el meglehetősen nagy (a kép eredeti felbontása által korlátozott) pontossággal.

A térképi foltok lehatárolásához, illetve a vonalas objektumok azonosításához hasznos a határátmenetek azonosítása, amit **élkiemelés** néven ismerünk. Itt nemcsak az egyedi pixelek DN-értékei számítanak, hanem a velük szomszédos, illetve hozzájuk közeli további pixelek DN-jeihez képesti *változás* az, amit fel kell fedeznünk, tehát konvolúciós jellegű szűrésre van szükség, ahol a DN-ek különbségeit állítjuk elő. Az élek azonban a felvételkedzés optikai körülményei (feloldási korlátok) miatt elmosódottak lehetnek, a változás gyakran nem hirtelen ugrás, hanem egy adott irányban észlelhető tendenciózus növekedés vagy csökkenés, míg véletlenszerű hatások (*zajok*) sokkal nagyobb, de szeszélyes eloszlású változásokat okoznak. Ha olyan szűrőfüggvényt alkalmazunk, amely a kisebb változást jellemző értékeket redukálja, és a nagyobbakat erősíti, azt **felüláteresztő** [highpass] szűrőnek nevezzük; ez az éles határok megjelenítésének kedvez. Ellenkező eset az **aluláteresztő** [lowpass] szűrő, ami a lassabb, de tendenciózus változásokat emeli ki, tehát a jellemzően hirtelen változással megjelenő véletlenszerű hatások eltüntetésének, vagyis a **zajelnyomásnak** lehet hatékony eszköze.

Az élkiemelés legegyszerűbb módja a *differentiálás*. A konvolúciós szűrőt elképzelhetjük egy kis $X \cdot Y$ pixelből álló képfedvényként (rendszerint $X = Y$), amely az operátorfüggvény együtthatóit tartalmazza. Ezzel végigjárjuk a kép minden egyes pixelét, és a lefedett pixelek DN-jein végrehajtjuk a kijelölt műveleteket, ami által az egyik pixel új DN-értéket kap⁵². Az alábbiakban nézzünk néhány egyszerű $3 \cdot 3$ -as példát, amelyek csak a közvetlen szomszédos pixeleket veszik figyelembe, az új értéket kapó pixel a középső, és a kijelölt művelet mindig szorzás:

$$s_1 = \begin{vmatrix} 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{vmatrix} \quad s_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \quad s_3 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

Az s_1 operátor hatása átlagolás. Ez a DN-különbségek, vagyis a kontrasztok csökkenését okozza, tehát a kép homályosabbá válik, viszont a zajok is jelentősen csökkennek, miközben a valódi folthatárok megmaradnak, így itt is elérhető élkiemelő hatás. Az s_2 műveletének eredménye a pixel és alsó szomszédjának különbsége. Ez kifejezetten az élek menti intenzitás felerősítésére alkalmas, de csak a horizontális irányban; ha a vertikális éleket akarjuk láttatni, akkor az 1-es szorzót át kell helyezni a középpont jobb vagy bal oldalára. Ez egy *gradiens típusú szűrő*. A művelet egyébként negatív DN-értékeket is eredményezhet, ezért még egy normálási művelet is szükséges: a lehetséges eredményértékek intervallumát a lehetséges DN-

⁵² Az angol nyelvű szakirodalomban 'kernel' a mátrix, és 'kernel operation' az elvégzett művelet megnevezése. A kép szegélyén a fedvény kilóg a képből; itt vagy fiktív értékeket alkalmazunk, vagy a szélső pixeleknek egyáltalán nem adunk értéket, így a kép méretét körbevágással csökkentjük.

ek intervallumára szokás vetíteni, ami után a 0 különbség egy közepes DN-értéknek felel meg. Az s_3 , amely gyakorlatilag a Laplace-operátorral azonos, és a szomszédsághoz képesti átlagos különbséget eredményez, már minden irányban érzékeny élkiemelő. Az ilyen szűrőket (a konkrét együttthatók változhatnak) *Laplace-típusú*aknak nevezik, és nagyon elterjedt élkiemelők.

A változást matematikailag úgy is lehetséges kezelni, ha a DN-értékek *Fourier-transzformációjával* előállt adathalmazra alkalmazunk egy szűrőfüggvényt, majd – ha szükséges – visszaalakítjuk a kapott értékeket. A Fourier-analízis egy tetszőleges függvény periodikus (hullámszerű) összetevőkre bontását jelenti, így az adott pontokban kapott értékek nagyban függenek attól, hogy a különbségek szisztematikusak vagy véletlenszerűek, illetve gyors, vagy hosszabb távú változások eredményei. A transzformáció meglehetősen számításigényes, mert minden egyes pixel DN-jének átszámításához az összes többi is figyelembe kell venni.

A foltok azonosítására közvetlen **foltkereső** eljárások is alkalmazhatóak. A *globális foltkeresés* leginkább akkor bizonyul kivitelezhetőnek, ha a hisztogramon határozott csúcsok különülnek el egymástól, amelyek különböző típusú foltokhoz tartoznak; ekkor a jól megválasztott határértékek menti képvágás lehet a megoldás. Az eredmény azonban mindig zavart lesz bizonyos fokig: a foltok nem lesznek folytonosak (vagyis egy-néhány pixelnyi foltok alakulnak ki), különösen a határzónáikban. Egyéb esetekben a *lokális foltkeresés* a célravezető, amikor egy adott képpontból (vagy képponthalmazból) kiindulva vizsgáljuk a szomszédos pixelek hasonlóságát, és egy hasonlósági feltétel alapján döntünk arról, hogy hozzáfűzzük-e a folthoz a pixelt, vagy új foltot kezdünk vele. Az eljárásokat ötvözni is lehet; pl. a kép egyes, önmagukban kellőképpen kontrasztos részeire hajtsunk végre hisztogram-alapú foltkeresést, majd az így kapott foltokat próbáljuk lokális eljárással egyesíteni, illetve kiterjeszteni.

A megfelelő szűrések kiválasztása nehezen automatizálható folyamat. Általában célszerű olyan lépések beiktatása az algoritmusba, ahol a kapott eredményeket összevetjük elméletileg, vagy referenciamérések szerint elvárt eredményekkel, és a megengedhetőnél nagyobb eltérés esetén megváltoztatjuk az eljárást; ez rendszerint emberi beavatkozást jelent, és már az értelmezéshez tartozik.

3.3.3. Többcsatornás felvételekből nyerhető információk

Többcsatornás felvételek esetében ugyanarról a beállításról egyidejűleg több hullámhossztartományban készültek felvételek, melyek pixelei – ha a felbontás azonos volt – egyértelműen és kölcsönösen megfeleltethetők egymásnak. A rögzített digitális számértékekből nemcsak kompozit (hamisszínes) felvételeket készíthetünk, hanem olyan térképszerű ábrákat (rektifikált képekből valódi tematikus térképeket), illetve adatsorokat is, amelyek a megfelelő pixelekhez tartozó digitális számokkal végzett tetszőleges matematikai műveletekből állnak elő. Egy pánkromatikus kép pl. a számok pixelenkénti *összegezésével* állítható elő; *kivonással* a hullámhosszfüggő reflektancia-különbségeket mutató képet kapunk. A végeredményül kapott **mutatószám-térkép** (pl. NDVI, 4.5. fejezet) ugyan csak az eredeti információtartalom egy részét őrzi meg, de kiemelheti a lényeges részt. Az eljárástípus fontos előnye, hogy a mutatószámok képzése képletekkel egyértelműen definiálható, így rutinszerű (automatizálható) és szabványos értelmezési eljárásként működhet, ugyanakkor az eredmény képként, sőt akár tematikus térképként jeleníthető meg.

A **képalkotó spektroszkópia** esetében a légköri és megvilágítási viszonyokon túl a térbeli felbontás jelenti a fő problémát, hiszen nagyobb pixelméret esetén annak a valószínűsége is nagyobb, hogy többféle anyagról származik a visszaverődés. Ha ez tényleg így van, el kell választani egymástól a különböző hatásokat, amelyeknek a keveréke az észlelet. A legegyszerűbb modell szerint a keveredés egyszerű, lineáris összeadódás útján jön létre a jelenlévő anyagok felületen képviselt arányaiban, de ez csak sík felszín esetén igaz; az egyenetlenségekből fakadó szórások megváltoztatják a képet. A szétválasztásra többféle algoritmus léte-

zik: pl. a PPI [**P**ixel **P**urity **I**ndex], a 'Gift wrapping algorithm' (konvex burkolópoligon számítása egy ponthalmazhoz), az 'Independent Component Analysis Endmember Extraction Algorithm' (ICA-EEA) vagy a 'Vertex Component Analysis'. Legtöbbjük feltételezi, hogy vannak tiszta (egyféle anyagból álló felületet ábrázoló) pixelek. Ezek nyilván szélsőséges spektrális tulajdonságokkal rendelkeznek azokhoz képest, amelyek többféle hatás keveredését mutatják: ez utóbbiak több, ámde kisebb amplitúdójú reflexiós vagy abszorpciós csúcst (a szomszédos csatornákhöz képest maximális vagy minimális DN-értéket) vonultatnak fel.

A PPI-számítás algoritmus a következő: képzeljük el a pixelek DN-adatait pontokként egy n -dimenziós térben, ahol n a hiperspektrális csatornák száma. Generáljunk e térben egy véletlenszerűen választott irányú vektort, és vetítsük rá a pontokat (ez egy vektoriális szorzást jelent a pontba mutató és a tesztvektor között). Keressük meg a vektor mentén a legszélső helyzetű két pontot: ezeket jelöljük meg szélsőségeként. (Helyesebben, egy kis ráhagyással, azokat a pontokat is, amelyek távolsága a szélsőségektől nem halad meg egy választott értéket.) Ismételjük az eljárást újabb és újabb vektorokkal, és számláljuk, melyik pixel hány esetben bizonyult szélsőségesnek. Kellő mennyiségű ismétlés után azok a pixelek, amelyek valóban tiszták, magas PPI-értékkel fognak kiugrani a többi közül, és meghatározható, hogy milyen anyag színeképét hordozzák. A többi pixel DN-vektora ezután, bár nem feltétlenül egyértelműen, kifejezhető lesz ezen pixelek DN-vektorainak valamilyen arányú összegeként.

3.4. Képek egyesítése

A feldolgozás gyakori lépése a több részletben leképezett felszín egyetlen képpé alakítása. Ez a közös dátumra való rektifikáláson túl még azt is jelenti, hogy a képeket egymás mellé kell illeszteni az átfedések átlapolásával. Az illesztés feltételezi, hogy a képek méretaránya és radiometriai tulajdonságai azonosak legyenek, vagyis az átfedés pixeljei kölcsönösen megfeleltethetők legyenek egymásnak; ehhez szükség van a képek átméretezésére és az átfedő részek egyik képről való levágására.

Az átméretezés útja a kép **újramintázása** [resampling] az új felbontásnak megfelelő pixelekkel lefedve. A műveletek közben a pixelekből kifejezett képméret csökkenhet és növekedhet anélkül, hogy az ábrázolt valóságos felület kiterjedésén változtatnánk. Csökkentés esetén a részben vagy egészen az új pixellel lefedett területű régi pixelek DN-jeinek valamilyen átlaga (pl. a lefedett részterületek nagyságának megfelelően súlyozott számtani közepe) adja az új pixel DN-jét. Növelés esetén interpolációra van szükség az új pixelek által lefedett szomszédos pixelek DN-különbségének felosztásával. A képméret csökkentésével az információtartalom is csökken, de növelésével nem növekszik. Az átlagolások a kontrasztosságot is óhatatlanul csökkentik.

A radiometriai tulajdonságok egyeztetése leginkább az átfedő területek hisztogramjai alapján lehetségesek; ezeket kell azonos alakúvá tenni. Természetesen az egyik képen ehhez szükséges transzformációt a kép valamennyi részére végre kell hajtani. Mindezek ellenére, gyakorlatilag bizonyosan nem tudjuk elérni, hogy az átfedő területek pixeljei tökéletesen azonos DN-ekkel rendelkezzenek.

Egy másik fajta, szintén hasznos egyesítési művelet az, amikor ugyanarról a beállításról nemcsak más csatornán, de más eszközzel, esetleg ugyanazon a csatornán, de más időpontban készült felvételeket rakunk össze egy képpé. Jó felbontású pánkromatikus és kevésbé jó felbontású multispektrális (pl. SPOT és LANDSAT TM) felvételek egyesítésével pl. megnövelt felbontású színes képeket lehet összeállítani. Ez utóbbi művelethez az egyik leggyakoribb eljárásban a színes kép IHS modell szerinti kódolására van szükség, ahol az I csatorna DN-jeit a pánkromatikus DN-ekkel helyettesítik be. Egy másik gyakori eljárás a jobb felbontásnak megfelelő újramintázás, ahol az RGB csatornák értékeit a pánkromatikus DN-ek és a multispektrális DN-ek összegének arányával súlyozva veszik figyelembe.