

2. Adatnyerő rendszerek

2.1. Az elektromágneses sugárzásokból nyerhető információk

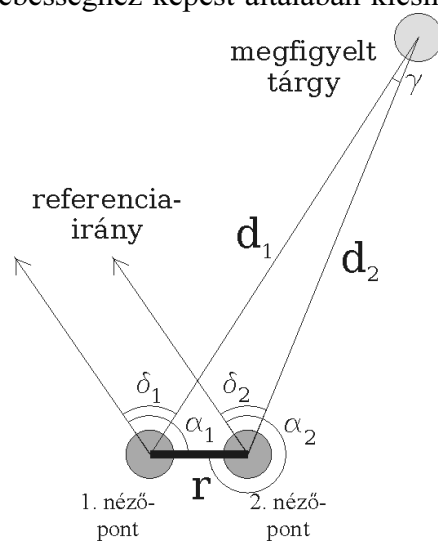
Az elektromágneses sugárzások legfontosabb mérhető jellemzői a **hullámhossz** (vagy ami ezzel egyenértékű, a **rezgésszám**) és az **intenzitás**; ezen kívül a **polarizáció** hordozhat még információt. Észlelésükre az általuk keltett hatások alkalmazhatóak: elektromágneses indukció (elektromos áram megindulása antennákban), fotoelektromos effektus (elektronok felszabadítása), anyagszerkezeti változások (kémiai kötések felszakadása).

2.1.1. Helyzet, távolság

Kihasználva azt a tényt, hogy az elektromágneses sugárzás (a reflektáló vagy refraktáló felületek között) egyenes vonalban terjed²¹, ez nyújtja a legpontosabb módszert a megfigyelt tárgy képesti **helyzet** meghatározására. Ennek összetevői: az egyenes vonal **iránya** és a vonal menti **távolság**. Az iránymérés mindig **szögmérést** jelent valamely fix referenciapont(ok) irányához képest. A távolság meghatározására két út kínálkozik. Az egyik az, amit a földi $\rightarrow$ geodézia (*háromszögelés*) is használ *előremetszés* néven: a meghatározni kívánt helyzetű pontot két (esetleg több) nézőpontból is megirányozzuk, majd a két nézőpont ismert távolságát felhasználva trigonometriai összefüggéseken keresztül számítjuk ki (9. ábra)²². Így működik a térlátásunk is, ezért van szükség két szemre. A másik út aktív távérzékelési eljárás: a nézőpontból kibocsátott és a céltárgyról visszavert sugárzás észlelésével jár. Ehhez célravezető lehet egy rövid impulzus kibocsátása és visszaverődésének észlelése, a két pillanat között eltelt idő mérésével. Mivel a mérendő távolságok a fénysebességhez képest általában kicsik, vagyis a kibocsátás és a visszaverődés között eltelt idő nem mérhető elég pontosan, valamint mivel a kibocsátás is időt igényel, gyakran az interferencia jelenségét használják ki. Ez úgy történik, hogy a kibocsátott jelet *modulálják* (lézernéfényenél pl. általában amplitúdómodulációval, mivel a hullámhossz adott, mikrohullámoknál frekvenciamodulációval is lehetséges), és ezt több különböző frekvenciával is megteszik. A különböző hullámhosszakon kibocsátott és visszavert sugárzások megmért fáziskülönbségeiből kiszámítható a távolság.

Előremetszés: a 9. ábrán látható helyzetben a két nézőpontból megmérhetjük mind a megfigyelt tárgy (δ), mind a másik nézőpont irányszögét (α) a referenciairányhoz képest (földi méréseknél ez az északi, vízszintes irány). A nézőpontok és a megfigyelt tárgy alkotta háromszög egyik oldala (r) ismert, szögei pedig az irányszögekből kiszámíthatóak: az 1. pontban $\beta_1 = \alpha_1 - \delta_1$, a 2. pontban $\beta_2 = 360^\circ - (\alpha_2 - \delta_2)$, a megfigyelt tárgynál $\gamma = 180^\circ - (\beta_1 + \beta_2)$. A szinusztétel alapján kiszámítható a d_1 és d_2 távolság: $r / \sin \gamma = d_1 / \sin \beta_2 = d_2 / \sin \beta_1$.

Az interferometriás távolságmérésnél a fázisszöget kell mérni. Amikor a távolság a hullámhossz egész számú többszöröse, akkor a fázisszög 0° . Alacsony rezgésszámú modulációval indítva és a rezgésszámot fokozatosan növelve megkereshető az a hullámhossz, ahol először előáll ez a helyzet – ekkor a távolság éppen a hullámhosszal lesz egyenlő.



9. ábra: Az előremetszés elve

²¹ Csillagászati megfigyeléseknél ez nem mindig helytálló alapfeltevés, ugyanis nagy tömegek (csillagok) közepében elhaladva a fény észlelhető mértékben elhajlik.

²² A csillagászatban *parallaxis* néven ismert az eltérés egy csillagnak a földpálya különböző pontjaiból mért irányában.

2.1.2. Mozgás, sebesség

A helyzet megváltozása, azaz a megfigyelt tárgy **mozgása** több, egymás után készült felvételen rajzolódik ki – legalábbis a mozgás *sugárirányra merőleges* összetevője. A visszavert sugárzás hullámhosszának észlelése alkalmas lehet a *sugárirányú* elmozdulás mérésére is. Ha a tárgy távolodik tőlünk, akkor a visszaverődő sugárzás egyre hosszabb utat tesz meg, így a befutási idő is egyre hosszabb lesz. Ez abban nyilvánul meg, hogy a rezgéshullámok széthúzódnak, azaz a hullámhossz nő. Közeledő tárgy esetében ellenkezőleg, a hullámhossz csökkenését észleljük. A jelenséget a fizika *Doppler-effektus* néven tartja számon. Az észlelt (f') és a kibocsátott²³ (f) frekvencia összefüggését a következő képlet írja le:

$$f' = f + \frac{fv}{c}$$

Itt v a tárgysebesség, c pedig a hullám sebessége (fénysebesség). Ez nemcsak elektromágneses sugárzás, hanem bármilyen hullámok esetén érvényes (ekkor c természetesen más értéket vesz fel).

Távolság- és sebességmérési célra leginkább a rádió- és mikrohullámok hullámhossztartománya alkalmazható (*radar*, lásd 2.4. fejezet), nemcsak a Földre irányuló távérzékelésben, hanem a csillagászatban is²⁴. Előnyük abból fakad, hogy a légkör átereszti ezeket, szóródásuk és elnyelődésük nem jelentős mértékű. Használják azonban a rövidebb hullámhosszakokat is (*lidar*, lásd 2.4.4. fejezet).

2.1.3. Fényesség

A fény intenzitását leginkább a **fotoelektromos hatás** kihasználásával lehet megmérni. Ennek lényege, hogy ha egy fémfelületet egy bizonyos (a fém anyagától függő) küszöbfrekvencia fölötti rezgésszámú elektromágneses sugárzás ér, akkor a fotonok elnyelődnek, és szabad elektronok lépnek ki. Egy foton egy elektron felszabadítására képes, tehát a fény intenzitása az áramerősséggel lesz egyenesen arányos; a kilépő fotoelektron energiája pedig a frekvenciával lesz egyenesen arányos. Bizonyos fémvegyületek (ezüstsók) esetén a foton elnyelése a kémiai kötés felbomlását okozza, ilyenkor az intenzitás a bontódás nyomán létrejött fématomok számával lesz arányos (lásd fényképezés, →2.2. fejezet).

A **photodetektoroknak** több típusa is létezik. A korábbi fotocellák és a videokamerák olyan elektroncsövekkel működnek, amelyek vékony alkálifémréteggel bevont *photokatódokat* tartalmaztak; ezek már az infravörös tartományban is érzékenyek. Manapság a legelterjedtebbek a **photodiódák**, amelyekben – záróirányú feszültség mellett – fény hatására áram indul meg. A photodiódákat széles körben alkalmazzák, pl. távirányítók vevőiben, CD-olvasókban, napelemekben, vagy éppen a fényképezőgépek fénymérőiben és a CCD szenzorokban (→2.2. fejezet).

A diódák működési elve, hogy a félvezető *önvezetéssel* rendelkező alapanyagát (szilícium, germánium) valamely olyan anyaggal szennyezik, amely több, vagy kevesebb szabad elektronnal rendelkezik, így kristályrácsba épülése elektronhiányt (P típusú szennyezés, pl. 3 vegyértékű bórral) vagy elektrontöbbletet (N típusú szennyezés, pl. 5 vegyértékű foszforral) eredményez. Két ilyen réteg összekapcsolása nyomán határukon elektronok átadásával egy polarizált tértöltési tartomány alakul ki egy feltöltött és egy kiürített réteggel, amely szigetelőként működik. Feszültség rákapcsolásával ez a tartomány elvékonyítható (*nyitóirányú előfeszítés*, P+ és N-) vagy megvastagítható (*záróirányú előfeszítés*, P- és N+), a dióda ezért csak egy irányban vezet. A photodiódákban a fény hatása a kiürített rétegben lyuk-elektron párok keletkezése, amely záróirányú áramot (fotoáramot) indít el (*photovoltaikus hatás*); ennek erőssége arányos a fény intenzitásával.

²³ A kibocsátó lehet maga a megfigyelt tárgy is, pl. egy csillag; ekkor azonban olyan karakterisztikus vonalakra van szükség, amelyek biztosan jelen vannak, és egymáshoz viszonyított helyzetük alapján azonosíthatók is, pl. a hidrogén vonalai. A hullámhosszváltozásnak mindegyik ilyen vonalnál egyenlőnek kell lennie. A csillagászatban szinte minden csillag esetében *vöröseltolódást*, azaz távolodó mozgást lehet észlelni.

²⁴ A magyar *Bay Zoltán* fizikusnak sikerült első ízben radarral megmérni a Föld-Hold távolságot.

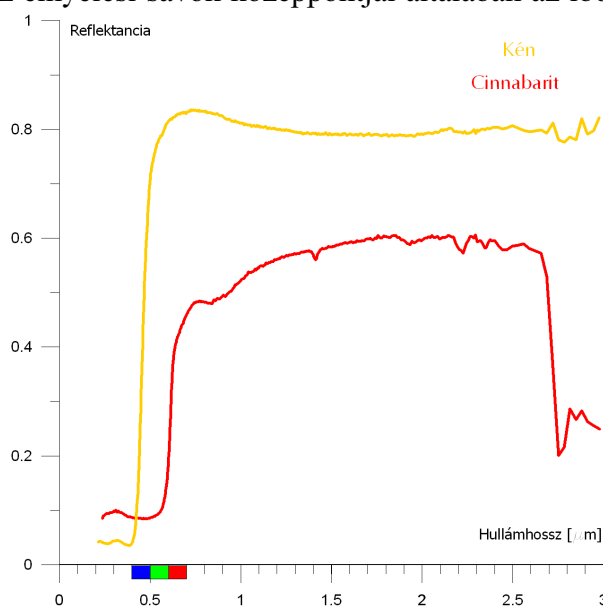
2.1.4. Anyagi összetétel, anyagszerkezet

Amint már az 1.3. fejezetben szó esett róla, az anyagok bizonyos, atom-, molekula- vagy kristályszerkezetüknek megfelelő hullámhosszú sugárzásokat elnyelnek, illetve a gerjesztett állapotban lévő anyagok maguk is ilyen hullámhosszakon sugároznak, így a vonalas színekép-ből a kémiai összetételre lehet következtetni. Így nyerhető információ a csillagokban lévő forró, emittáló anyag és a csillagközi térben levő abszorbeáló anyag összetételéről. A nem gerjesztett állapotú anyagok sugárzása csupán hőmérsékletük megmérésére ad lehetőséget. A földfelszínről azonban a hősugárzáson túl a legtöbb esetben nem kibocsátott vagy áteresztett, hanem visszavert sugárzás érkezik, aminek a hullámhossz-összetétele szintén anyagra jellemző tulajdonság. Ezt **reflektancia** néven szokás említeni, ami a beeső és a visszavert sugárzás aránya (0 és 1 közötti érték)²⁵.

A reflektanciát – éppúgy, mint az emittált sugárzást – nem egyetlen hullámhosszon, hanem széles spektrumon szokás vizsgálni, és lényegében abszorpciós színeképet kapunk a felvételen. Mivel azonban szilárd és folyékony anyagokról van szó, nem éles elnyelési vonalak jelennek meg rajta, hanem a hullámhossz függvényében változó intenzitásképet kapunk. Grafikus megjelenítése a 7. és 8. ábrákon látható transzmisszivitási görbékhez hasonló módon történik. Látásunk számára visszavert spektrumnak a látható fény tartományába eső része különböző színárnyalatokként jelenik meg. A gázok vonalas színeképéhez hasonlóan itt is különböző anyagok jelenlétére utalhatnak a karakterisztikus elnyelési sávok, amelyek különféle okokból a vegyületre és annak szerkezetére jellemző módon változhatnak. Abszorpciót a következő tényezők okozhatnak:

- *Elektronhéjbeli folyamatok.* Az elektronok magasabb energiaszintű pályára lépése a plazmaállapotú (atomokra bomlott) anyag atomjaihoz hasonlóan történik, de kötésben ez az energiaszint jóval alacsonyabb lehet, mint a plazmában, és értékét az atom (ion) valenciája (vegyértéke), kristályrácsbeli koordinációja (hány atom veszi körül) és helyzeti szimmetriája is befolyásolja: ez a *kristálymezőbeli elnyelődés*. Szerkezetfüggése miatt ez különösen alkalmas az ásványok spektroszkópiai azonosítására. Ennél akár 100-1000-szer erősebb lehet a *töltésátviteli folyamatok* eredménye, amikor az elektronok egyik ionról a másikra kerülnek. Az elnyelési sávok középpontjai általában az ibolyántúli sávba esnek, de gyakran átfednek a látható fény rövid hullámhosszú tartományával. A legkézenfekvőbb példa erre a viselkedésre a vas: 0,44 μm körül mutatkozik egy aránylag széles szórású töltésátviteli elnyelődési maximum, míg Fe^{3+} formában ehhez egy további jellegzetes kristálymezőbeli elnyelődési csúcs adódik 0,9 μm , Fe^{2+} formában pedig 1,0 μm körül, ami azonban a fentebb említettek miatt jelentősen változó hullámhosszon jelentkezhet. Ennek eredménye a Fe^{3+} -tartalmú ásványok vörösbarna-sárga és a Fe^{2+} -tartalmúak jóval sötétebb zöld színe.

Néhány kristályban megjelenik a „vezetési sáv” (az elektronok kristály-



10. ábra: Tiltott zónával rendelkező ásványok reflektanciája

²⁵ A csillagászatban az *albedo* fogalom használatos, amit többnyire a teljes megfigyelt spektrumbeli visszaverődési hányadra értenek.

rácsbeli szabad mozgásának energiaszintje) és a „valenciasáv” (az egyes atomokhoz kötött elektronok energiaszintje) közötti *tiltott zóna*; ez főként a dielektrikumokra jellemző, míg a fémekből hiányzik. A tiltott zónában (hullámsávban) nincs jelentős abszorpció, erős a reflektancia. Ilyen zónával rendelkezik pl. a kén a kéktől (kb. 0,45 μm), a cinóber (HgS) és a rutil (TiO_2) a zöldtől (kb. 0,6 μm) kezdve – innen élénksárga, illetve élénkvörös színük (10. ábra).

Még kevesebb ásvány rendelkezik *színközpontokkal*. Ezek rácshibák, amelyekbe megfelelő energia elnyelésével bekerülhet egy-egy elektron. Elsősorban a halogenidekre jellemző ezek léte, a fluorit sárga, bíbor és kék színeit ez a jelenség okozza.

- *Vibrációs folyamatok.* A molekulák, illetve a kristályok kötési felszakadásuk nélkül is képesek energiát elnyelni úgy, hogy rezgésbe jönnek. Egy n darab atomból álló molekula vagy atomcsoport elvileg **$3n-6$ fundamentális rezgésállapotba** (röviden *alapmódusba*, jelölése ν_i) kerülhet egyidejűleg, ezekhez azonban olykor azonos energiaszintek tartoznak; az ilyen állapotokat degeneráltaknak nevezzük. A legfontosabb, a jelenség által jól azonosítható molekula a víz. A háromatomos H_2O -molekula 3 fundamentális rezgésállapota önállóan (pl. a légköri párában) $\nu_1=2,74 \mu\text{m}$, $\nu_2=2,66 \mu\text{m}$ és $\nu_3=6,27 \mu\text{m}$. Folyadék halmazállapotban (pl. egy tóban) a hidrogénhid-kötések miatt ezek eltolódnak $\nu_1=3,11 \mu\text{m}$, $\nu_2=2,90 \mu\text{m}$ és $\nu_3=6,08 \mu\text{m}$ értékekhez. A kétatomos OH^- ion ellenben – kötésben – csak egyféle rezgésállapotba kerülhet (a ν_1 -nek megfelelőbe), és a hullámhossz a kationtól függően változhat 2,67 μm -tól egészen 3,45 μm -ig.

Megjelenhetnek a fundamentális állapotokon túl a rezgések *kombinációi* (összegződése, esetleg különbségei), továbbá a sajátrezgésekhez tartozó *felharmonikusok*, azaz az energiaszintek egész számú többszörösei, de már csak 30-100-szor gyengébben. A hidroxilcsoport fundamentális rezgésállapotai esetében pl. más abszorpciós hatások elfedhetik ezt a rezgést; sokkal jellegzetesebb ν_1 szinte mindig zajmentesen jelentkező első felharmonikusa ($2\nu_1$) 1,4 μm -nél. Molekuláris H_2O esetében a $\nu_1+\nu_3$ kombináció eredményeként 1,9 μm -nél jelenik meg jellegzetes abszorpció²⁶, fémekhez kötött hidroxilcsoportok (OH^-) esetén pedig 2,2-2,3 μm körül.

Egy adott anyag elméletileg lehetséges rezgésállapotai közül nem mindegyik valósul meg, mert csak azok aktivizálódhatnak, amelyek a molekula vagy atomcsoport dipólusmomentumának megváltozásával járnak. A kétatomos molekulákból álló elemi gázok (pl. O_2 , N_2) ezért csak nagy nyomáson torzult szerkezettel válhatnak *infravörös-aktívvá*, míg pl. a szénmonoxid (CO) a légkörben is az.

A távérzékelési felvételeken természetesen a szokásos felbontás mellett számos különböző vegyület együttes képét látjuk, azonban ezek együttese (vagy egy domináns vegyület) az adott dologra jellemző lehet (pl. az agyag- és hidroxidásványok a talajban a fentebbi elnyelési sávokat okozzák; a nedvesség pedig általában minden sávban erősíti az elnyelődést). A növényi szövetek pl. az infravörös tartományban a klorofill általunk látott zöldjénél is erősebb reflexiót adnak, míg vörösben és kékben erős az elnyelődés.

A felvételek interpretációjánál fontos a légköri abszorpció figyelembevétele megfelelő korrekcióval. A karakterisztikus elnyelődési sávok közül elsősorban azok hasznosak, amelyek az atmoszferikus transzmissziós ablakokba esnek, ezért pl. a távoli infravörös tartományban már nem vizsgálódunk. Szükséges az is, hogy lehetőleg éles csúcsok, ne egymásba mosódó intervallumok alakuljanak ki, és lehetőleg olyan hullámhossztartományban, ahol a visszaverődés az adott anyagról egyébként jó. A levegőben és a felszín borító anyagokban is előforduló vegyületek (pl. CO_2 , H_2O) egyes jellegzetes sávjai közül azok a leghasznosabbak, amelyek a légkörbeli, molekuláris gázállapotban nem aktivizálódó folyamatokhoz kapcsolódnak.

²⁶ A hullámszámokat, vagyis a hullámhosszak reciprokát kell összegezni, így kapjuk a megfelelő értékeket.

2.1.5. Alak, körvonal, felület

Az elektromágneses hullámok (transzverzális hullámok lévén, ahol a rezgésirány merőleges a terjedési irányra) rendelkeznek a **polarizáció** tulajdonságával. Lehetséges, hogy a rezgésnek nincs kitüntetett iránya; ekkor *polarizálatlan* sugárzásról beszélünk. Ha viszont a rezgés egy irányban, vagyis egy a terjedés irányát tartalmazó síkban történik, akkor *síkhullámok*ról van szó; ez a *lineáris polarizáció* esete. A hullámok megtörése, szóródása és visszaverődése általában polarizációval jár együtt. Az antennák segítségével kibocsátott jelek, így a rádióadások és a radarjelek (lásd 2.5. fejezet) alapvetően polarizáltak.

A tárgyak felületeiről visszaverődő sugárzás polarizációja információt hordoz a felület minőségéről és helyzetéről. A polarizáció síkjának irányítottsága a beesés és visszaverődés szögétől, vagyis a felület térbeli orientációjától függ. Az egyenetlen felület sok, különböző irányítottságú felületdarab módjára viselkedik. A sima felületről való visszatükröződés élesen polarizált lesz, míg durva felületekről többszörös visszaverődés után diffúz reflexiót, nem vagy gyengén polarizált sugárzást kapunk (*depolarizáció*). A felület durvasága az egyenetlenségek méretét jelenti, vagyis az észlelt durvaság függ a felbontóképességtől, azaz a sugárzás hullámhosszától.

2.1.6. Hőmérséklet

A hőinfra tartományban, illetve annak közelében dolgozó érzékelők (ezt a tartományt átengedő szűrővel ellátott fotodiódák) alkalmazhatóak hőmérsékletmérésre (a fizikai elvet lásd az 1.3. fejezetben), amennyiben a megfigyelt tárgy **emisszivitása** ismert, illetve kellően magas. Az emisszivitás mérhető referenciaméréssel (egyidejű hőinfra és más módszerű hőmérsékletméréssel), illetve növelhető a tárgy megfelelő bevonásával (pl. festésével). Magas emisszivitású pl. a víz (0,98), alacsony emisszivitású egy ép, sima fémburkolat. A mért hőmérséklet csak a tárgy megfigyelt felszínére vonatkozik, a belsejében ettől eltérhet! A méréseket ezért célszerű éjszaka végezni, mert nappal a napsugárzás a kitett felszíneket jelentősen felmelegíti, és a visszaverődése is zajforrás.

Az optimális érzékenység eléréséhez az érzékelőt alacsony hőmérsékleten (<100K) kell tartani, ami a világűrben könnyebben megoldható, de a légi távérzékelésben használt eszközök számára hűtőtartályra van szükség.

Bár a kibocsátott sugárzás intenzitáscsúcsa a földi hőmérsékletek mellett a hőinfra tartományba esik, ezen kívül is van mérhető értékű sugárzás. Főként a mikrohullámok tartományában érdemes ezt kihasználni, amelyek elhanyagolható veszteséggel hatolnak át a légkörön. Az így mért *fényességi hőmérsékletek* azonban inkább a különböző anyagok elkülönítésére alkalmasak képalkotó érzékelőkben; a víz magas emisszivitása miatt pl. a talajok nedvességtartalma változásainak nyomon követésére használatos.

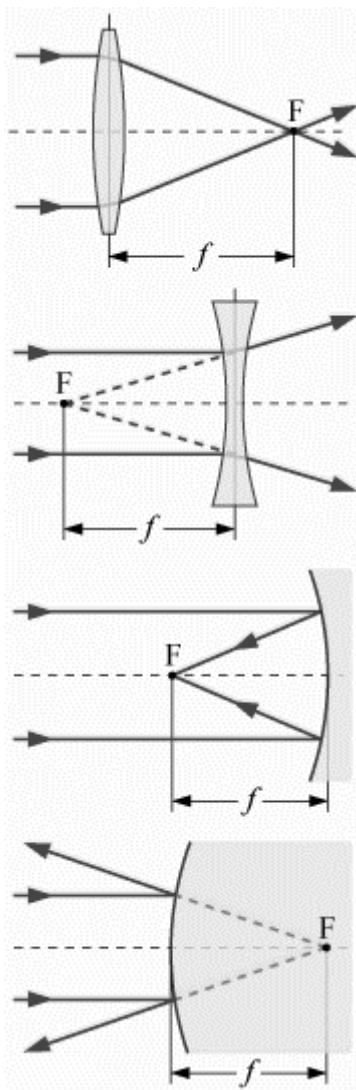
2.2. Az elektromágneses sugárzás érzékelése és rögzítése

2.2.1. A fényképezés

Az emberi szervezet az elektromágneses sugárzásokat elsősorban *látás* útján érzékeli: a pupilla idegsejtjei az elnyelt fény energiáját elektromos impulzusok formájában továbbítják az agy számára. Az elnyelés és az ingerület továbbítása kémiai átalakulások útján történik: a fényreceptor proteinek kettéhasadnak, és a keletkező opszinok ionszűrőket nyitnak meg a szinapszisokban (az idegsejtek ingerületátvivő nyúlványain). Mind az intenzitás, mind a hullámhossz érzékelésére vannak specializálódott sejtek (alakjuk után „pálcikák” és „csapok” néven ismertek). E sejtek a *pupillán* (*szembogáron*) helyezkednek el, amelyet a színes *szivárványhártya* (*retina*) vesz körül; ez utóbbi nyílásának átmérőjét változtatva tudjuk szabályozni a receptorsejtekre eső fény intenzitását. Az éles, tiszta képalkotásról a folyadékot tartalmazó, változtatható mértékben domború *szemlencse* gondoskodik. A kép ilyenformán a sejtek által képviselt pontokból áll össze az agyunkban, bár ezek nem különülnek el olyan diszkréten, mint pl. a rovarszemekben, ahol minden ponthoz különálló, szilárd lencse tartozik.

A műszeres érzékelési technika is leggyakrabban egy szabad szemmel látható kép létrehozására törekszik; az erre irányuló eljárások neve **fényképezés**. Egy fényképezőgép lényegében ugyanazokat a főelemeket tartalmazza, mint a szem: a leképezésre szolgáló lencserendszert (**objektív**et), a fényerőt szabályozó rekeszt (**blendét**) és szűrőket, valamint a képet rögzítő, lemezre vagy filmre felvitt emulziót (analog fényképezés), vagy elektromos szenzort (digitális fényképezés).

A leképezés során a képfelületen (pupillán, filmen vagy szenzoron) úgy kell létrehozni a tárgyak képét, hogy azok minden pontjának egyértelműen egy-egy pont feleljen meg; más szavakkal, hogy a tárgy egy bizonyos pontjából kiinduló (onnan visszaverődő) fénysugarak ne a képfelület összes, hanem csakis egy pontjába jussanak el. Ezt ívelt felületű tükrök és lencsék (reflexió és refrakció) segítségével lehet biztosítani, amelyek **centrális vetületet** állítanak elő. Ezek legfontosabb jellemzői az **optikai tengely** és a **gyújtópont (fókusz)** helye (11. ábra). Az optikai tengely lényegében a lencsék (tükrök) szimmetriatengelye. A fókusz ennek a tengelynek az a pontja, ahol a lencsére (tükörre) eső, az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak találkoznak. Az egyéb irányokból érkező párhuzamos sugarak pedig egy olyan sík pontjaiban fogják egymást metszeni, amely merőleges az optikai tengelyre, és átmegy a gyújtóponton: ez a **gyújtósík**. Az egy pontból érkező fénysugarak természetesen nem párhuzamosan érik a lencsét (tükört), hacsak nincsenek végtelen távolságban. Éppen ezért metszéspontjuk nem a gyújtósíkon lesz, hanem attól távolabb. Ezt a távolságot a *képalkotás Newton-egyenlete* segítségével ki is számíthatjuk: $1/t + 1/k = 1/f$, ahol t a tárgytávolság, k a képtávolság, f pedig a fókusz-távolság a lencse (tükör) fókuszjától (a két tényleges törőfelületet helyettesítő elméleti síktól) mérve. A tárgytávolság és a képtávolság aránya (t/k) egyúttal



11. ábra: Lencsék és tükrök fókusza (F) és fókusz-távolsága (f)

a kép méretarányát is megadja; a gyakorlatban ez általában kicsinyítést jelent.

A folyékony szemlencsével szemben az üvegből vagy műanyagból csiszolt lencsék fókusz távolsága nem változtatható, így a különböző távolságra lévő tárgyak élesre állítása a fényképezőgépben a képsík és az objektív távolságának változtatásával történik. A kétszeres fókusz távolságban lévő tárgy esetében lesz a kép méretaránya 1:1 ($t = k = 2f$). Ezen a távolságon belül nagyított képet kapunk (*makrofényképezés*), de ehhez a képtávolságot jelentősen növelni kell, amit a fényképezőgép méretei korlátoznak. A fókusz távolságon belül már egyáltalán nem lehetséges képet alkotni.

A fényképezési gyakorlatban több lencséből, illetve tükörből álló összetett objektíveket használnak; elméletileg azonban bármely ilyen rendszer helyettesíthető egyetlen lencsével. Ennek oka, hogy így csökkenthetők a **leképezési hibák**, illetve a szükséges méretek, sőt a fókusz távolság is változtatható bizonyos határok között (*zoom* lencsék). A következő fontosabb lencsehibák ismereteseek:

1. *Szférikus aberráció*: a gömbhéj alakúra csiszolt lencsefelületre eső, az optikai tengellyel párhuzamos fénysugarak a lencse középpontjától távolodva nem a fókuszban, hanem attól mindinkább eltérő pontban metszik egymást. A görbület megfelelő változtatásával (*aszférikus lencsék*) vagy összetett lencserendszerrel kiküszöbölhető.
2. *Kóma*: a lencsére nem az optikai tengellyel párhuzamos irányból érkező fénysugarak nem egy pontban metszik egymást a képsíkon, hanem szóródási körré húzódnak szét. A szférikus aberrációhoz hasonlóan a görbület változtatásával kiküszöbölhető ki.
3. *Képmezőelhajlás*: az éles kép nem sík, hanem görbült felületen alakul ki (csak a kép közepe, vagy egy gyűrű éles).
4. *Torzítás*: az egyenes vonalak görbének látszanak.
5. *Kromatikus aberráció*: a törésmutató hullámhosszfüggése miatt a különböző színű fénysugarak különböző gyújtópontokban találkoznak. Ez két különböző diszperziójú anyagból összetett lencsével minimalizálható.

Az objektívek további fontos jellemzői a **látószög**, a **képszög** és a **felbontóképesség**. Az első kettő az előlő, illetve a hátsó gyújtópontokból a lencse szegélyének két átmérős pontja felé tartó egyenesek által bezárt szög. Torzításmentes objektívek esetében ez a két szög egyenlő; a normál objektíveknél 50° - 55° között van. Ennél kisebb látószögűek a *teleobjektívek*, nagyobbak a *nagylátószögű objektívek*. Az objektív feloldóképességét vonalpár/mm-ben szokás mérni, azaz hogy 1 mm távolságon belül legfeljebb hány világos és sötét vonalokból álló pár különböztethető meg az alkotott képen. A végső felbontás természetesen a rögzítő emulzió vagy szenzoron is múlik, mint ahogy a szemünké is azon, hogy hány darab idegsejt van benne. Digitális fényképeken a tárolt képpontok (*pixelek*) száma adja a felbontást. Az emberi szem felbontóképessége kb. 81 megapixelnek felel meg.

A fényképezőgépben általában az objektívbe építve jelenik meg a **rekesz (blende)** és a **zár**. Az előbbi szerepe a beeső fény mennyiségének (intenzitásának), az utóbbié pedig a megvilágítás időtartamának a szabályozása. Mindkettő a felvételt rögzítő emulzió fényérzékenységéhez kell, hogy alkalmazkodjék. A rekesz általában a lencse széléit szabályozható mértékben letakaró lemezekből áll a szem mintájára (*íriszblende*); a „leblendezés” ezért a lencse-széli hibák kiküszöbölésében is kedvező hatású, és a mélységélesség²⁷ is növeli. A zár szerepe a fény útjának megnyitása (*exponálás*) a rögzítő emulzió vagy szenzor felé. A zár állhat a blendéhez hasonlóan a szélek fel kinyíló lemezekből (*központi zár*) vagy egy végigfutó nyílásból (*redőnyzár*). Bármilyen gyors legyen is a nyitás és a zárás, egyik sem tud a teljes exponálás ideje alatt egyenletes megvilágítást biztosítani, ami különösen rövid expozíciós időknél jelentős hatású.

²⁷ A mélységélesség azt fejezi ki, hogy az élesre állított tárgytól közelebb és távolabb elhelyezkedő tárgyak képe milyen távolságtartományon belül lesz még élesnek tekinthető.

Végül, mindezeket át a képet rögzítő rendszeremhez érkezik a fény. Hagyományos, **analóg fényképezés**nél a képet kémiai úton rögzítik ezüstsók (ezüst-bromid, -klorid, -jodid) segítségével. Ezek a vegyületek a látható fény rövid hullámhosszú (kék színű) tartományában és az UV tartományban produkálnak fotoeffektust²⁸, amelynek során a kötéseik felszakadnak, szabad ezüstatomok keletkeznek. Az ezüstsókat kristályszemcsék formájában, egy zselatin-alapú emulzió részeként viszik fel a nyersanyag hordozórétégére, ami lehet merev lemez, de ma már egyre inkább csak hajlékony, átlátszó, műanyag **film**. A fényképezés technológiájának lényege, hogy ha a megvilágítás rövid ideig tart, akkor csak a molekulák egy, a megvilágítás erősségével arányos része fog felbomlani²⁹, továbbá hogy az emulzió tartalmaz olyan összetevőt (felületi réteget), amely a felszabaduló halogénatomokat megköti, így az ezüstatomok szabadon maradnak. A nyersanyagban így keletkezik a *látens kép*. A kép *előhívása* az ezüstsók ezüstionjainak szelektív redukciójával történik, ahol a már meglévő szabad atomok körül továbbiakat hoznak létre különböző szerves vegyületek (metol, hidrokinon és egyebek) segítségével (tíz-százmilliárdszorosra növelve a számukat). A felvételt nátrium-tioszulfát oldattal kezelve eltávolítják a maradék ezüstsókat (*fixálás*). A kapott képen a megvilágítást kapott részek opak fém-ezüst: sötét, átlátszatlan foltok mutatkoznak, tehát a tényleges kép *negatívját* kapjuk meg. Ezt az emulzió fényérzékenységehez igazított színű *kopírfénnyel* átvilágítva és újra emulzióra rögzítve (pl. fotópapíron) nyerhető a *pozitív* kép. A kép felbontása (az optika feloldóképességén túl) az ezüstsókristályok méretén és eloszlásán múlik (*szemcsézettség*).

Az ezüstsók korlátozott fényérzékenységi tartománya miatt ezekkel igazából csak a tárgyak kék színei fényképezhetők le. Ha a teljes látható spektrumot akarjuk visszaadni, akkor közvetítő anyagokra van szükség: olyan pigmentekre, amelyek az ezüstsó-szemcsék felületén adszorbeálódva átveszik a fényelnyelő szerepet, majd az elnyelt energia segítségével redukálják az ezüstionokat. Ezeket *szenzibilizátorok*nak nevezik. Segítségükkel kiterjeszthető az érzékenység nemcsak a teljes látható fény tartományára (**pánkromatikus** felvétel³⁰), hanem akár az infravörös tartományra is. Az ultraibolya tartomány lefényképezésénél, amire az ezüstsók részben már eleve érzékenyek, egy másik probléma lép fel: az üveglencsék az UV fényt nagyrészt elnyelik, ezért másféle, kvarckristályból csiszolt objektívekre van szükség.

A digitális fényképezés során a film helyét egy **CCD-chip** és a hozzá kapcsolt memória veszi át. A CCD a *charge-coupled device*, azaz a töltéscsatolt eszköz rövidítése; olykor a CMOS (*complementary metal oxide semiconductor* – kiegészítő fémoxidos félvezető) típussal is találkozhatunk. A szenzoron nagyszámú szilikon anyagú fotodióda³¹ van elhelyezve, amelyekben fény hatására elektromos töltés keletkezik. Ennek a nagysága a beeső fény intenzitásával arányos. Amint a filmekben az ezüst-halogenid szemcsék, úgy itt ezek a fotodiódák jelentik a kép egyedi pontjait (**pixel** = *picture element*), és az elérhető felbontás ezek számán és sűrűségén múlik. A *progresszív CCD* szenzorok esetében az érzékelés és a leolvasás egy műveletben történik, így a mechanikus zár fölöslegessé vált; a nyitás-zárás időigénye okozta megvilágítási problémák kiküszöbölhetővé váltak. A szenzor mérete a filmekhez képest kicsi

²⁸ Az AgBr kötési energiája 240 kJ/mol, ez kb. 500 nm hullámhosszú sugárzás energiaszintjének felel meg. Gyakorlatilag 525 nm felett már egyetlen ezüstsó sem fényérzékeny.

A fényképlemezeken használt ezüstsók UV-tartománybeli érzékenységének köszönhető a radioaktivitás felfedezése: Becquerel a lemezek urándarabok által okozott feketedése nyomán mutatta ki a később γ -sugárzásnak elnevezett EM sugárzási tartományt.

²⁹ Hogy mekkora ez a rész, az a nyersanyag **fényérzékenységet** fejezi ki, amit a $\rightarrow$ *szenzitometria* vizsgál. Szabványosított eljárásokkal mérik, és a filmek paramétereként tüntetik fel. A legelterjedtebbek az azonos elveken alapuló német DIN és az egyesült államokbeli ASA; a nagyobb számok nagyobb érzékenységet jelentenek.

³⁰ *Adolf Miethe* etil-vörössel oldotta meg a pánkromatikus érzékenyítést. Korábban csak a zöld tartományra sikerült érzékenyíteni; ezt **ortokromatikus** felvételnak nevezték.

³¹ A szilikon fotodiódák 190-1100 nm közötti hullámhosszú elektromágneses sugárzással gerjeszthetők. Nagyobb hullámhosszak esetén Ge, Ir-Ga-As vagy PbS alapú diódák alkalmazhatóak.

(jellemző átlómérete 0,55 cm, jellemző oldalaránya 4:3), ami az alkalmazott objektívektől még jobb teljesítményt (jobb felbontást és leképezésihiba-mentességet) kíván meg, mint az analóg fényképezőgépeknél. Ez a méret abból adódik, hogy a CCD – a filmmel szemben – lényegében merőlegesen beeső fényt igényel, mivel különben (visszaverődés és szóródás miatt) számottevő zaj keletkezik a fotodiódákon. Ezt leginkább *képmezőben telecentrikus* objektívekkel lehet elérni, amelyek csaknem párhuzamos sugárnyalábot állítanak elő. Ez azt is jelenti, hogy a képméret a tárgytávolságtól függetlenül állandó lesz, és nem célszerű túl nagyra választani.

2.2.2. A színek megjelenése a fényképeken

A pánkromatikus felvétel csak intenzitást rögzít – előnye éppen az, hogy ezt nem hullámhossz-szelektív módon teszi –, azaz „fekete-fehér”; ugyanez igaz a fotodiódákra, vagyis a digitális fényképre is. Színes fényképek előállításához igazából három felvételt kell készíteni egyidejűleg a három alapszín (kék, zöld, vörös) hullámhossztartományában³², vagy olyan megfelelő színhármasban, amiből bármely további szín kikeverhető – lényeg, hogy a teljes látható spektrum szerepeljen a felvételeken.

Alapszínnek tekinthetők mindazok a színek, amelyek a színeképben (pl. a szivárványban) megjelennek, hiszen ott valamennyi szín egyetlen adott hullámhosszú sugárzás eredménye. A további színek különböző hullámhosszú sugárzások valamilyen keverékéből jönnek létre: **összetett színek**. A teljes látható spektrum együttesen, egyenletes intenzitással adja a *fehér* színt, míg a *fekete* a sugárzás hiányát jelenti.

Egy összetett szín előállítható két vagy több monokromatikus sugárzás megfelelő arányú összetételével (*additív színkeverés*): a lila pl. a kék és a piros keveréke. Előállítható azonban úgy is, hogy egy összetett sugárzásból a megfelelő hullámhosszú összetevő(ke)t kiszűrjük, elnyeletjük (*szubtraktív színkeverés*); pl. a fehér fényből a zöld sávot kiszűrve lilát kapunk, hiszen a kék és a piros összetevő marad meg³³. Ha két szín keverése fehéret ad eredményül, akkor a két színt egymás **komplementer**ének nevezzük. A vörös, a zöld és a kék komplementerei rendre a zöldeskék, a lila és a sárga.

Gyakran e színek angol elnevezéseivel, illetve azok rövidítésével találkozhatunk a leírásokban:

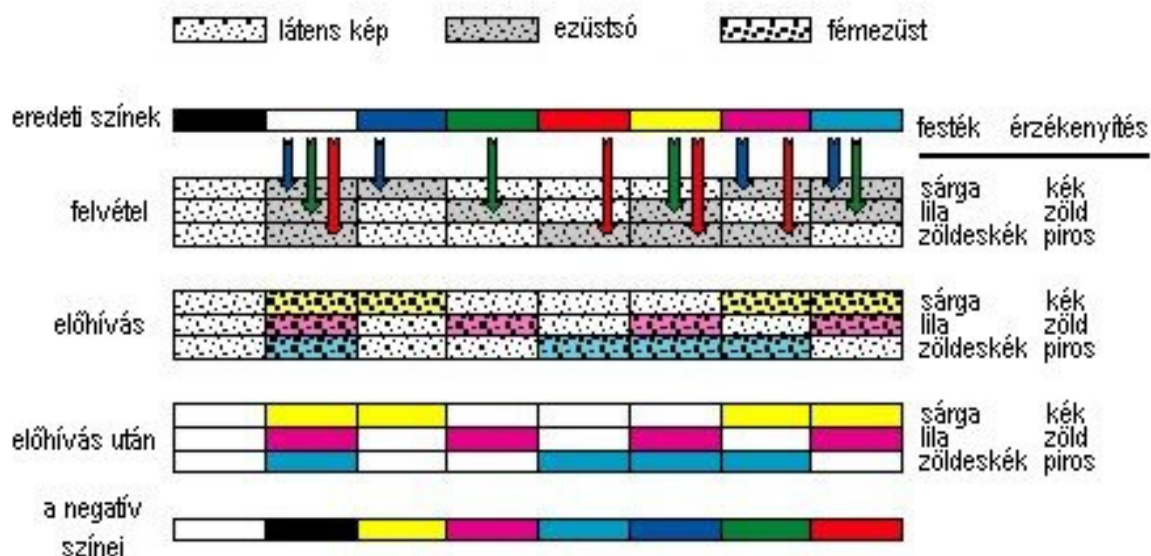
- RGB: red (vörös), green (zöld), blue (kék)
- CMY: cyan (zöldeskék), magenta (lila), yellow (sárga)

A színes filmek hordozórétegére legalább három külön emulzióréteget visznek fel (12. ábra). A problémát elsősorban az jelenti: el kell érni, hogy e rétegek csak a kívánt hullámhosszak által „exponálódjanak be”. Az ezüstsók kékérzékenysége elkerülhetetlen, ezért a legfelső mindig egy kékérzékeny réteg, alatta pedig egy kolloid ezüsből álló, a kék fényt maradéktalanul elnyelő (vagyis sárga fényt átengedő) szűrőréteg következik. Ezután következik a zöldérzékenyített, majd a vöröserzékenyített réteg. A rétegekbe az előhívás során színezéket visznek be, vagy eleve tartalmazzák ezeket³⁴; és rendre sárgára, lilára és zöldeskékre színeződnek. Az előhívás következő lépése az, hogy az ezüstszemcséket (a színezék helyben hagyása mellett) eltávolítják, így egy-egy réteg csak a kívánt hullámhossz-tartományban lesz fényelnyelő. Fehér (illetve megfelelően szabályozott színösszetételű) kopírfénnyel való átvilágítás után ebből a negatívból valós színösszetételű pozitív kép másolható át. A színezék jelenléte és a fémzüst eltávolítása miatt a színes előhívás a fekete-fehérhez képest jóval bonyolultabb kémiai folyamat.

³² Ezt a lehetőséget James Clerk Maxwell fizikus (az elektrodinamika alapegyenleteinek felállítója) fedezte fel; ő készítette Thomas Sutton fényképésszel vörös, zöld és kék színszűrőkkel három lemezre az első színes fényképet 1861-ben, amelyek egyidejűleg, megfelelő színszűrőkkel kivétítve adtak színes képet.

³³ Ahol festékeket használunk, azok színhatásukat a többi szín elnyelése által érik el; egy festő a palettáján tehát szubtraktív színkeverést tud elvégezni.

³⁴ Az előbbi az első használható színes mozgófilm, a Kodachrome (1935) technológiája, az utóbbi az Agfacolor (1936) megoldása; egyszerűbb mivolta miatt ez utóbbi vált elterjedtté.



12. ábra: A kép színeinek keletkezése a háromrétegű színesfilmen

A *színes fordítás eljárás* során az első előhívási lépés csak fekete-fehér előhívás, színezés nélkül. Színezésre, mégpedig kék, zöld és vörös színezésre csak akkor kerül sor, miután eltávolították az ezüstszemcséket és beexponálták az első előhívás után megmaradt ezüstsókat is. Így eredményül közvetlenül pozitív képet kapunk. Így működnek a diafilmek és a mozgófilmek³⁵.

A színezék színe igazából nem függ össze azzal, hogy az adott emulzióréteget milyen színű fény exponálta be. Akár az is lehetséges, hogy a látható fényen kívüli (IR vagy UV) sugárzásra érzékenyített filmet használunk (a látható fényt vagy annak egy részét kiszűrő optikával). Ez lehet egyrétegű fekete-fehér, de háromrétegű színes film is. Az ilyen módosított (eltolt) színösszeállítású felvételeket **hamisszínes felvételn**ek nevezik. A hagyományos megfestésük olyan, hogy az infravörös tartomány (pontosabban annak 700-900 nm-es része) vörösnek, a vörös zöldnek és a zöld kéknek látszik rajtuk³⁶, de másféle kombináció is megvalósítható, illetve az IR tartomány finomabb felbontásban is megjelenhet (elvileg akár mind a három réteg lehet az IR tartomány különböző részeire érzékenyítve). A távérzékelés gyakorlatában ezek igen hasznosak, mert számos esetben éppen a reflektancia látható fény tartományán kívüli része a leginkább jellemző egy-egy anyagra – például a vízre vagy a növényzetre.

A fényképezett hullámhossz adott határok közé szorítását nemcsak a film érzékenyítésével, hanem – sokkal jobban szabályozható módon – a nem kívánt tartomány kiszűrésével oldhatjuk meg. Természetesen a szűrés mindig a beeső fény intenzitásának csökkenését jelenti, de ez erős fényben akár előnyös, sőt elkerülhetetlen is lehet. A **színszűrők** megfelelő fényelnyelő festékanyagokkal szennyezett fényáteresztő ablakok, a *fényszűrők* (*akromatikus szűrők*) fényelnyelő hatása pedig a teljes spektrumra kiterjed. A színszűrőkön kívül fontos még a **polárszűrő** alkalmazása, ami csak egy adott polarizációs síkban engedi át a fényt. Ennek segítségével kiszűrhető a nem kívánt tükröződések megjelenése és bizonyos háttérfények.

A CCD szenzornál úgy oldják meg a színes felvétel problémáját, hogy minden egyes fotodiódára piros, zöld vagy kék szűrőréteget visznek fel; ilyenformán három **színcsatornán**

³⁵ Felismerhető a típus az elnevezésről: a negatív film „color”, a fordítás film „chrome” utótaggal végződik, pl. Kodacolor és Kodachrome.

³⁶ A hagyományos hamisszínes film szerkezetében az infravörös-érzékenyített réteg van legfelül, majd – a valós színes filmhez hasonlóan követi a zöld- és a vöröserzékenyített réteg. Ha el akarjuk kerülni, hogy a kék fény is beexponálja ezeket, sárga színszűrőt kell használni.

készül a felvétel a pixelek egy-egy részén; általában zöldcsatonás diódából kétszer annyi van, mint kékből és vörösből³⁷. Rögzítéskor egy külön képfeldolgozó szoftver interpolációval rendel hozzá színintenzitásokat az eltérő csatornán felvett pixelekhez; a minőség a szoftver eljárásán múlik. Egy másik lehetőség a fénysugár szétválasztása egy prizmával vörös, zöld és kék nyalábokra, amelyeket külön szenzorok észlelnek (*3-CCD-szenzoros kamera*); ilyenkor a képfeldolgozó szoftver feladata csak a három kép összeillesztése. A fotodiódák érzékenyek az UV és IR tartományokra is, tehát megfelelő szűréssel ellátott CCD-szenzorokkal hamisszínű felvételek is készíthetők.

A felvételek készítésénél figyelembe kell venni a megvilágító fény spektrális összetételét. Az 1.3 fejezetben szó esett arról, hogy az elektromágneses sugárzás intenzitásának eloszlását a hullámhossz függvényében felmérve elvileg kiszámítható a kibocsátó test hőmérséklete. Gyakorlatilag akkor van ez így, ha az észlelést hullámhossz-szelektív elnyelődési, szóródási jelenségek nem befolyásolják; a valós fények viszont gyakran ilyen jelenségek eredményei (pl. égfény), így az észlelt intenzitáscsúcs a kibocsátotthoz képest eltolódik. Mindenesetre ilyenkor is meghatározható a fényforráshoz egy elméleti hőmérsékletérték, amit **színhőmérséklet**nek neveznek³⁸. A kék égfény esetében – a rövid hullámhossz dominanciája révén – ez pl. átlagosan 10000 K, de a páratartalomtól függően változhat. A Nap színhőmérséklete pedig a valós hőmérsékleténél alacsonyabb, mégpedig annál inkább, minél alacsonyabban jár, azaz minél vastagabb léggrétegen halad át. A földfelszíni testek megvilágítása tehát erősen ingadozó színhőmérsékletű: a lenyugvó Nap 2000 K-jétől az égfény 10000 K feletti értékeiig terjedhet. Szemünk ehhez a változáshoz képes alkalmazkodni, a színes filmek azonban nem; különböző színhőmérsékletű megvilágításokhoz különböző filmeket vagy szűrőket kell használni.

³⁷ Ennek oka, hogy szemünk a zöld tartományban a legérzékenyebb, és világosság-sötétség-érzetünket a zöldtartalom befolyásolja leginkább.

³⁸ Figyelem: *hideg* fénynek éppen a *magas*, *melegnek* pedig az *alacsony* színhőmérsékletű fényt szokás nevezni!

2.3. Légifényképezés és űrfényképezés

2.3.1. A légi- és űrfényképezés kifejlődése

A fényképezés feltalálása után hamarosan megjelent az igény légifelvétel készítésére, amit ekkoriban még csak léggömbök vagy repülő sárkányok segítségével lehetett megvalósítani. Az első légifényképet 1858-ban készítette *Gaspard Felix Tournachon*, később ismertté vált művésznéven *Nadar* a francia Bièvre völgyéről. Ez a fotó sajnos nem maradt fenn, így a legrégebb ismert légifelvételnek *James Wallace Black* Bostonról készült 1860-as képe számít. A '60-as években Nadar a francia hadsereg olaszországi hadjárata számára kezdett fotózni térképezési céllal. Ezek után már számos további vállalkozó is bekapcsolódott, és a technika is fejlődött. 1889-re *George Eastman* (a Kodak cég alapítója) kifejlesztette a rugalmas celluloid filmszalagot, így meg lehetett szabadulni a nagy tömegű fotolemezektől; később, 1935-ben a színes film (Kodachrome) is az ő újításuk lett. 1897-ben *Alfred Nobel* rakétával kilőtt, ejtőernyővel visszatérő fényképezőgéppel készített légifelvételt. 1903-ban *Julius Neubranner* már galambok által hordozható, kis tömegű kamerát tudott készíteni. A repülőgép megjelenése azután újabb lendületet adott a légifotózásnak. Az I. világháborúban már természetesnek számított a légi felderítés, bár az expozíciós idő még nem volt elég rövid az éles képek készítéséhez a mozgó repülőgépről. Ezt a háború végére *Sherman Mills Fairchild* oldotta meg a lencse belső oldalára helyezett zárral. Ugyancsak ő fejlesztette ki az egyenletes térközű felvételsort biztosító intervalométert. A háború után Fairchild cége sikeres légifotó-készítő vállalkozássá fejlődött, elsősorban térképezési feladatokkal. A cég nemcsak a kamerák, hanem az azokat hordozó repülőgépek gyártásával és tökéletesítésével is foglalkozott, és később pl. az Apollo űrhajók kameráit is ők gyártották.

A II. világháború újabb lendületet adott a távérzékelési módszerek fejlesztésére; ekkor vált használható eszközzé a radar. A Pearl Harbort támadó japán légierő már megjelent a radarernyőn, csak a kezelők éppen akkor mentek el istentiszteletre, így a technika hiába működött jól. A radar és a rakétás légvédelem miatt a hidegháborús időkben a kémrepülőgépek egyre magasabbra kényszerültek, ami egyre jobb felbontást igényelt. A fényképezés területén a nagy kihívást az űrrepülés hozta az 1950-es évek végétől: új, nagyobb lépték jelent meg a Föld vizsgálata számára. A Föld körüli vagy éppen más égitestek felé vezető pályáról vissza nem térő eszközök igényelték a telemetriát és a képek digitalizált, számkódok formájában történő rögzítését, hiszen a filmet nem lehetett volna visszajuttatni. Kezdetben katódcsőcsövekkel felvett televíziós képek közvetítésével oldották meg a problémát, amelyek felbontása azonban korlátozott volt. 1969-ben azonban a Bell Laboratóriumban *George Smith* és *Willard Boyle* kifejlesztették a CCD-ket, majd megszülettek a multispektrális szkennerek, és a '70-es években az ERTS (később Landsat) műholdakon megkezdődött nem katonai, távérzékelési célú felhasználásuk is. 1981-ben a Sony Mavica kamerában a CCD megjelent a kereskedelmi forgalomban.

Részletesebb történeti leírások:

<http://employees.oneonta.edu/baumanpr/geosat2/RSHistory/HistoryRSPart1.htm>

<http://www.papainternational.org/history.html>



13. ábra: Az arnhemhi híd 1944. szeptember 10-én. A Royal Air Force felvétele

2.3.2. Légifotózási eljárások

A légifelvétel – amelyek alapján véve bármilyen fényképezőgéppel készíthetők³⁹ – a felszíni fényképekkel szemben nagyléptékű, felülnézeti áttekintést kínálnak a földfelszín egy darabjáról, azaz térképszerű nézetet adnak. A légifényképezés kezdetétől fogva megvolt az az igény, hogy térképezésre alkalmas felvételeket készítsenek. Természetesen egy kisléptékű térképpel azonos *ortogonális* vetítési eljárást a centrális (perspektivikus) vetületű fényképen nem lehet kivitelezni, de mérőkamerával lehet olyan képeket készíteni, amelyek megfelelő transzformációval viszonylag egyszerűen térképi vetületekhez igazíthatóak (3.2. fejezet).

A **mérőkamerák** (15. ábra) olyan precíz fényképezőgépek, amelyek leképezési hibái elhanyagolhatóak, illetve kalibrálással korrigálhatóak. A gép az exponálás során a beállításon kívül olyan *keretjeleket* is felvesz a kép szélére, amelyek a kép tájékozását: a kép főpontjának, illetve a fókusz távolságának a meghatározását biztosítják (a *főpont* a projekciós centrum képe a képsíkon, amely a kép középpontjával nem okvetlen esik egybe). A **mérőképek** (16. ábra) tipikus formátuma 23x23 cm, és 24 cm széles filmre készülnek.

A *függőleges* (vertikális) tengelyű felvételek készítéséhez a kamera optikai tengelyének a mindenkor *nadir* felé kell irányulnia; a gyakorlatban 3°-on belüli eltérés megengedett. Bár készítenek *ferde* (a függőlegestől 3°-nál nagyobb szögben eltérő) tengelyű felvételeket is, térképezési célokra vagy sztereopár-képzésre (lásd 3.1. fejezet) ezek nem használhatóak. A kamera függőleges helyzetét *giroszkóppal* lehet biztosítani. A mérőképen az eltérést a függőlegestől a ráfényképezett libella buborékjának helyzete jelzi.

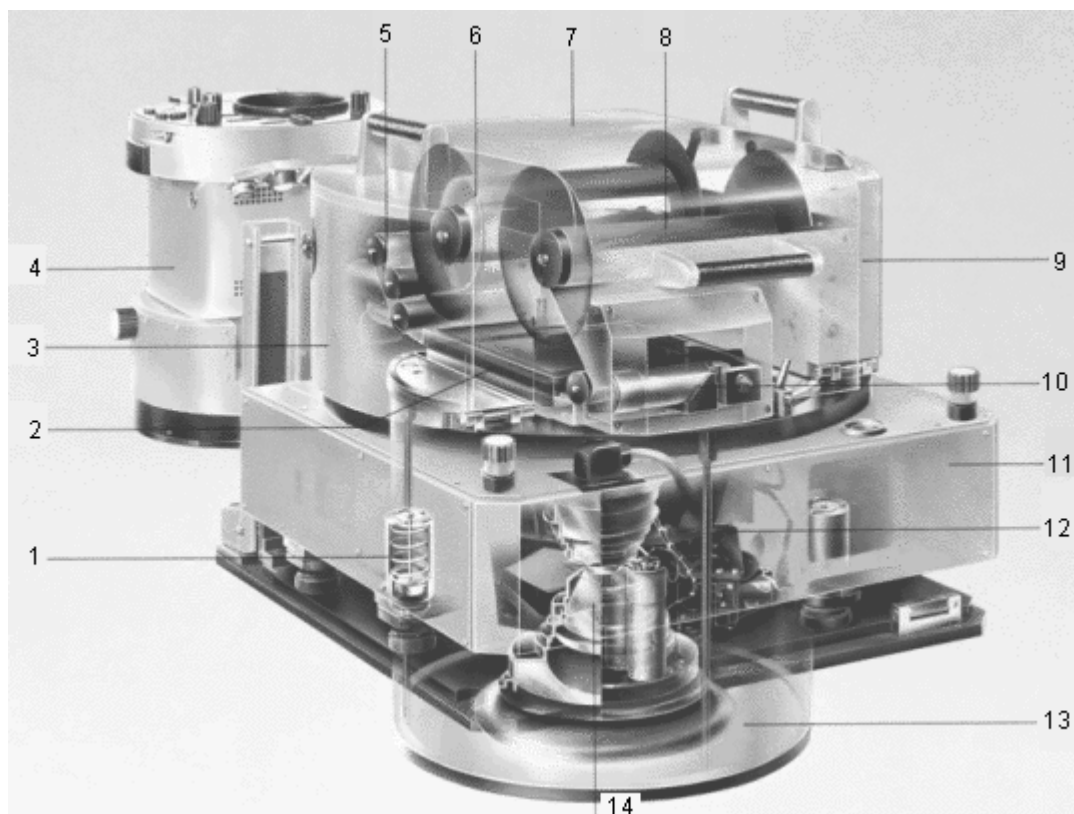
A fényképezőgéphez kapcsolt *intervalométer* szabályozza az egyes expozíciók közötti időközöket. Két, különböző nézőpontból felvett átfedő kép alkalmas arra, hogy az egyes ábrázolt objektumok távolságát (vagyis mindhárom térbeli koordinátáját) meghatározzuk, ezért a felvételesorozatot kb. 60% átfedéssel szokás készíteni.

Gyakorta használatos a **multispektrális fényképezés** technológiája, ahol vagy több, különböző szűrőkkel ellátott (és különböző érzékenységgű filmekre dolgozó) kamera készít egyidejű (szinkron) felvételeket ugyanarról a beállításról (14. ábra), vagy az optikán áthaladó sugarakat választják szét prizmákkal különböző hullámsávokra.

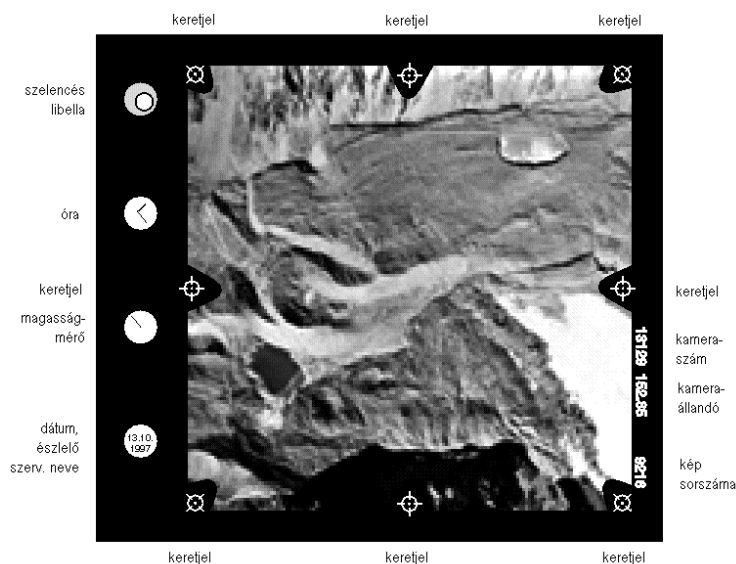


14. ábra: Balra: Linhof Aerotechnika 45 kamera. 10x12 cm-es képet készít. Jobbra: 9-lencsés multispektrális kamera

³⁹ Gyakran alkalmazzák a szokványos 35 mm-es filmre dolgozó, 24x36 mm-es képeket készítő kézikamerákat, de elterjedtek a nagyobb képméretet adó fényképezőgépek is.



15. ábra: Zeiss LMK mérőkamera részei. 1: vibrációizolációs egység, 2: a filmet leszorító lemez, 3: vezérlőegység, 4: ellenőrző egység, 5: filmbetápláló görgők, 6: filmfelcsévlő henger, 7: tároló, 8: filmlecsévlő henger, 9: filmmozgató egység, 10: előremozgás-kompenzáló, 11: talp, 12: cserélhető univerzális zár, 13: lencsetartó, 14: lencse. 23x23 cm-es képet készít

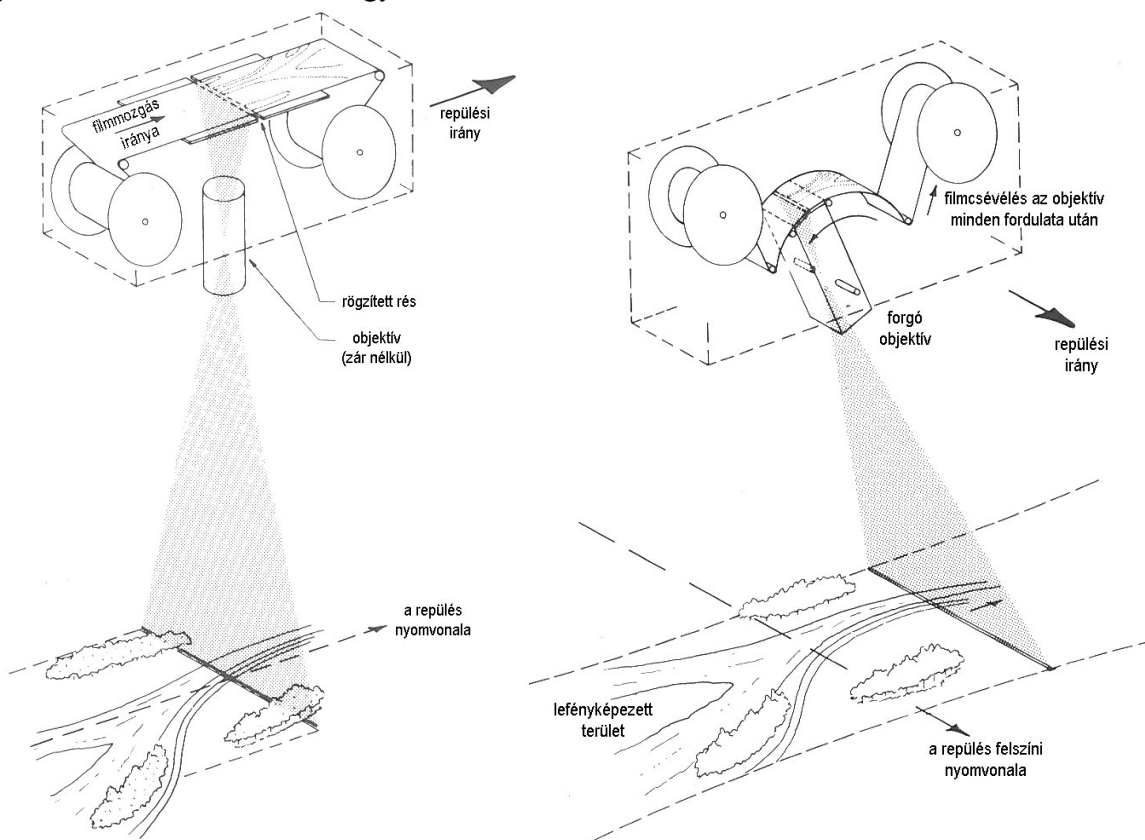


16. ábra: Egy mérőkép szokványos jelei

A fényképezőgépet hordozó repülőeszköz elvileg bármi lehet: ballon, sárkány, repülőgép, helikopter vagy más egyéb. A gyakorlatban olyan eszközre van szükség, amely képes irányt tartó, egyenletes tempójú és állandó magasságú előrehaladásra viszonylag nagy terület fölött. Ez leginkább speciálisan légifotózási célra épített repülőgéptípusokkal vagy helikopterrel biztosítható.

A képek perspektivikus vetülete bizonyos fokig már a felvételkészítés módjával is megváltoztatható. Az optikai tengely közelében a centrális vetítéssel kapott kép nem nagyon különbözik az ortogonálistól, bár távolodva a torzítás egyre nő. A látószög leszűkítésével tehát az ortogonálist jól közelítő vetületet kapunk. Ezen alapul a **szkenelés** eljárása. Ilyenkor a képet nem egyszerre veszik fel, hanem egymás után több, a képterületet teljesen lefedő részletben, általában a részleteken vonalanként végighaladva az optikával. A teljes kép – ha csak a képrészletek középpontjait tekintjük – ortogonális vetületű lesz, a középpontok között elfogadhatóan csekély torzítással.

A légifényképezés gyakorlatában hatékonysági okokból éppen a látószög kiterjesztésére törekednek. A lefényképezhető terület nagyságát a kamera látószöge és a repülési magasság határozza meg. Ezt kiterjeszteni a résfényképezés felhasználásával lehet, ami a szkeneléshez hasonló vonalankénti felvételkészítést jelent. A repülőgép előrehaladását használja ki a kamera látószögénél nagyobb, de geometriailag aránylag egyszerű egybefüggő kép rögzítésére a **folyamatos résfényképezés** technikája (17. ábra, bal). Exponáláskor a rekesz nem az egész képfelületet teszi szabaddá, hanem csak egy keskeny sávot annak közepén (a nadírpont képén át). Az expozíció mindaddig tart, amíg a repülőgép az optikával végig nem halad a lefényképezendő terület felett; közben a filmet folyamatosan csévélik előre. A filmfelület egy adott pontjára eső expozíciós idő a részélességnek és a csévézés sebességének a hányadosa. Ha torzítatlan és hézagmentes képet akarunk kapni, akkor a csévézési sebességet a repülőgép haladási sebességének és az optika nagyításának a szorzatára kell szabályozni. Az így kapott kép jó közelítéssel *hengervetületű* lesz, a repülési iránnyal párhuzamos tengellyel. A kép geometriai helyességének tehát kulcskérdése az állandó repülési sebesség és magasság biztosítása. A **panorámafényképezés** (17. ábra, jobb) is a résfényképezés sajátos technikája, ahol az optika az exponálás során elfordul a film előtt; itt a felvett vonalak iránya a repülés irányától független, bármilyenre választható (célszerűen arra merőleges). Természetesen ilyenkor a kép sem egy sík felületen keletkezik, vagyis a filmet homorú felületűvé kell feszíteni.

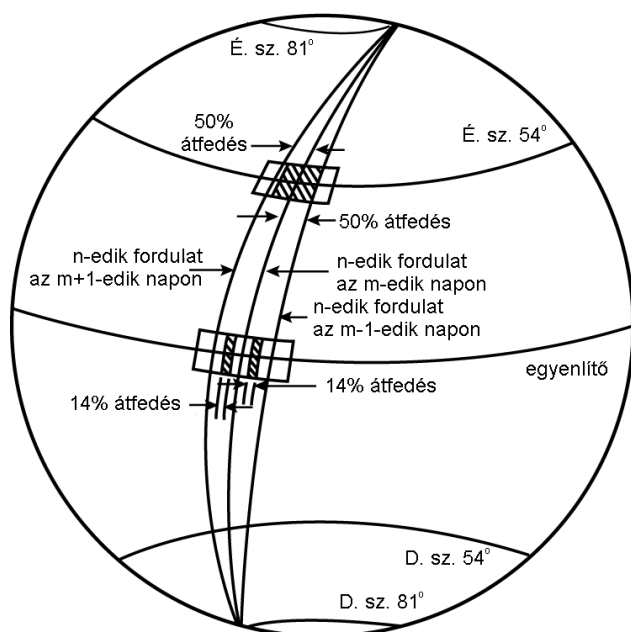


17. ábra: A folyamatos résfényképezés (bal oldal) és a panorámafényképezés (jobb oldal) eljárása

2.3.3. Távérzékelési műholdak és érzékelők

A távérzékelés műholdas technológiájának kifejlesztése – a légifényképezéshez hasonlóan – katonai célból, kéműholdakon vette kezdetét, és csak később követte ezt a polgári-tudományos célú felhasználás, korlátozott felbontással. A *földvizsgáló műholdak* fellövése az 1970-es években kezdődött, elsőként a NASA részéről (LANDSAT), később azonban más országok is készítettek ilyeneket (a fontosabbakat az 1. táblázat tartalmazza). Ezek általában közel kör alakú⁴⁰ és közel poláris **napszinkron** pályán keringenek (18. ábra). Ez azt jelenti, hogy a felszín valamennyi pontja fölé az ottani helyi idő szerint mindig azonos időpontban érkezik a műhold, így a megvilágítás szöge is azonos lesz, ami a felvételek egységesítése szempontjából igen előnyös. A legkedvezőbbek a 600-800 km magasságú pályák, amelyek esetében a szükséges pályahajlás 98° körüli (azaz közel poláris és retrográd⁴¹), és kb. 96-100 perces keringési időt adnak. A növekvő magassággal a keringési időn túl a szükséges pályahajlás is növekszik, ami előnytelen a térbeli és az időbeli lefedettség, valamint a felbontás szempontjából is. A pályák így sem biztosítják a teljes Föld lefedését, hiszen a sarkok és a pályahajlástól függő távolságú környékük fölött ezek a műholdak sohasem haladnak át. A sarkok vizsgálatára külön műholdakat használnak, amelyek pályája valóban poláris, de így nem napszinkron⁴², és akár erősen elliptikus is lehet, a sarkok fölötti földközelséggel (*perigeummal*).

A térbeli lefedésen azt értjük, hogy a keringések során felvett sávok a földfelszín mekkora részéről adnak információt. Poláris pályán a teljes lefedés is megvalósítható. A fentebbi napszinkron pályák a sarkok körüli holttéren kívül megfelelő átfedéseket biztosítanak a sávok között; az átfedés az egyenlítőtől távolodva növekvő mértékű. Az időbeli lefedésen az adott terület fölé való visszatérés ciklusát, az újabb felvétel készítésének lehetőségét értjük; ez a fentebbi pályáknál 2-3 hét között van.



18. ábra: A LANDSAT műholdak pályája a Föld felett. A LANDSAT 5 esetében a szkennelt sáv szélessége 185 km, a keringési magasság 705 km, a pályahajlás 99° , a visszatérési ciklus 16 nap (233 fordulat után), az egyenlítő fölötti áthaladás helyi ideje 9:45.

Az említett pályákon kívül még egy kitüntetett pálya, a **geostacionárius** bír jelentőséggel. Az egyenlítő fölött, annak síkjában, kb. 35800 km magasságban lehetséges olyan körpályára állni, amelyen a műhold állandóan a földfelszín ugyanazon pontja felett tartózkodik. Ez főként a távközlési műholdak számára előnyös (ahol a nagy ma-

gasság nem akadály), de egyes meteorológiai műholdak is ilyen pályán keringenek.

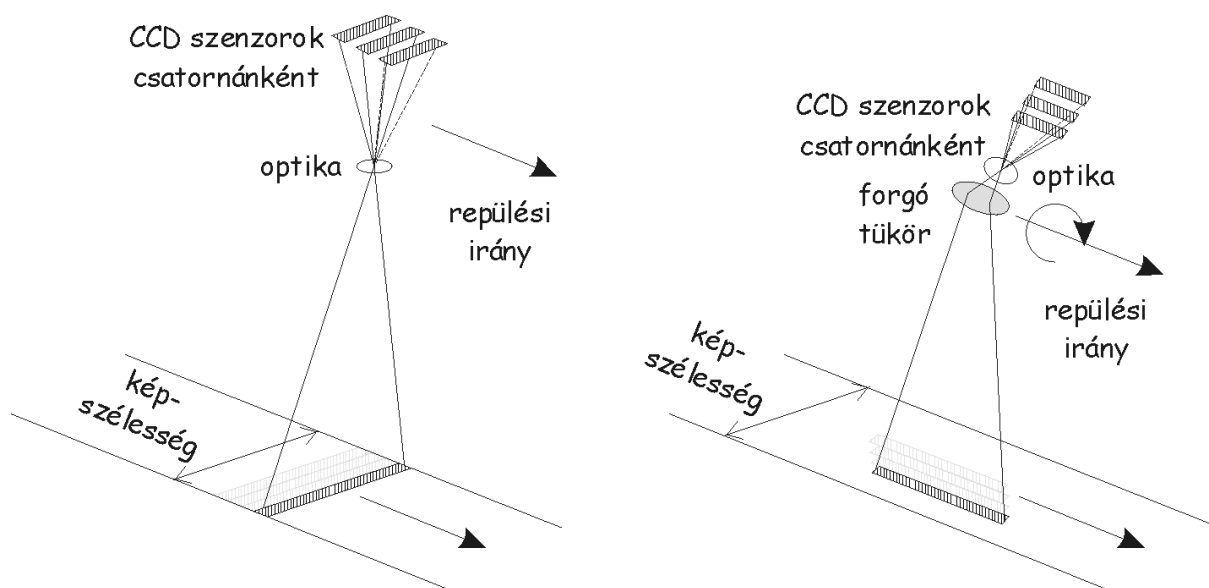
A Földre vissza nem térő űreszközökön gondoskodni kell a begyűjtött adatok rádiós továbbításáról, illetve az eszköz távirányításáról: ezt **telemetria** útján biztosítják. Telemetriát földi körülmények között is gyakran használnak, pl. meteorológiai ballonokon, oceanográfiai

⁴⁰ Az eltérés a Föld nem egészen gömb alakjából fakad.

⁴¹ A *poláris* pálya a sarkok fölött áthaladó pályát jelent. A *retrográd* pálya azt jelenti, hogy a keringési irány a Föld forgásirányával ellentétes.

⁴² A sarkokon nincsenek napszakok, a megvilágítás évszakosan változik (nyáron világos, télen sötét).

mérőbójákon stb. Ehhez a műszerek regisztrátumának digitális formájúnak kell lennie. A hagyományos fényképezés helyett tehát az űrben kezdetben televíziós kamerákat, majd CCD szenzorokat alkalmaztak. Ma már ez utóbbiak teljesítménye olyan jó, hogy a légi felvételeknél is átveszik a főszerepet.



19. ábra: Az optikai-elektronikus és az optikai-mechanikus szkennerek leképezésének vázlata

A műholdak általában több modulból állnak; ezek részint az energiaellátásról, részint az adatgyűjtésről (szenzorok), részint pedig a Földdel való kapcsolattartásról (telemetriai egység) gondoskodnak. Egy műholdra általában többféle szenzort is telepítenek különféle célfeladatokra kialakított érzékelési tartománnyal, felbontással és érzékenységgel.

Az optikai szenzorokban kétféle leképezési eljárás használatos (19. ábra). Mindkettő a részfényképezéshez hasonló módon exponál. Az **optikai-elektronikus szkennerek** (amilyen a SPOT műholdakon van) a képet az előrehaladás irányára merőleges soronként veszi fel, az egyes sorok pixeleit egyidejűleg rögzítve, a műhold előrehaladása közben mintegy végigsöpörve a képfelületen (angolul ezért „pushbroom scanner” [partvis beolvasó] néven is emlegetik). Az **optikai-mechanikus szkennerek** (amilyen a LANDSAT műholdakon van) éppen fordítva, az előrehaladás irányával párhuzamos sorokban dolgozik, és egy, a sorokkal párhuzamos tengely mentén mechanikusan elforduló tükör segítségével vált sort.

A többcsatornás, nem páncromatikus felvételekhez a sugarakat prizma segítségével bontják megfelelő sáv szélességű részekre. A *multispektrális* felvételek $0,1\ \mu\text{m}$ körüli sáv szélességekkel készülnek (a legtöbb esetben 4-7 csatornán), de 1999 óta $0,01\ \mu\text{m}$ körüli sáv szélességű, több 10 csatornás⁴³ *hiperspektrális* érzékelőkkel dolgozó műholdak is vannak. Ez utóbbi érzékelőket **képalkotó spektrométereknek** is szokás nevezni, hiszen hullámhosszbeli felbontásuk már anyagjellemző színekp vonalak azonosítását is lehetővé teszi. Jellemzőjük, hogy sávjaik hézagmentesen (sőt átfedésekkel) fedik le a spektrum választott (többnyire látható és közeli infra) tartományait. Az előállított képet szokásos megjelenítési módja nyomán „adatkockának” (datacube) is szokták nevezni, amelynek képsíkra merőleges harmadik dimenziója a csatornák hullámhossza, és e tengely mentén az egyes pixelekhez tartozó színekpeket láthatjuk.

⁴³ A Jet Propulsion Lab által 1987-ben elkészített, egy módosított U2 repülőgép fedélzetén repülő AVIRIS pl. 224 CCD-szenzorral fedi le a $0,38 - 2,5\ \mu\text{m}$ -es intervallumot, 20 m-es térbeli felbontással. A 2000. óta az EO-1 műholdon működő Hyperion szenzor 220 csatornán, $0,4 - 2,5\ \mu\text{m}$ -es intervallumban, 30 m felbontással készít felvételeket.

A felbontás korlátja a CCD szenzor fotodiódáinak sűrűsége. A műholdfelvételek felbontóképességét a leképezés méretarányának megfelelően úgy adják meg, hogy a képen egy pixel hány m-es oldalú négyzet alakú felszíni területdarabot ábrázol. Ez természetesen a látószögtől is függ, így a szkennelt vonal végein a vonallal párhuzamos irányú felbontás gyengébb, mint a közepén.

<i>műhold</i>	<i>szenzor és csatorna</i>	<i>pixelméret</i>	<i>sáv</i>
Landsat 1 (ERTS-1) 1972. július 23. – 1978. január 6. Landsat 2 1975. január 22. – 1982. február 25. Landsat 3 1978. március 5. – 1983. március 31.	MSS 4 (zöld)	80 m	
	MSS 5 (vörös)	80 m	
	MSS 6 (közeli infra)	80 m	
	MSS 7 (közeli infra)	80 m	
Landsat 4 1982. július 16. – 2001. június 15. Landsat 5 1984. március 1. – (Am. Egy. Áll.)	TM 1 (kék)	30 m	0,45 – 0,52 µm
	TM 2 (zöld)	30 m	0,52 – 0,60 µm
	TM 3 (vörös)	30 m	0,63 – 0,69 µm
	TM 4 (visszavert infra)	30 m	0,76 – 0,90 µm
	TM 5 (visszavert infra)	30 m	1,55 – 1,75 µm
	TM 6 (hőinfra)	120 m	10,40 – 12,50 µm
	TM 7 (visszavert infra)	30 m	2,08 – 2,35 µm
Landsat 7 1999. április 15. –	ETM+ 1-5 és 7: ua. m. TM 1-5 és 7		
	ETM+ 6	60 m	10,40 – 12,50 µm
	ETM+ 8 (pánkromatikus)	15 m	0,52 – 0,90 µm
IRS 1A 1988 – 1992 IRS 1B 1991 – 1999 (India)	LISS 1-2 1. kék	72,5 m és 36,25 m	0,45 – 0,52 µm
	LISS 1-2 2. zöld	72,5 m és 36,25 m	0,52 – 0,59 µm
	LISS 1-2 3. vörös	72,5 m és 36,25 m	0,62 – 0,68 µm
	LISS 1-2 4. közeli infra	72,5 m és 36,25 m	0,77 – 0,86 µm
IRS 1C 1995. december 28. – IRS 1D 1997. szeptember 28. – IRS P6 2003. október 17. –	pánkromatikus	5,8 m	
	LISS 3-4 zöld	23,7 m és 5,8 m	0,52 – 0,59 µm
	LISS 3-4 vörös	23,7 m és 5,8 m	0,62 – 0,68 µm
	LISS 3-4 közeli infra	23,7 m és 5,8 m	0,77 – 0,86 µm
	LISS 3 közepes infra	23,7 m	1,55 – 1,75 µm
SPOT 1, 2, 3 1986, 1990, 1993 (Franciaország)	HRV pánkromatikus	10 m	0,50 – 0,73 µm
	HRV B1 (zöld)	20 m	0,50 – 0,59 µm
	HRV B2 (vörös)	20 m	0,61 – 0,68 µm
	HRV B3 (közeli infra)	20 m	0,78 – 0,89 µm
SPOT 4 1998. március	HRV monospektrális	10 m	0,61 – 0,68 µm
	HRV B1, B2, B3: ua. m. SPOT 1, 2, 3		
	HRV B4 (közepes infra)	20 m	1,58 – 1,75 µm
SPOT 5 2002. május	HRV pánkromatikus	2,5-5 m	0,48 – 0,71 µm
	HRV B1, B2, B3, B4: ua. m. SPOT 4		
RESURS-03 1994. november 4. – RESURS-04 1998. július 10. – (Oroszország)	MSU-E I.	30-40 m	0,5 – 0,6 µm
	MSU-E II.	30-40 m	0,6 – 0,7 µm
	MSU-E III.	30-40 m	0,8 – 0,9 µm
	MSU-SK I.	137 m	0,5 – 0,6 µm
	MSU-SK II.	137 m	0,6 – 0,7 µm
	MSU-SK III.	137 m	0,7 – 0,8 µm
	MSU-SK IV.	137 m	0,8 – 1,0 µm
	MSU-SK V.	548 m	10,4 – 12,6 µm
	MSU-SK VI. (csak R-04)	137 m	3,5 – 4,1 µm

<i>műhold</i>	<i>csatorna</i>	<i>pixelméret</i>	<i>sáv</i>
MIR-Priroda (űrállomás) 1996 – 2001 (Németország – Oroszország)	MOMS-2P 1 (kék)	18 m	0,44 – 0,505 μm
	MOMS-2P 2 (zöld)	18 m	0,53 – 0,575 μm
	MOMS-2P 3 (vörös)	18 m	0,645 – 0,68 μm
	MOMS-2P 4 (közeli infra)	18 m	0,77 – 0,815 μm
	MOMS-2P 5 (páncrom.)	6 m	0,52 – 0,76 μm
IKONOS 1999. szeptember 24. (üzleti célú, GeoEye)	páncromatikus	1 m	0,45 – 0,90 μm
	kék	4 m	0,445 – 0,516 μm
	zöld	4 m	0,506 – 0,595 μm
	vörös	4 m	0,632 – 0,698 μm
	közeli infra	4 m	0,757 – 0,853 μm
Quickbird 2001. október 18. (üzleti célú, DigitalGlobe)	páncromatikus	0,6 – 0,7 m	0,45 – 0,90 μm
	kék	2,4 – 2,8 m	0,45 – 0,52 μm
	zöld	2,4 – 2,8 m	0,52 – 0,60 μm
	vörös	2,4 – 2,8 m	0,63 – 0,69 μm
	közeli infra	2,4 – 2,8 m	0,76 – 0,90 μm
KOMPSAT 1 1999. (Dél-Korea)	EOC (páncromatikus)	6,6 m	0,51 – 0,73 μm
	OSMI	1 km	0,4 – 0,9 μm 8 csatornával
ALOS 2006. január 24. (Japán)	PRISM (páncromatikus)	2,5 m	0,52 – 0,77 μm
	AVNIR-2 1. kék	10 m	0,42 – 0,50 μm
	AVNIR-2 2. zöld	10 m	0,52 – 0,60 μm
	AVNIR-2 3. vörös	10 m	0,61 – 0,69 μm
	AVNIR-2 4. közeli infra	10 m	0,76 – 0,89 μm
	PALSAR L (radar)	10 m	23,6 cm

1. táblázat: Páncromatikus és multispektrális szenzorokkal felszerelt fontosabb földvizsgáló távérzékelési műholdak adatai

2.4. A hullámok aktív alkalmazása: radar, lidar, szonár

2.4.1. A radar működési elve

A mikrohullámok tartományában a légkör nemcsak elnyelési sávokat nem tartalmaz, hanem már a szóródási jelenségek is elhanyagolhatóak (lásd 7. ábra), így ideális, időjárási viszonyoktól (párától, felhőzettől) független észlelési tartományt kínál. A természetes mikrohullámú sugárzások intenzitása azonban már általában kicsiny ahhoz, hogy ezekre támaszkodjunk a módszereinkkel; sokkal célszerűbb az észlelőberendezés által gerjesztett hullámokkal dolgozni.

A **radar** szó a *radio aircraft detection and ranging* (rádiós légijármű-felderítés és távolságmérés) rövidítéséből önállósodott. Az eljárás lényege egy rövid elektromágneses hullám-impulzus kibocsátása egy antennával, majd a visszaverődés érzékelése. A kibocsátás és az észlelés között eltelt idő a távolságra, a vett jel amplitúdója a reflektáló tárgy reflexiós képességére, a hullámhossz megváltozása (Doppler-hatás) a vevő és a tárgy relatív sebességére enged következtetni.

A hullámgerjesztésre *magnetront* használnak. Ez egy vákuumcső, amelyben a központi katódot egy hengeres, üregekkel ellátott anód vesz körül; a katódból kilépő és körpályán keringő, az anód üregeivel rezonáló elektronok bocsátják ki a mikrohullámú sugárzást. A katódot az elektron-kibocsátáshoz fel kell forrósítani. A sugárzás hullámhossza, minthogy a hőmérséklettől függ, nem teljesen állandó a működés során. A rövid impulzuskeltésre régebben nagy energiájú kapcsolóként használható magasfeszültségű elektroncsövet, *thyatron*t, újabban félvezető kapcsolókat alkalmaznak.

A képkészítésre szánt jel kibocsátása és vétele rúd alakú dipol-**antennákkal** történik. Az adóantenna elhelyezése határozza meg az adás polarizációját. A távérzékelési alkalmazásoknál kétféle polarizáció használatos: horizontális (H) és vertikális (V). A visszavert jelek szintén polarizáltak, de az adáshoz képest a polarizáció síkja elforgatódhat. A vevőantenna szintén lehet H vagy V elhelyezésű, de nem szükségszerű, hogy ugyanolyan legyen, mint az adó. Ha ugyanolyanok (HH vagy VV), akkor **hasonló polarizációjú** felvétel készül; az ellentétes (HV vagy VH) elrendezés pedig a **keresztpolarizáció** esete.

A vevőberendezés egy, az antennához kapcsolt, nyitott *elektromos rezgőkör*, amely kiszűri és felerősíti az érzékelni kívánt hullámhossztartományban érkező jeleket.

A rezgőkör egy induktív és egy kapacitív impedanciájú (ellenállású) tagból álló áramkör; az induktív tag egy, az antennához kapcsolódó tekercs, a kapacitív tag pedig egy (vagy több) kondenzátor. Ha elektromos impulzus éri ezt (elektromos áramot indítunk meg valamilyen módon egy rövid ideig), akkor a kondenzátor azonnal feltöltődik, míg a tekercs csak jóval lassabban képes az áramot át bocsátani; ezt a kondenzátorból veszi fel, amely ez alatt kisül (elvezíti töltését). A tekercsen átfolyó áram azonban mágneses mezőt hoz létre, amely áramot indukál az után is, hogy a kondenzátor kisült; ez viszont a kondenzátor feltöltődéséhez fog vezetni, csak hogy az előző állapottal ellentétes polarizációval. A folyamat mindaddig ismétlődik (oda-vissza), amíg az energia nem disszipálódott. Az időegység alatti állapotváltozások száma jelenti a kör saját rezgésszámát, amely legkönnyebben a tekercs menetszámának, vagy a kondenzátor kapacitásának változtatásával változtatható meg (hangolás). Ha a rezgőkört ismételtelen elektromos impulzusok érik, akkor a benne tárolt energia mennyisége akár nőhet is. A körben akkor keletkezik a legnagyobb feszültség, ha az antennából érkező jel rezgésszáma a kör saját rezgésszámával megegyezik, vagyis rezonancia lép fel; az újabb impulzusok mindig hozzáadódnak a pillanatnyi feszültséghez. Hangolással ez a helyzet előállítható. A körben indukálódó áramtöbbletet ilyenkor egyenirányítva lehet kivezetni, majd tranzisztorokkal erősítve a regisztráláshoz megfelelő jellé alakítani.

A regisztrátum egy-egy impulzus nyomán egy-egy idő függvényében felvett visszavert intenzitásgörbe. A későbbi impulzuscsúcsok egyre távolabbról érkező visszaverődéseket jelentenek. Kép úgy alkotható belőlük, hogy a rezgőkörből kivezetett áramot egy katódsugárcsővel fényvé alakítva (TV-képszerűen) soronként képernyőre vagy fotopapírra vetítjük. Ez annyit jelent, hogy a kép egyik szélétől a másik felé haladva a vevőtől egyre távolabbi objektumok reflexiói jelennek meg. Egy radarfelvétel tehát úgy tekintendő, hogy a kép nézete nem felel meg a felvétel valódi nézőpontjának, amely valójában a képhez képest oldalirányban helyezkedik el. A távérzékelési gyakorlatban leginkább **SLAR**, vagyis **oldalra néző radarfelvételeket** [side-looking airborne radar] készítenek, amelyek szubhorizontális nézőpontja közelítőleg felülnézeti képeket eredményez. Egy beállításról készülhet egyidejűleg felvétel többféle hullámhosszon, illetve többféle polarizációval, amelyekből hármat kiválasztva a multispektrális szkennelés csatornáihhoz hasonlóan *hamisszínes radarkép* állítható össze.

A használatos mikrohullám-sávtartományokat a kezdeti (katonai) gyakorlatban meglehetősen önkényesen és országról országra változó értelmezéssel osztották fel és betűzték meg; ezek a jelölések (legalább részben) később is fennmaradtak. A legáltalánosabban ismert sávokat mutatja a 2. táblázat.

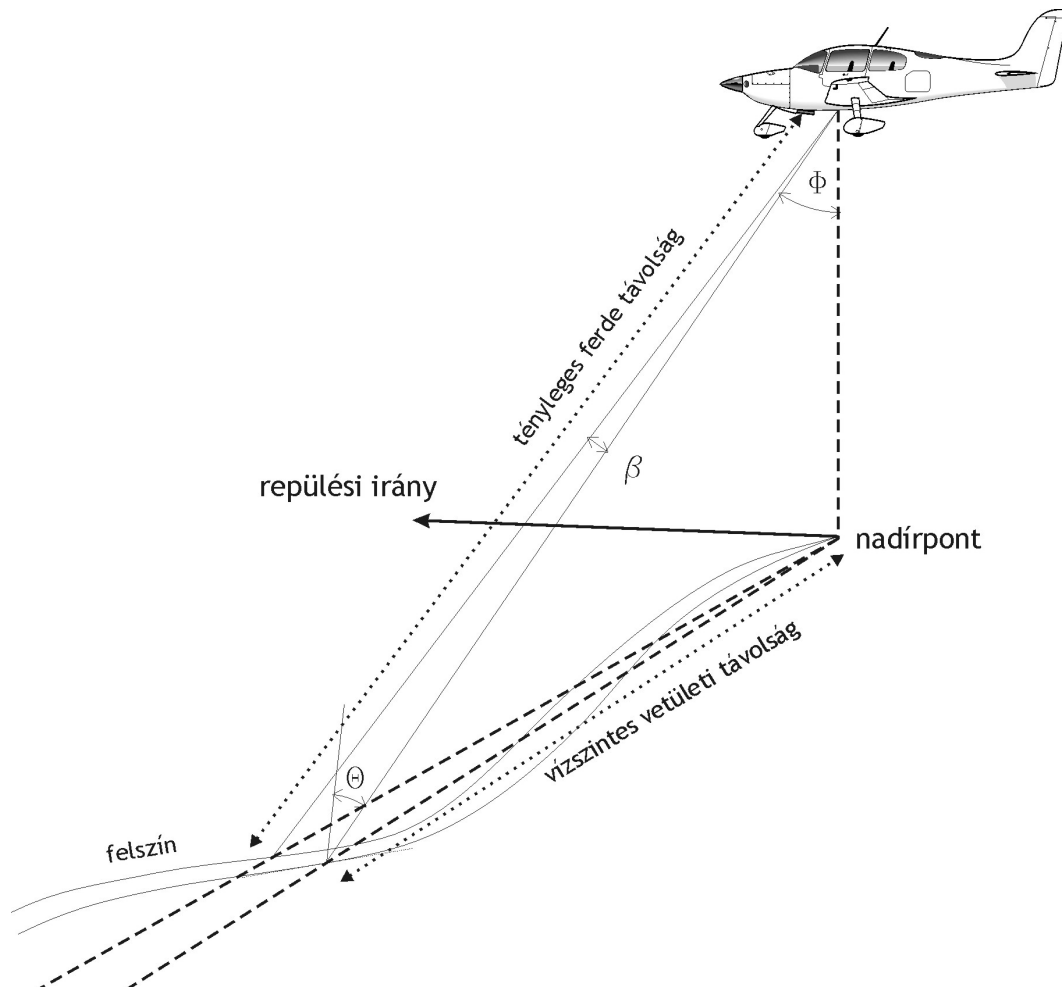
<i>sáv neve</i>	<i>hullámhossz</i>	<i>frekvencia</i>
K	0,7 – 1 cm	30 – 40 GHz
X	2,4 – 4,5 cm	7 – 12 GHz
C	4,5 – 7,5 cm	4 – 7 GHz
L	15 – 30 cm	1 – 2 GHz

2. táblázat: A radar-távérzékelésben használatos csatornák

Az oldalra néző radarral kapcsolatos legfontosabb geometriai paramétereket mutatja a 20. ábra:

- Nyalábszélesség (β): az antennából kisugárzott, elliptikus, parabolikus és/vagy hiperbolikus tükrök segítségével irányított hullámnyaláb nyílásszöge; a képletekben általában radiánban használatos mennyiség.

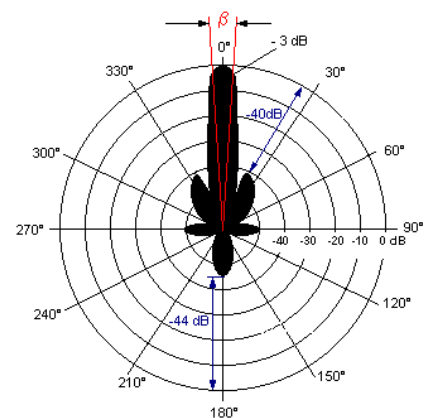
- Nézőszög (Φ): az adott pont irányának eltérése a függőlegetől ($90^\circ - \Phi$ a behajlási szög).
- Beesési szög (Θ): adott pontban a sugárterjedés iránya és a reflektáló felszín normálisa (a beesési merőleges) által bezárt szög.



20. ábra: Az oldalra néző légiradar geometriája

2.4.2. A radar érzékenysége és felbontóképessége

Ezen tulajdonságokat az alkalmazott hullámhosszon kívül leginkább az antenna paraméterei: az **antennanyereség** vagy erősítési tényező, valamint az **apertúra** vagy antennafelület (a szokványos rúd alak esetén lényegében az antennahossz) határozzák meg. A legtöbb antenna anizotróp sugárzó vagy elnyelő, azaz bizonyos irányokba vagy irányokból jóval több energiát ad le vagy vesz fel, mint másfelé vagy másfelől. Az antennanyereség a kitüntetett irányban leadott vagy felvett teljesítmény és a maximális leadott vagy felvett teljesítmény hányadosa. Többnyire a hányados 10-es alapú logaritmusa a 10-szeresével szokás megadni (mértékegysége a decibel, dB). Az antennanyereség irány szerinti eloszlását az *antenna-karakterisztika* vagy *jelleggörbe* segítségével lehet ábrázolni (21. ábra). A jelleggörbe -3 dB feletti szakaszát (vagyis a



21. ábra: Antenna-karakterisztika és nyalábszélesség

hányados 1/2 feletti értékeihez tartozó szögtartományt, amerre a térerősség legalább a fele a maximálisnak) szokás nyalábszélességnek tekinteni.

A kibocsátott és a felvett teljesítmény viszonyát a **radaregyenlet** írja le:

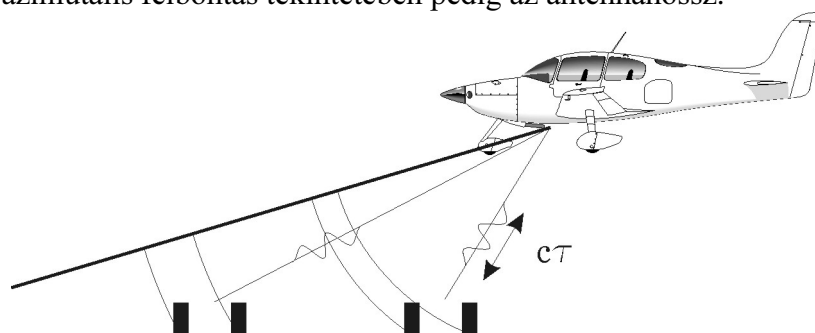
$$P_{\text{vevő}} = \frac{P_{\text{adó}} \times G_{\text{adó}} \times A_{\text{eff}} \times \sigma \times F^4}{4\pi \times R_{\text{adó}}^2 \times R_{\text{vevő}}^2}$$

ahol P a teljesítmény, G az antennanyereség, A_{eff} az effektív apertúra, σ a céltárgy szórási együtthatója (radarkeresztmetszete), F a terjedési együttható (a terjedési út menti veszteségeket leíró, 0 és 1 közötti tényező), R pedig az antennák és a céltárgy távolsága. Mivel általában az adó és a vevő egy helyen működik, a két R tényező együtt R^4 -nek írható, azaz a visszanyert energia a távolság negyedik hatványával fordítottan arányos.

A hullámhossz (λ) is összefüggésben áll az antennanyereséggel a $G = 4\pi \cdot A_{\text{eff}} / \lambda^2$ egyenlet szerint. A nyalábszélesség (β) pedig egyenesen arányos a hullámhosszal, és fordítottan arányos az apertúrával: $\beta = k \cdot \lambda / A_{\text{eff}}$. A k tényező értéke antennafüggő, jellemzően 1,22 (70°) körüli.

A nyalábszélesség és az antennahossz fordított arányossága a diffrakció törvényszerűségeiből következik. Az antenna-karakterisztika analóg a fény esetében megjelenő Airy-gyűrűvel a teleszkópban. A polarizált mikrohullám, amely az antennából kilép vagy azt eléri, síkhullámnak tekinthető; ez a Fraunhofer-diffrakció esete.

A felbontás tekintetében két irány különböztetendő meg: a sugárterjedés irányával párhuzamos (**irány menti felbontás**) és az arra merőleges (**azimutális felbontás**). A tényleges irány (amely a felszín síkjával szöget zár be) menti felbontás az impulzus hosszától ($c\tau$, ahol c a fénysebesség, τ az impulzus időtartama) függ: ha két tárgy a sugárterjedés irányában közelebb van egymáshoz, mint az impulzushossz fele, akkor a távolabbiról a visszaverődés hamarabb megkezdődik, mint ahogy a közelebbiről befejeződné, így a regisztrátumban a két reflexió összemosódik. A felszín síkjában érvényesülő irány menti felbontás a $R_i = c\tau / 2 \cos \Theta$ képlet szerint számítható, ahol Θ a beesési szög (vízszintes felszín esetében a nézőszöggel azonos értékű), R pedig az a mérethatar, amely alatt már nem különülnek el a tárgyak. R_i értéke a nadírpontban a legnagyobb, azonos a tényleges irány menti felbontással ($c\tau / 2$), attól távolodva egyre csökken. Az azimutális felbontás a nyalábszélességtől és a távolságtól függ; a sugárnyaláb a kibocsátás helyétől távolodva egyre inkább széthúzódik. Értéke lényegében az adótól mért távolságnak (D) és a (radiánban adott) nyalábszélességnek a szorzata; maga a nyalábszélesség pedig a hullámhossz (λ) és az antennahossz (A) hányadosa, így $R_a = D\lambda / A$. A technikailag befolyásolható tényezők tehát az irány menti felbontás tekintetében az impulzus hossza, az azimutális felbontás tekintetében pedig az antennahossz.



22. ábra: A beesési szög, az impulzushossz és a leképezett objektumok látszólagos távolságának összefüggése

A technikai okokból nem növelhető antennahosszból fakadó felbontási korlát áthidalására fejlesztették ki a **szintetikus antennahosszú radart (SAR, synthetic aperture radar)**. Az eljárás lényege, hogy folyamatos, adott hullámhosszúságú, több foknyi nyalábszélességű jelkibocsátás mellett jóval nagyobb sávszélességben veszik a visszavert jeleket, és rögzítik a vett jelnek a repülőgép mozgásából fakadó (Doppler-hatású) hullámhossz-eltolódását. Ez úgy érhető el, hogy a kibocsátott és a vett jel keveréke lesz az észlelet, ami egymással interferál, és

az interferencia-mintázatot rögzítik. Az így kapott interferenciakép rögzíthető mágnesszalagon vagy – megfelelő átalakítás után – fényképként is. Így lényegében egy radar-hologramot állítunk elő, amely lézerefénnyel való átvilágítás során válik értelmezhető képpé. A szintetikus antennahossz annak a repülőútnak a hossza lesz, amely során a kép egy pontjához felhasznált adatok gyűjtését folytatták. Az elméleti azimutális felbontás közelítőleg a tényleges antennahossz fele.

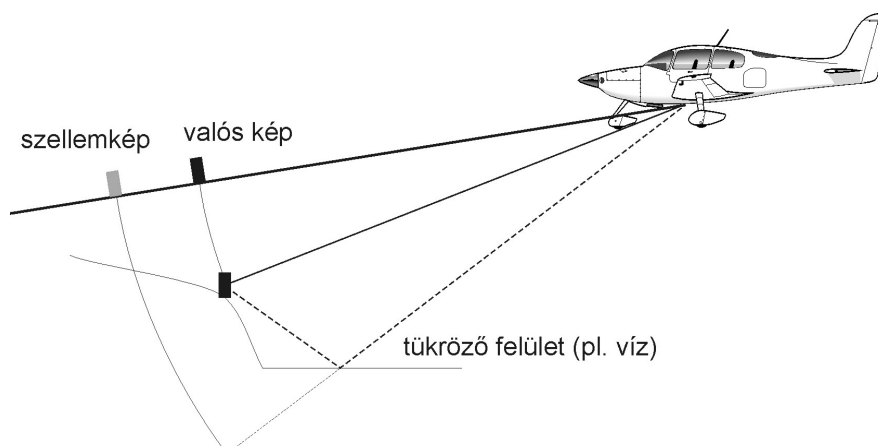
A világűrből felvett radarképek mind SAR technológiával készülnek; gyakorlatilag csak a SAR nyújt megfelelő felbontást.

2.4.3. A radarképet befolyásoló tényezők

A mikrohullámok visszaverődése alapvetően a fényhez hasonlóan a tárgyak felszínéről érkezik, de a hosszabb hullámhossz nagyobb „behatoló-képessége” miatt a szerepet játszó felszíni zóna nagyobb, a hullámhosszal összemérhető vastagságú. Az, hogy egy adott céltárgy milyen „fényesnek” fog mutatkozni a regisztrátumban, elsősorban e felszíni zóna *dielektromos állandójától* vagy **relatív permittivitásától** függ. Az állandó értéke a rezgésszám függvénye; a mikrohullámok rezgésszámtartományában ez már (a látható fényhez képest) közel áll a gyakorlatban használt váltakozó árammal szemben érvényesülőhöz. A jó elektromos vezetőképeségű felületek a hullámokat nagyrészt visszaverik vagy szórják, míg a szigetelőanyagok (rossz vezetők) jelentős részben elnyelik. Így pl. a víz magas, a legtöbb földfelszíni objektumét egy nagyságrenddel meghaladó permittivitása miatt a nedvesség jelentősen növeli a *radarfényességet*.

A tárgyak **mérete** is jelentős szerepet játszik. A hullámhosszat jelentősen meghaladó átmérőjű tárgyakról a visszaverődés dominál, míg az annál kisebb átmérőjűeknél a szóródás. A hullámhosszal közel azonos méretű, mágnesezhető testek esetében rezonanciajelenség léphet fel; ez a sugárzás csaknem tökéletes elnyelését eredményezheti. Ezt használják ki az álcázott objektumok (pl. kémrepülőgépek) bevonatainál is.

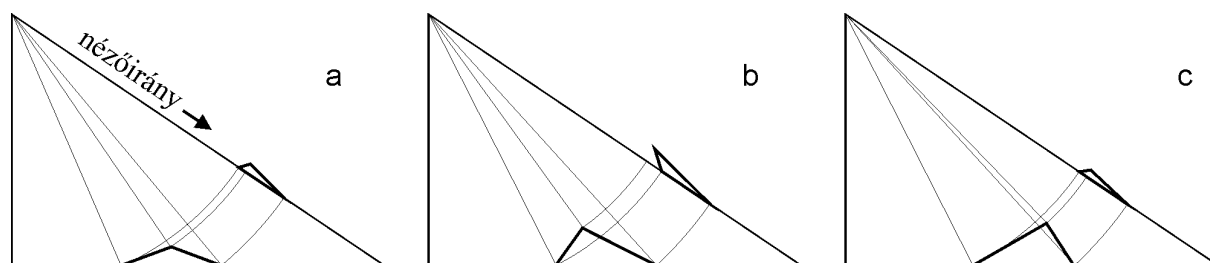
A **felületek érdekessége** is számít. Egy tökéletesen sima, tükröző felületről a visszaverődés csak akkor jut el az érzékelőhöz, ha a beesési szög merőleges; egyébként az ilyen felület (pl. a nyugodt vízfelszín) sötétnek látszik. Durva felületről diffúz reflexiót kapunk, de minden irányba van visszaverődés; általában ilyenkor is a merőleges beesési szögnél a legintenzívebben. Ez azt is jelenti, hogy egy azonos anyagú, durvább felület fényesebbnek látszik, mint egy kevésbé durva. Különösen éles reflexiót kapunk *konkáv sarkokról*, hiszen ilyenkor többszörös visszaverődés következik be. Többszörös visszaverődés egyébként különböző távoli tükröző felületek miatt is bekövetkezhet (*többutas terjedés* esete), ami szellemképek megjelenését okozhatja.



23. ábra: Szellemkép megjelenése a radarfelvételen

A felületek érdességének minősítésére használatos mérőszám a **Rayleigh-feltétel**. Kiszámításához képezzünk átlagot a felület magasságkülönbségeinek négyzetgyökeiből, majd ezt emeljük négyzetre („gyök-átlag-négyzet”). Ha az így kapott átlag-amplitúdó meghaladja a hullámhossz egynolcadának és a helyi beesési szög koszinuszának a hányadosát ($A > \lambda/8 \cdot \cos \Theta$), akkor a felület diffúz visszaverőnek tekinthető, ellenkező esetben sima tükrözőnek. A *módosított Rayleigh-feltétel* még egy köztes tartományt is beiktat, melynek határértékei $\lambda/4$ és $\lambda/25$ -nél vannak.

A fény-árnyék viszonyokat a domborzat és a megvilágítás iránya (azaz az adó nézőiránya) is befolyásolja (24. ábra). Az adóiránnyal szembenező hegyoldalak fényesebbnek fognak mutatkozni, de a képen **rövidülést** szenvednek az ellentétes irányba dőlő oldalakhoz képest. Ha a lejtőszögük nagyobb, mint a nézőszög, akkor a tetejükről érkező reflexió hamarabb érkezik a vevőhöz, mint a lejtőlábról, így még **átfedés**be is kerülnek a hátoldal reflexiójával. Ha viszont a nézőirányba dőlő hegyoldal meredekebb a behajlási szögnél, akkor az teljes **radar-árnyék**ba kerül, vagyis reflexiómentes képszakaszt kapunk. A közeli tartományban a rövidülés és az átfedés, a távoliban a radarárnyék a gyakori jelenség.



24. ábra: A nézőirányfüggő domborzati hatások a radarképen.

a: a lejtőszögek kisebbek, mint a nézőszög: **rövidülés**

b: a szembenező lejtőszög nagyobb, mint a nézőszög: **átfedés**

c: az előrenéző lejtőszög nagyobb, mint a nézőszög: **radarárnyék**

A radarképben elkerülhetetlenül megjelennek különféle **zajok**. A legjelentősebb zajok forrása maga az adó-vevő készülék, hiszen benne elektromágneses teret keltő eszközök működnek. Ezeket megfelelő árnyékolással lehet csökkenteni. A második fontos forrás a testek természetes hőszugárzása, ami viszont elkerülhetetlenül egy olyan alapszintű zajt generál, amit nem lehet kiküszöbölni. Ez a sugárzás egyébként csak a radar alkalmazása esetén számít zajnak, hiszen egyébként maga is információt hordoz a kibocsátó objektumok hőmérsékletéről és emisszivitásáról; a **passzív mikrohullámú érzékelők** ezt az információt gyűjtik be. Ezek lényegében közel vertikálisan a célterületre irányított antennájú vevőberendezések, amelyek a jelek alacsony intenzitása miatt, és mert a beérkezés pillanatának nincs jelentősége, a radarnál jóval hosszabb időintervallumban gyűjtött adatokból generálnak képet.

2.4.4. A lidar és a szonár

E két eszköz gyakorlatilag ugyanazon elven működik, mint a radar; mindkettő távolságmérésre használatos, csak a technikai háttér más.

A **lidar** [light detection and ranging] lézervény-impulzusokat bocsát ki és észlel. Ezek ugyanúgy fénysebességgel haladnak, mint a mikrohullámok; a fő különbség abban rejlik, hogy a lézervénnyel sokkal jobban irányítható, tehát a visszaverődés sokkal kisebb felületdarabról érkezik, mint a mikrohullámok esetében. Így a mérőeszköz repülési magasságától függő, általában cm-es nagyságrendbe eső felbontás és mérési pontosság érhető el vele. Így nemcsak a tenger, hanem a jóval „érdesebb” (pl. általában különböző magasságú növényekkel benőtt) szárazföld magassága is jól meghatározható.

A **szonár** [sound navigation and ranging] és a **szodar** [sonic detection and ranging] – ez utóbbi elnevezést a meteorológiai szélvizsgálóknál használják, lásd 4.2 fejezet – elektromágneses hullámok helyett egyszerű anyagi rezgéshullámokat: hanghullámokat kelt és észlel. Ezek a rezgéshullámok longitudinálisak és transzverzálisak is lehetnek – nem szilárd közeg esetén csak longitudinálisak, a hang is ilyen –, és terjedésükhöz vezető, rugalmas közegre van szükség; a csillapodás az anyag rugalmassági paramétereinek függvénye. Bár a hang a levegőben is terjed, használata elsősorban olyan közegben előnyös és szükséges, amelyben az elektromágneses sugarak elnyelődnek (csillapodásuk igen erős). Ilyen például a víz; az óceánfenék távérzékeléses kutatására a felszínről ez a legmegfelelőbb eszköz (4.3.2. fejezet). Ilyenek továbbá a Föld belső, felszín alatti szféráit felépítő anyagok is; bolygónk belső szerkezetéről a rezgéshullámok szolgáltatják a legtöbb információt, amivel a $\rightarrow$ szeizmika és a $\rightarrow$ szeizmológia foglalkozik.

2.5. Egyéb fizikai jellemzők távérzékeléses mérése

Az elektromágneses sugárzáson túl a Föld gravitációs és mágneses mezejének a mérésére is van lehetőség légijárműről vagy műholdról. Ezen mérések azonban már nem közvetlenül a felszínről, hanem a Föld belsejéről nyújtanak információt, és a $\rightarrow$ geofizika tárgykörébe tartoznak. Egyébként már a nagy hullámhosszú elektromágneses sugárzások (mikrohullámok és rádióhullámok) visszaverődése sem csupán a felszínről, hanem egy elektromágneses paraméterektől függő, nem elhanyagolható vastagságú felszíni zónából következik be, így ezek érzékelése és értelmezése is kis behatolóképeségű geofizikai alkalmazásnak tekinthető; geofizikai mérés továbbá a felszínről kibocsátott, radioaktív bomlás által gerjesztett, igen rövid hullámhosszú elektromágneses sugárzás (gamma-sugárzás) detektálása. Általában levegőből is alkalmazhatóak mindazok a módszerek, ahol az érzékelő és a talaj (kőzetek) közvetlen érintkezésére nincs szükség, de a nagy terület lefedésének korlátozott felbontóképesség az ára.

A **gravitációs mezőre** vonatkozó mérések leginkább a műholdak pálya menti mozgásában mutatkozó anomáliák megfigyelése révén lehetségesek. Ehhez igen nagy, cm-es pontosságú helyzetmeghatározásra van szükség (lásd 4.1. fejezet), hiszen a geoid alakjának eltérése a szimmetrikus forgási ellipszoidtól, valamint a sűrűségkülönbségek („gravitációs hatók”) ilyen nagyságrendű eltéréseket okoznak a szabályos ellipszispályáktól. A gravitációs hatók közül elsősorban a felszínhez közeli hatása jelentkezik; ilyenek lehetnek a kiemelkedő hegyek és a környezetükhöz képest eltérő sűrűségű kőzettestek. Ha a kutatás a kőzetekre irányul, a topográfiai hatásokat ki kell szűrni. A pálya menti mozgást ezen felül további tényezők is befolyásolják: a pálya menti közegellenállás (a légkör ellenállása és/vagy a napszél) és a Nap sugárnyomása, amelyeket szintén ki kell szűrni.

A légi graviméteres mérések esetében szintén a helyzetmeghatározás, valamint a platform (repülőgép, helikopter) függőleges gyorsulásának meghatározása a kulcskérdés, ami a $\rightarrow$ GPS segítségével biztosítható. A *graviméter* ugyanis lényegében egy rugóra függesztett súly, ahol a rugó megnyúlása egyenesen arányos az adott helyen érvényesülő nehézségi gyorsulással⁴⁴. A műszer tényleges felépítése természetesen ennél bonyolultabb, hiszen nagy érzékenységre van szükség igen pontos leolvasással, valamint ki kell küszöbölni a hőtágulás hatását és a platform rezgéseiből eredő gyorsulásokat. A rugó ezen felül nem tökéletesen rugalmas, apró maradó alakváltozásokat is szenved, így időről időre újra kell kalibrálni. A 3. táblázat néhány észleléshez szükséges pontossági és felbontási igényt mutat. A repülőgép jellemző

⁴⁴ Ez a nehézségi erőter *relatív* mérésének módja, hiszen az arányosság tényezőit mindig ismert gyorsulású pontokban végzett leolvasások alapján kell meghatározni. Van lehetőség *abszolút* mérésre is, vákuumban végzett szabadesés gyorsulásának megmérésére szolgáló műszerrel.

függőleges gyorsulásai ugyanakkor kb. 20 mGal nagyságúak, és az elérhető mérési pontosság néhány mGal.

Alkalmazás és megfigyelendő jellemzők	Pontosság (mGal)	Horizontális felbontás (km)
Lemezhatárok és lemezbelső deformáció		
Nagy léptékű redők	5	50
Riftesedés	3	10
Medencetágulás	2	5
Hegységek	3	5
Jég alatti topográfia	2	10
Vulkanológia		
Vulkánmorfológia	1	10
Vulkándinamika	0,5	5
Nyersanyagkutatás		
Üledékgyűjtő medencék	1	3
Sódóмок	0,5	1
Készletbecslés	0,1-2	1-10

3. táblázat: A gravitációs mérés szükséges pontossága és felbontása különböző földtudományi alkalmazásokhoz (1993 Workshop on Airborne Geophysics, http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=4807&page=17)

A **mágneses mezőre** irányuló mérések jellemző eszköze a protonprecessziós magnetométer, bár (főként régebben) telített vasmagos fluxgate magnetométert, nagyobb érzékenység ($<0,1$ nT) igénye esetén pedig optikai abszorpciós magnetométert is alkalmaztak.

A mérés a protonprecessziós magnetométerrel azon a fizikai elven alapszik, hogy a protonok a mágneses mezőben rendezett módon mozognak (precessziós mozgást végeznek). A műszer egy víztartály körül egy tekercs segítségével olyan mágneses mezőt gerjeszt, amelynek térerősségvektora nagy szöget zár be a Föld mágneses mezejével, és annál jóval erősebb. A gerjesztő feszültség kikapcsolása után a víz protonjainak (hidrogénatom-magjainak) a mozgása átrendeződik a Föld mágneses mezejének megfelelő irányba, és ez a tekercsben feszültséget indukál. A mérhető feszültség arányos a mágneses térerősséggel.

A Föld mágneses tere állandó változásban van, amit elsősorban a naptevékenység befolyásol, ezért csak rövid idő alatt lemerő adatok tekinthetők összehasonlíthatóaknak; ebből a szempontból a gyorsan végrehajtható légi mérés ideális. A környezetükhöz képest anomális térerősség-értékek rendszerint olyan hatótesteknek tulajdoníthatóak, amelyekben mágneseshezhető ásványok (leginkább magnetit) vagy fémtárgyak (pl. csővezetékek) vannak.

A légi mérés a felszínihez képest a gyorsaságon és nagy területi lefedésen túl még azzal az előnnyel is jár, hogy mentes a felszínközeli zavarok hatásától. A fémalkatrészeket tartalmazó, illetve működő motorú repülőgép azonban maga is mágneses ható. A hatás minimalizálása érdekében az érzékelő műszert a géptesttől távol: a szárnyak végén, a farkon, vagy egy külön vontatott gondolában szokták elhelyezni, továbbá nagy érzékenységű mérésnél három, egymásra merőleges tengelyű tekercs mezejével szokták kompenzálni a nem kívánt hatásokat.

Műholdak is végeznek mágneses méréseket, azonban ezek már nem a felszínközeli anomáliák, hanem inkább a Nap és a Föld kölcsönhatásainak kimutatására irányulnak, így inkább a *csillagászat* témakörébe vágunk.

A **radioaktív bomlás** által gerjesztett sugárzások a radiometriai⁴⁵ módszerek észlelési célpontjai. A keletkező részecskeáramok (alfa- és béta-sugárzás) ugyan rövid távon elnyelődnek, de a felszínközeli zónából (általában a talajból) érkező, illetve az onnan felszabaduló radongáz révén eleve a levegőben keletkező gamma-sugárzás a levegőből is észlelhető, külö-

⁴⁵ A radiometria minden elektromágneses sugárzás észlelésével foglalkozik (bővebben lásd a 3. fejezetben), de a geofizikában kifejezetten ezt a területet értik alatta.

nösen, ha alacsony repülési magasságot választunk. A kozmikus sugárzás kiszűrése érdekében a detektorokat felülről és oldalról ólomernyővel árnyékolják le. Nagy magasságból, illetve műholdakról ez a mérés már nem kivitelezhető.

A mérés elve, hogy az érzékelőre beérkező fotonok elektronáramot (kisüléseket) hoznak létre magasfeszültségű elektromos mezőben ionizált gázban (*Geiger-Müller számláló*), vagy fényimpulzust gerjesztenek egy kristályban (*szcintillációs detektor*), ami fotodiódák segítségével szintén elektromos árammá alakítható; az áramerősség arányos a beérkező fotonok számával. Az érzékelők gerjeszthetőségi tartománya megfelelő szűrőkkel bizonyos energiaszintekre szűkíthető, így az is elkülöníthető, hogy milyen radioaktív elemekből származik a sugárzás. A karakterisztikus csúcsok a legfontosabb természetes forrásoknál a következő energiaszinteken mutatkoznak: ^{40}K : 1,46 MeV; ^{214}Bi : 1,76 MeV (a ^{238}U bomlási sorának legfontosabb γ -kibocsátója); ^{208}Tl : 2,615 MeV (a ^{232}Th bomlási sorának legfontosabb γ -kibocsátója). A kozmikus sugárzás csúcsa 3 MeV fölötti. Ennek megfelelően „kálium-ablak”, „urán-ablak” és „thórium-ablak” szokott a műszereken a megfelelő tartományban, mint beállítási lehetőség, megjelenni.