CCD-detektorok vizsgálata

Dobos László

2017. szeptember 25.

1. Rövid történeti bevezető

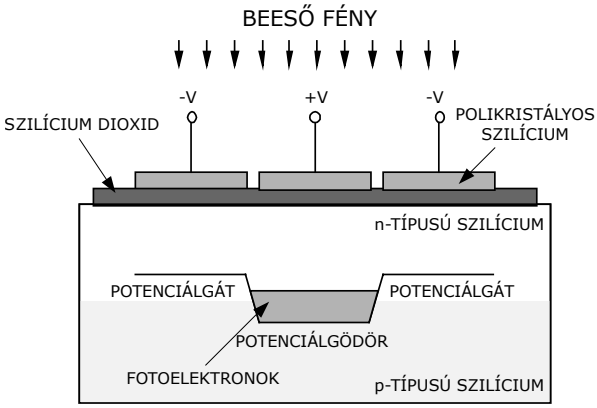
A látható fény és ahhoz közeli hullámhossz-tartományába eső, térben felbontott elektromágneses jelek, azaz fényképek, rögzítésére az első fotográfiák elkészítése óta eltelt valamivel több mint 150 év alatt számos technológia került kifejlesztésre. A különböző kémiai eljárásokon alapuló fekete-fehér és színes fotográfia mellett a huszadik század elején megjelentek a fényjeleket a fotoelektromos hatáson keresztül elektromos jellé alakító eszközök. Az egyszerű fotoelektron-sokszorozók elsősorban részecskedetektorokban használjuk, közvetlen képrögzítés céljára nem alkalmasak, de régebben használták fotólemezek és filmek letapogatására, valamint csillagászati fotometria[1] céljára is. A fluoreszcens detektorok, fotoelektron-sokszorozók, valamint a katódsugár-csövek alapelveit kombináló analóg képalkotó eszközöket, melyekben egy pásztázó elektronnyaláb „olvassa ki" a fotoelektronok által létre hozott látens képet, egészen a 80-as évekig használták mozgó képek rögzítésére, első sorban a televíziózásban. A tudományos célú képalkotó eljárásokat egészen a félvezetők elvén működő képalkotó eszközök megjelenéséig a hagyományos fotográfiai technikák dominálták. A félvezető-technológia kiforrásával párhuzamosan természetesen a számítástechnika is jelentős fejlődésen ment keresztül, így lehetővé vált digitális képalkotó és képfeldolgozó eszközök készítése. Az első képalkotásra alkalmas félvezető eszközök, a CCD-k[2] a 70-es évek közepén jelentek meg, és a 90-es évek elejétől dominánssá váltak a csillagászatban és más tudományos területeken. Mára a CCD-mátrixok helyét a legtöbb területen a szintén félvezető-technológiával készülő, de más elven működő CMOS-szenzorok vették át. A CMOS-detektorokkal szembeni előnyös tulajdonságai miatt azonban professzionális csillagászati célra továbbra is CCD-detektorokat használunk. Negyven évvel feltalálása után, 2009-ben, a CCD megalkotói, Willard Boyle és George Smith, fizikai Nobel-díjban részesültek.

2. CCD-detektorok

A CCD-detektorok gyártási technológiája nagyon hasonló az integrált félvezető eszközökéhez, mely során egy p-típusúra adalékolt szilícium lapra fotolitográfiás eljárással maszkokat visznek fel, majd kémiai maratási, adalékolási és epitaxiális eljárások sorozatával különböző rétegekben n félvezető, SiO_2 szigetelő, valamint vezető mintázatokat alakítanak ki. A mai (2017) félvezető-technológia lehetővé teszi igen nagy felbontású, a 10 nm

[1] A csillagászati fotometria égi objektumok (csillagok, galaxisok) fényességének (magnitúdójának) meghatározását jelenti.

[2] CCD – charge-coupled device, szó szerinti fordításban töltéscsatolt eszköz.



1. ábra. A CCD-detektor egyetlen pixeléhez három elektróda tartozik melyek $-+-$ feszültségre kapcsolva egy potenciálgödröt alakítanak ki a pixel közepén.

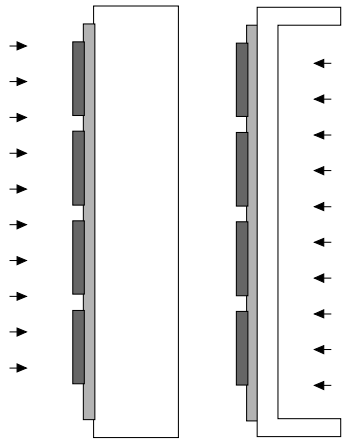
nagyságrendbe eső mintázatok kialakítását, ám CCD-detektorok esetében a képet alkotó pixelek mérete általában néhány μm.

A CCD-chipek MOS[3] technológiával készülnek, ahol az egykristály szilícium hordozó felületén egy p-n-átmentet, efölött egy szigetelő oxid réteget, majd fényáteresztő polikristályos szilícium elektródákat alakítanak ki. A p-n-átmenet megfelelő előfeszítésével elérhető, hogy a kiürített réteg vastagsága csaknem a teljes átmenetre kiterjedjen. Ezáltal biztosítható, hogy az n-rétegben kizárólag az itt elnyelődött fotonok által keltett elektronok legyenek. Egyetlen pixelhez legalább három elektróda tartozik melyek megfelelő feszültségekkel vezérelve egy potenciálgödröt alakítanak ki, ld. 2. ábra. A detektor megvilágításakor potenciálgödör összegyűjti és csapdába ejti a fotoelektronokat. Mivel a fotoelektromos jelenség lineáris, ezért a CCD pixelében összegyűlő fotonok száma arányos lesz a beeső és elnyelődő fotonok számával. Az arányossági tényező az ún. kvantumhatásfok, mely százalékban kifejezve megadja, hogy száz beeső foton átlagosan hány csapdába ejtett elektront produkál, ld. 2 A CCD-detektorok hatásfoka erősen függ a hullámhossztól és a beeső fénysugár lapkával bezárt szögétől. A hullámhossz-függés a gyártási technológia megválasztásával hangolható az infravörös vagy az ultraibolya irányába. A modern CCD-k esetében szűkebb hullámhossz-tartományokon akár 95%-os kvantumhatásfok is elérhető. Magas érzékenység úgy érhető el, hogy az elkészült szilícium lapkát a hátoldala felől maratási eljárással elvékonyítják, és az elektródák felőli oldal helyett ebből az irányból világítják meg, ld. 2. ábra.

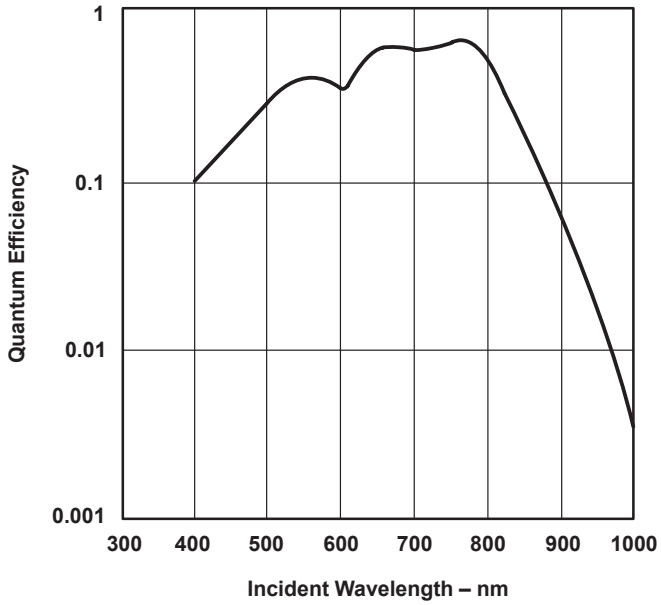
Vegyük észre, hogy a pixeleket elválasztó potenciálgátakat nem a félvezető szerkezete, hanem az elektródákra kapcsolt feszültségek alakítják ki. A feszültségértékek megfelelő fáziseltolással való modulálásával elérhető, hogy a pixelben tárolt töltések egy pixellel arrébb kerüljenek, ld. 2. ábra. A 2. ábrán a CCD egy pixelének a kiolvasás irányával párhuzamos keresztmetszete látszik. Természetesen a fotoelektronokat a pixelben tartó potenciálgátakat a merőleges irányokban is ki kell alakítani, azonban a töltések merőleges irányú mozgatására általában nincsen lehetőség.

A CCD-chipeken létrehozott pixelek mintázata lehet egydimenziós (lineáris) és kétdimenziós (mátrix). Az előbbi esetben a képalkotás a leolvasandó terület végigpásztázásával történik, mely során vagy a képet, vagy a detektort mozgatni kell, ld. 2. ábra. Értelem-

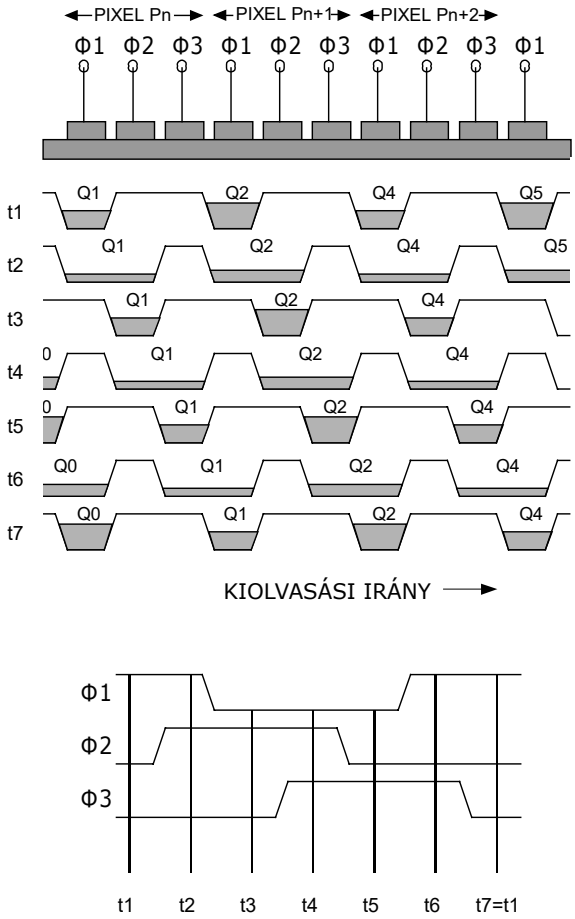
[3]MOS – metal-oxide-semiconductor, azaz fém-oxid-félvezető rétegekből álló szendvics



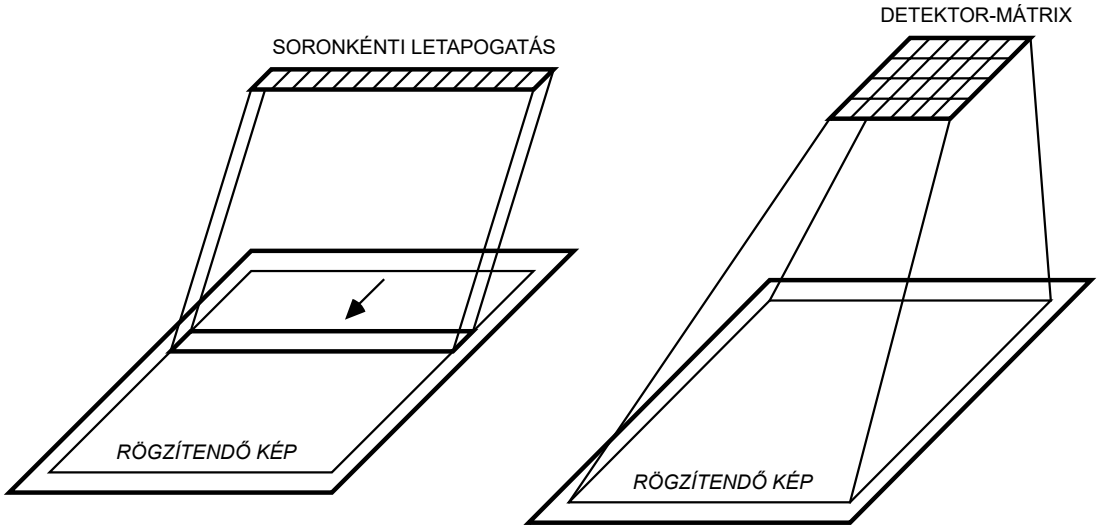
2. ábra. A hagyományos (balra) és a hordozó irányából kémiai maratással elvékonyított detektor (jobbra). A nyilak a megvilágítás irányát jelölik. A hátulról megvilágított detektor előnye, hogy a fénynek nem kell áthaladnia az elektródákon és az oxidrétegen, így a fotonok közvetlenül a félvezető rétegbe hatolnak.



3. ábra. A TI TC255 típusú CCD-detektor kvantumhatásfoka a megvilágító fény hullámhosszának függvényében. A lefedett hullámhossz-tartomány bőven túlnyúlik a látható fény tartományán (400-700 nm).



4. ábra. Háromfázisú CCD kiolvasása. A felső ábrarész a potenciálgödrök elhelyezkedését, az alsó görbék az elektródákra kapcsolt feszültségek időfüggését szemléltetik.



5. ábra. A lineáris és mátrix CCD-k működési elve. A lineáris CCD-ket letapogatásra használjuk, ahol vagy a detektort, vagy a leolvasandó képet mozgatni kell, így csak mozdulatlan beállítások rögzítésére alkalmas. A CCD-mátrixok esetében a teljes képet egy objektív vetíti a detektorra így segítségével pillanatfelvételek is készíthetők.

szerűen rövid idejű felvételek csak CCD-mátrixszal készíthetők, a pásztázó megoldás csak rögzített beállítások vagy fotók, dokumentumok beolvasása esetében használható.

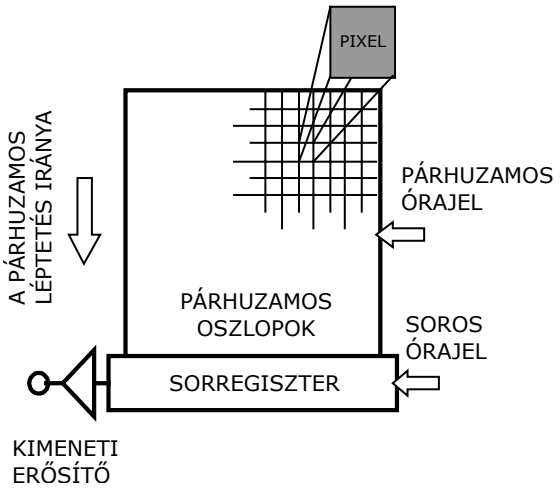
A CCD-k kiolvasása úgy történik, hogy a töltéseket pixelről pixelre léptetjük, majd a pixelsor végén egy lineáris erősítő segítségével a töltés nagyságával arányos feszültségértéket alakítunk ki. A CCD-k által rögzített képet akár analóg módon is feldolgozhatjuk – ahogyan azt a VHS és hasonló kategóriájú videokamerák is tették –, de a kimeneten megjelenő feszültséget ma már leginkább egy A/D-konverter segítségével digitalizáljuk, és a kinyert képet digitálisan tároljuk.

Hagyományos CCD-mátrixok esetében a töltések csak egy irányban, az oszlopok mentén mozgathatók, ezért a kiolvasás úgy történik, hogy az oszlopok végén, azaz a kép szélén, egy merőleges irányú töltésmozgatásra is alkalmas, ún. sorregisztert alakítanak ki. A képet ekkor soronként kell kiolvasni a következő módon: Előbb minden oszlopot egy sorral arrébb léptetünk, így a legalsó sor a sorregiszterbe kerül. Ezután a lineáris CCD-knél megismert módszerrel pixelről-pixelre kiolvassuk a sorregiszterben tárolt töltéseket, majd ismét léptetjük az oszlopokat, ld. 2. ábra.

A kép rögzítése előtt a CCD-ben tárolt elektronokat ki kell üríteni, mely megtörténhet a CCD kiolvasásával, de a gyorsabb alapállapotba helyezés érdekében erre általában külön elektródákat alakítanak ki. Ezt követi az expozíció, azaz a CCD megvilágítása. Hagyományos filmes kamerákban és tükörreflexes digitális kamerákban a CCD fénytől való eltakarásáért egy mechanikus zárszerkezet felelős, de CCD-k segítségével zárszerkezet nélkül, folyamatos megvilágítás mellett is készíthető időben limitált expozíció. Videokamerákban erre a célra elterjedt megoldás az ún. pergőzár[4], ahol a CCD-t folyamatosan, soronként olvassuk ki. Ekkor az integrálási idő a sor kétszeri kiolvasása közt eltelt idő.

Mivel a töltések a CCD-mátrix kiolvasásakor pixelről pixelre mozognak, könnyű be-

[4]rolling shutter



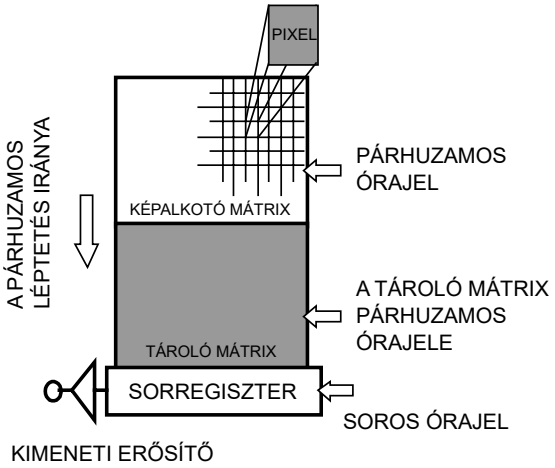
6. ábra. CCD-mátrix kiolvasása az oszlopok párhuzamos léptetésével. Első lépésben a párhuzamos órajel a legalsó sort a sorregiszterbe lépteti. Ezután a soros órajel az oszlopok számának megfelelő periódusa alatt a töltések a pixelről pixelre a kimeneti erősítőre jutnak, mely kimeneti feszültségét általában egy A/D-átalakító digitalizálja.

látni, hogy ha a mátrixot a kiolvasás ideje alatt is megvilágítjuk, akkor a CCD-re vetített kép fényes pontjai az oszlopokkal párhuzamos csíkokat húznának a képre, hiszen a pixelek a kiolvasás során is gyűjtik a fotoelektronokat. Ez a jelenség akkor szembetűnő, hogy ha egy oszlop kiolvasási ideje összemérhető az expozíciós idővel. Ha nincsen mód zár beépítésére, akkor az effektus ellen úgy védekezhetünk, hogy rendkívül gyorsan olvassuk ki a CCD-t. A CCD gyors kiolvasásának az szab korlátot, hogy mekkora a kimeneti erősítő sávszélessége, illetve milyen gyorsan tudjuk a kimeneten létrejövő analóg jelet digitalizálni. Később látni fogjuk, hogy a túl gyors A/D-konverzió hátránya, hogy jelentős mértékben megnöveli a kiolvasási zajt.

Zár nélküli kamerák esetében az előbbi kiolvasási problémát az ún. frame-transfer vagy inter-line CCD-k segítségével hidalhatjuk át. A frame-transfer CCD-k tulajdonképpen egy kétszeres méretű mátrixot tartalmaznak, de csak a mátrix egyik fele exponálható, a másik fele fényzáró réteggel van letakarva. Az inter-line CCD-k esetében minden második oszlop van letakarva. Az expozíciót követően a fotoelektronokat igen rövid idő alatt a letakart pixelekbe lehet léptetni, ahonnan a kép már lassabb pixelórajellel is kiolvasható. A technológia előnye, hogy mialatt a letakart pixelekből a képet kiolvassuk, a fényérzékeny pixelekre újra exponálhatunk. Nagy hátránya viszont, hogy csak a pixelek fele hasznosítható képalkotásra. Mivel nem túl gazdaságos megoldásról van szó, ezért a frame-transfer technológiát csak professzionális kamerákban alkalmazzák.

3. A CCD-detektorok zajforrásai, hibái és korrekciójuk.

A CCD-detektorok segítségével készült képeken több különböző forrásból származó zaj jelenhet meg. A különböző zajforrások a képeken hasonlóképp jelennek meg, de célzott vizsgálatokkal a különböző eredetű zajok nagysága kimérhető és elkülöníthető.



7. ábra. A frame-transfer CCD kiolvasásának menete. A kép expozíciója után a sorok számának megfelelő számú léptetést végzünk párhuzamosan az összes oszlopban, így a kép a tároló mátrixba kerül. Ezek után felváltva léptetjük az oszlopokat a párhuzamos órajellel, majd minden léptetés után kiolvassuk a sorregisztert. Ez alapján érthető, hogy a képalkotó mátrixból a tároló mátrixba a kép sokkal gyorsabban áttölthető, mintha közvetlenül kiolvasnánk.

Sötétáram: A CCD-detektor véges hőmérséklete miatt a pixelekben kialakított potenciálgödörbe nem csak fotoelektronok kerülhetnek, hanem a szilícium hordozó valenciasávjából termikusan felgerjesztett elektronok is. A termikus zaj ennek megfelelően arányos lesz az expozíciós idővel, ugyanakkor a hőmérséklettől az e^{kT} függés miatt várhatóan exponenciálisan függ. A CCD termikus zaját különböző hőmérsékleten és különböző expozíciós idővel készült, teljesen sötét felvételek (ún. dark képek) segítségével vizsgálhatjuk. A termikus zaj a detektorok hűtésével hatékonyan csökkenthető. Egyszerűbb kamerák hűtése megoldható termoelektromos elemek segítségével is, de komolyabb távcsövek detektorait folyékony nitrogénnel, $-80°$C közeli hőmérsékletre szokták hűteni. Az alacsony hőmérsékletű detektorokat vákuumba kell helyezni, különben a légkörben található víz kifagyna a detektor felületére.

Fotonzaj: Rövid expozíció vagy gyenge megvilágítás esetében a detektált fotonok, így az összegyűjtött fotoelektronok száma is alacsony. Mivel a CCD felületére egységnyi idő alatt érkező fotonok száma Poisson-eloszlást követ, egyenletes, de alacsony megvilágítás esetében pixelről pixelre jelentős elektronszám-változás várható. A Poisson-zaj a detektálási folyamat sajátja, a fotonok kvantáltságából ered. A Poisson-zaj abszolút nagysága nem, de relatív értéke az ismert $1/\sqrt{N}$ formula szerint csökkenthető az integrálási idő vagy a pixelméret (fénygyűjtő terület) növelésével. A pixelméret a felbontástól és a detektormérettől együttesen függ, de a fő limitáló tényező a detektor mérete, hiszen a nagy méretű, ugyanakkor hibátlan rajzolatú chipek gyártása költséges a magas hibaszázalék miatt. A pixelek hasznos területét csökkenti, hogy a különböző vezetékek (pl. anti-bloom drain stb.), mind helyet igényelnek. Az effektív pixelméret javítása érdekében a digitális

8. ábra. Az igen rövid expozíciós idővel, hűtött CCD-vel készült felvételen (baloldal) megfigyelhető az egyes pixelek nullszintjének eltolódása. A szobahőmérsékletű detektorral, de szintén rövid expozícióval készült felvételen (jobboldal) a fotonzaj és a kiolvasási elektronika zaja dominál.

fényképezőgépekben mikrolencséket alkalmaznak, melyeket a detektor fölött, egy vékony rétegben helyeznek. A mikrolencsék feladata, hogy a fényt nagyobb felületről gyűjtsék össze, és juttassák a detektorba.

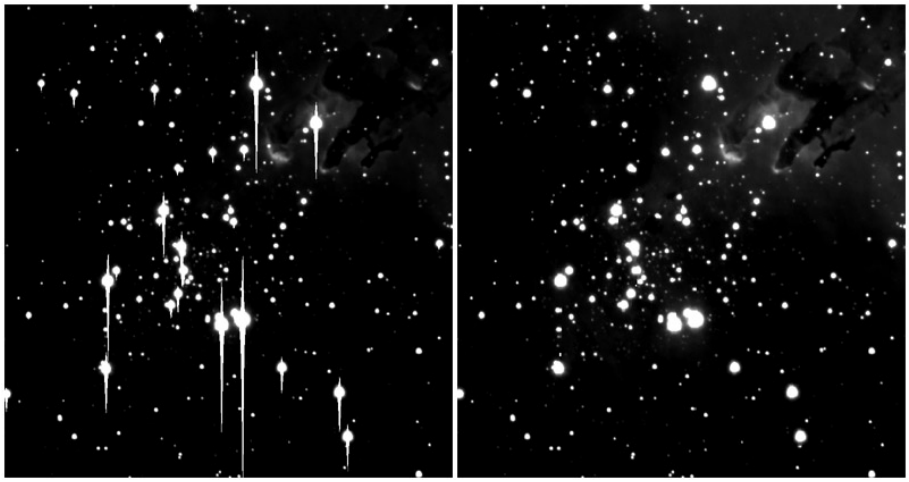
Kiolvasási zaj: A kiolvasási zaj egyfelől a kiolvasást végző erősítő és A/D-átalakító saját belső zajából ered, másrészt külső elektromos zajforrások hatásából, melyek az elektronikát a kiolvasás során érik. Ez utóbbiak gyakran jellegzetes interferencia mintázatot, vagy csíkozottságot okoznak a képeken. A kiolvasási zaj az elektronika megfelelő árnyékolásával és hűtésével csökkenthető. Kiméréséhez a megvilágítatlan detektort a lehető legrövidebb integrációs idő mellett kell kiolvasni.

Digitalizálásból eredő zaj: A CCD-detektor kimeneti erősítője a pixelekben összegyűlt elektronok számával arányos feszültségjelet állít elő, melyet a sorregisztert léptető órajellel szinkronban digitalizálni kell. A professzionális CCD-detektorok jel-zaj aránya általában magas, ezért kis felbontású A/D-átalakítók használata esetén jelentős lehet a kvantálási zaj. Nagy felbontású mintavételezés esetén a mintavételezés sebessége is problémát jelent, hiszen a szukcesszív approximációs A/D-átalakítók sebessége fordítottan arányos a bitek számával. Bár a detektor sorregiszterét nagy sebességgel is lehetne léptetni, a csillagászati CCD-knél alkalmazott A/D-konverterek mintavételezési frekvenciája a 10-100 kHz tartományba esik. Összevetve ezt a sebességet a CCD felbontásával látható, hogy egy nagyméretű detektor kiolvasása sok másodpercig is eltarthat, amit a csillagászati megfigyelések tervezésekor figyelembe kell venni.

Egy kép, vagy egy detektor dinamikatartománya a maximális intenzitású pixel és a legsötétebb részek háttérzajának arányaként, decibel egységekben kifejezve definiálható:

$$\mathrm{SNR} = 20 \cdot \log_{10} \frac{N_{\mathrm{max}}}{N_{\mathrm{dark,\ RMS}}},$$

Az egyszerűbb CCD-k pixelei kb. 50,000 elektront tudnak tárolni, de a professzionális detektorok akár félmillió elektron is képesek összegyűjteni. Ha egy egyszerű, hűtetlen CCD sötétárama 50e$^-$, akkor dinamikatartománya 60 dB körüli. Egy csillagászati detektor sötétárama néhány e$^-$, ami akár 100 dB dinamikatartomány jelent. A kiolvasó



9. ábra. Csillagászati felvétel az égbolt ugyanazon területéről hagyományos és anti-blooming technológiával készült CCD-vel. A baloldali képen jól megfigyelhető a fényes csillagok képének középpontjából kiinduló, az oszlopok irányába terjeszkedő teljesen telített csíkok. A jobboldali képen, bár a fényes csillagok pixelei telítődnek, mégsem zavarják meg függőleges csíkok a halvány részleteket, és a csillagközi gázfelhők szépen kirajzolódnak.

elektronikának, és az A/D-konverternek ennek megfelelően igen alacsony zajúnak és nagy felbontásúnak kell lennie.

Blooming: A pixeleket meghatározó, 2. ábrán bemutatott, potenciálgát magassága természetesen véges, ennek következtében, valamint a Pauli-elv miatt a pixelekben tárolható elektronok száma is korlátos. Amennyiben túlexponálás hatására egy pixel megtelik, a töltések a szomszédos pixelekbe csoroghatnak át. A jelenség angol neve blooming, melyet magyarra kivirágzásként fordíthatunk. A CCD oszlopai közötti potenciálgát általában magasabb, mint az egy oszlopban levő pixelek közötti, ezért az elektronok átcsorgása először az oszlopok mentén történik meg. Ez a jelenség jellegzetes, a kép fényes részeiről kiinduló, az oszlopokkal párhuzamos fényes csíkok megjelenéséhez vezet, ahogy azt a 3. ábra is szemlélteti. A pixelek speciális kialakításával elérhető, hogy a pixelből kicsorgó elektronok ne a szomszédos pixelbe, hanem egy külön erre a célra kialakított „ártérbe" kerüljenek, melyeket utána egy külön elektródával elvezetünk. Az ilyen, ún. anti-blooming technológiával készült CCD-detektorok túlcsorduló elektronjait a kiolvasó elektronika nem képes detektálni, a fényes területek ugyan teljesen telítődnek – azaz beégnek –, de az anti-blooming CCD-k lehetővé teszik a fényes objektumok körüli halvány képrészletek detektálást is.

Pixelfüggő érzékenység: Bármilyen fejtett a gyártástechnológia, teljesen homogén CCD-dektor detektor nem készíthető. Az egyes pixelek kvantumérzékenysége, pontos mérete – ennélfogva fénygyűjtő képessége pixelről pixelre változik, amit a képek feldolgozása során korrigálni kell. A CCD-t egyenletesen megvilágítva a pixelek érzékenysége kimérhető. Ha egy optikai rendszeren (távcső vagy objektív) keresztül végezzük a mérést, úgy az optikai rendszer fényintenzitás-változással járó hibái is korrigálhatok. A leggyakoribb ilyen probléma a vignettálás, ami abból adódik, hogy az objektívek fényereje az optikai tengelytől távolodva csökken, másrészt abból, hogy az optikai tengellyel nagyobb szö-

get bezáró fénysugarak a detektort a merőlegestől eltérő szögben érik, ami csökkenti az elnyelési hatáskeresztmetszetet.

Forró és sötét pixelek: A CCD gyártása során felmerültnek olyan ponthibák, amik egy adott pixel helyén megváltoztatják a félvezető sávszerkezetét, ezért a pixel nem üríthető ki, vagy a termikus zaj hatására igen hamar megtelik elektronokkal. Ezeket a pixeleket forró pixeleknek nevezzük, és gyakran csak a környező pixelek értékeiből vett interpolációs eljárással távolíthatók el a képről. Hasonló a helyzet azokkal a pixelekkel is, melyek valamilyen oknál fognak nem képesek a fotoelektronok összegyűjtésére. Olyan helyzet is előállhat, hogy teljes oszlopok válnak kiolvashatatlanná, ilyenkor is a környező oszlopok értékeiből interpolálhatunk. Nagyméretű CCD-k esetében az említett hibák viszonylag gyakoriak, ezért a gyártók a nagyméretű, hibás, de korrigálható minőségű képet adó detektorokat alacsonyabb áron forgalmazzák.

Linearitás: A CCD-k egyik fontos tulajdonsága, hogy más fényintenzitás-detektorokkal szemben csaknem a teljes dinamikatartományon lineárisak. A nem lineáris viselkedés általában a kiolvasó elektronika számlájára írható, de a csaknem telített pixelek esetében is megfigyelhető, hogy kisebb kvantumhatásfokkal működnek, mint a kevésbé megvilágított, telítetlen pixelek. Fotók készítésénél ez nem okoz problémát, de csillagászati megfigyelések esetében, ahol igyekszünk kihasználni a teljes dinamikatartomány, szükség van a nem lineáris válaszfüggvény korrekciójára. A nem lineáris viselkedés kimérhető például bias-ra és termikus zajra korrigált, különböző expozíciós idővel készült flat képek kiértékelésével (részleteket ld. később).

4. A CCD- és CMOS-detektorok összehasonlítása

A CMOS-detektorok a CCD-khez hasonlóan, félvezető-technológiával készülnek, és azonos elv szerint gyűjtik össze a beeső fotonok keltette elektronokat. A lényeges különbség a két detektortípus között, hogy míg a CCD-k kiolvasása az elektronok egyik pixelből a másikba való léptetésével történik, addig a CMOS-chipek minden egyes pixeléhez önálló kimeneti erősítő tartozik. Ez nyilvánvalóan bonyolultabb gyártástechnológiát igényel, viszont gyenge minőségű CMOS-detektorok a hagyományos integrált áramkörök gyártására szolgáló gépeken is készíthetők. Nem véletlen, hogy kezdetleges, de olcsó és nagy mennyiségben gyártható CMOS-szenzorok először webkamerákban és mobiltelefonokban jelentek meg. A képminőség javítása érdekében a CMOS technológia nagy fejlődésen ment keresztül, és mára hétköznapi felhasználási célra (fotó- és videokamerák) a CMOS-detektorok messze lekörözik a CCD-ket.

A CMOS-detektorok nagy előnye, hogy kiolvasásuk masszívan párhuzamosítható, míg egy CCD-detektor esetén egyetlen (vagy legfeljebb a szenzor négy sarkán elhelyezett négy) kimeneti erősítőnek kell a pixelórajelnek megfelelő sávszélességet biztosítania. Azonos kiolvasási sebesség mellett tehát a CMOS-detektorok kiolvasási zaja jelentősen kisebb, mint a CCD-detektoroké. A CMOS-detektorok további jelentős előnye, hogy a töltéseket nem kell a félvezetőben mozgatni, hiszen a kiolvasás „helyben” történik meg. Emiatt fogyasztásuk messze elmarad a CCD-ktől, ami jelentős előny akkumulátorról működő mobil eszközökben való felhasználásuk esetében.

A CCD-k azonban néhány tudományos területen továbbra is nélkülözhetetlenek. A csillagászati megfigyelésekhez gyakran szükség van közeli infravörösben és ultraibolyá-

ban érzékeny detektorokra, mely hullámhosszakon a tömeggyártásban készülő CMOS-szenzorok nem alkalmazhatók. Az infravörösben való érzékenyítéshez vastagabb szilícium hordozórétegre, az ultraibolya érzékenységhez maratással elvékonyított hordozóra, és hátulról történő megvilágításra vagy szükség.

Mivel a CCD-k pixeleiben tárolt elektronok pixelről pixelre léptethetők, a CCD-detektoroknak létezik egy további, speciális alkalmazása. Olyan esetekben, amikor a megfigyelendő objektum mozog (ami lehet az égbolt, de egy gyorsan mozgó apró, halvány tárgy is, pl. fluoreszcens mikroszkópiában), a kamera mozgatása helyett elegendő a pixelekben összegyűjtött elektronok megfelelő sebességgel történő mozgatása is. Ez a módszer a csillagászatban elterjed, ún. *drift-scan*, mikor is az égbolt látszólagos mozgását nem a távcső mozgatásával korrigálják, hanem a CCD pixeleit a csillagok mozgásának megfelelő ütemben léptetik. Az ún. OTA-CCD[5], képes a töltések oszlopok közötti mozgatására is. Ez a tulajdonság lehetővé teszi, hogy költséges mechanikus megoldások helyett adaptív optikát (azaz adaptív detektort) építsünk.

5. Színes képalkotás

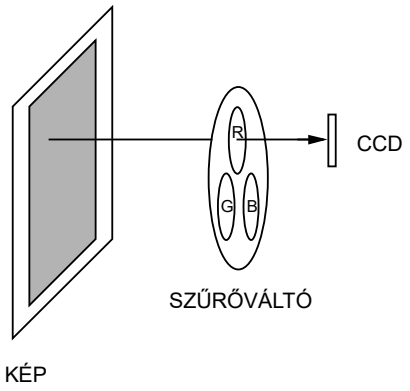
A CCD-detektorok, ahogy az a 2. ábrán is láttuk, viszonylag széles érzékenységi tartománnyal rendelkeznek. Az érzékenység maximuma a chip megmunkálásától függően a látható fény, a közeli infravörös vagy a közeli ultraibolya tartományába esik. Ugyanakkor azt is láttuk, hogy bár a fotonok elektronkeltési valószínűsége hullámhosszfüggő, a CCD nem a beeső fotonok energiáját méri, hiszen minden beeső és elnyelt foton pontosan egy fotoelektront kelt. Mivel a CCD önmagában nem alkalmas a fotonok energiájának meghatározására, ezért a különböző hullámhosszúságú fotonok kiszűrésére optikai szűrőket, sugárosztókat vagy spektrográfokat alkalmazunk. Az optikai szűrők jóval szűkebb hullámhossztartományban engedik át a fényt, mint amit a CCD detektálni képes. Több különböző szűrő használatával hamis színes képek állíthatók elő. Amennyiben a szűrők hullámhossztartományát az emberi szem érzékenységéhez hasonlónak választjuk, úgy valódi színes képek is készíthetők.

Amennyiben a lefényképezendő jelenet időben nem vagy csak lassan változik – például csillagászati mély ég megfigyelések esetében – úgy a külön-külön színszűrővel végzett expozíciókat egymás után más-más időpontban is elvégezhetjük. Ilyen esetben a színes képalkotáshoz egyetlen CCD és egy szűrőváltó elegendő, ld. 5. ábra jobboldala.

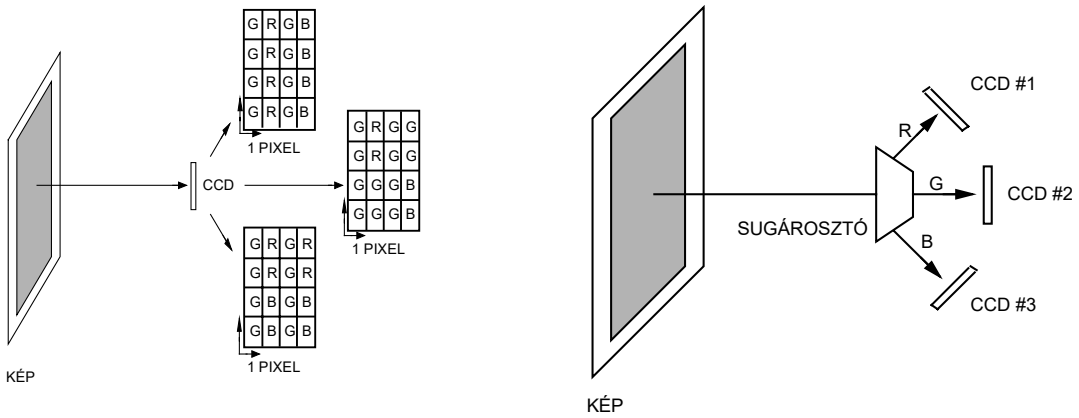
Ha időben változó jelenetet szeretnénk rögzíteni, vagy a hosszú integrálási idő miatt párhuzamosítani kell a különböző színszűrőkkel végzett expozíciókat, akkor alapvetően két megoldás közül választhatunk. A színes kép rögzítésére a digitális kamerákban ún. Bayer-filtert használnak, mely a vörös, kék és zöld alapszíneket egy jól meghatározott mintázat szerint rendeli hozzá az egyes pixelekhez. Az emberi szem érzékenységének közelítésére a Bayer-filter kétszer annyi zöld pixelt tartalmaz, mint vöröset vagy kéket. A színek pixelenkénti elosztását az 5. ábra baloldala mutatja. Vegyük észre, hogy itt az LCD monitoroktól eltérően egyetlen pixelhez nem három szub-pixel tartozik, hanem egy pixel vagy vörös vagy kék vagy zöld. A végső, pixelenként három színcsatornával rendelkező képet ügyes interpolációs eljárással kell előállítani.

A Bayer-szűrőnél lényegesen drágább megoldás több CCD-detektor és sugárosztó optikai elemek használata. Az elsősorban videókamerákban alkalmazott technológiát az 5. ábra jobboldala szemlélteti. A sugárosztó egy olyan félig áteresztő tükör, mely a hullámhossz

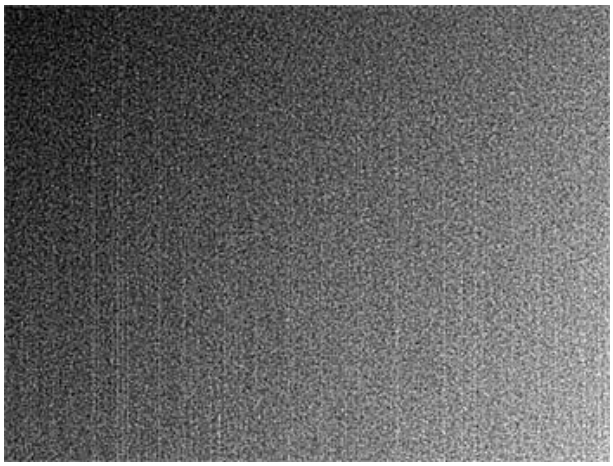
[5] OTA – orthogonal transfer array



10. ábra. Színes képek készítése szűrőváltó segítségével.



11. ábra. A Bayer-filter (baloldal) a CCD egyedi pixeleihez vörös, zöld vagy kék színt rendel, így a végső színes kép megfelelő interpolációval állítható elő. A sugárosztó két féligáteresztő tükör és színszűrők, vagy dichroic üveg segítségével három különálló detektorra juttatja a képet.



12. ábra. Egy tipikus, alacsony zajú, hűtött CCD-vel készített *bias* felvétel nagyon rövid expozíciós idő esetén. Ebben az esetben a termikus zaj elhanyagolható, és a pixelek nullszintjének változása dominálja a képet.

függvényében vagy átengedi a fotonokat, vagy visszaveri. Két sugárosztó kombinációjával a fotonok három hullámhossz-tartomány szerint válogathatók szét.

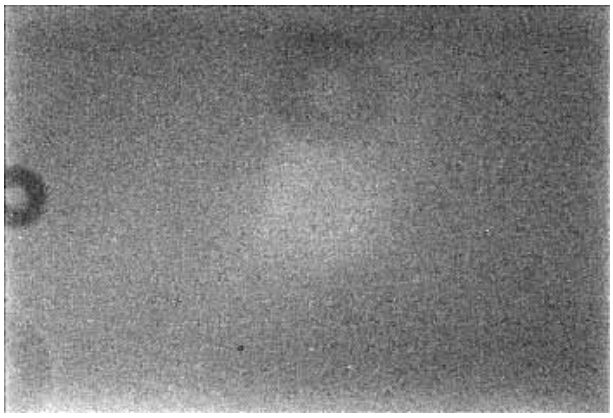
6. CCD-képek feldolgozása

A CCD-ről nyersen kiolvasott képekből digitális utófeldolgozással alakítjuk ki a végső képet. A folyamat során korrigálni kell a CCD pixelről pixelre változó érzékenységét, a kamera optikai rendszere által okozott esetleges fényintenzitásbeli változásokat (vignettálás), valamint be kell állítani az abszolút fekete szintet. A kalibrálás céljából a tárgyról készült felvételen kívül (light) ún. technikai felvételeket készítünk, melyek a következők:

Light: A CCD megvilágításával, az objektumról készült nyers felvétel, melyet a technikai felvételek segítségével korrigálni kell.

Bias: A CCD-detektorok pixeleinek zéruspontja pixelről pixelre változik, melyre korrigálni kell. Ehhez egy olyan sötét felvételt készítünk, melynek expozíciós ideje a lehető legrövidebb. Mivel ekkor a termikus zaj a rövid expozíciós idő miatt minimális, a képen csak a pixelek zéruspont-váltakozásai és a kiolvasó elektronika zéruspontja, illetve zaja jelenik meg. A dark kép tartalmazza azokat a forró pixeleket is, melyekben az exponálástól függetlenül mindig található elektron. A feldolgozás során – amennyiben nem használunk dark képet – a bias képet az exponált képről le kell vonni. A 6. ábra egy tipikus bias képet mutat.

Dark: A CCD-detektorok pixeleinek termikus alapzaja pixelről-pixelre változik, melyet úgy tudunk figyelembe venni, hogy elsötétített detektor mellett, a light képpel megegyező expozíciós időt választva integrálunk, majd kiolvassuk a detektort. A termikusan gerjesztett elektronok száma Poisson-eloszlást követ, így a dark képen megjelenő véletlenszerű zajt úgy csökkenthetjük, hogy több képet kiátlagolunk. A dark képen megjelennek azok a forró pixelek is, melyek alapállapotban nem tartalmaznak elektront, de a termikus zajuk



13. ábra. Egy tipikus *flat* felvétel, melyen jól megfigyelhető, hogy a detektor sarkai felé az intenzitás lecsökken, mely jelenség abból adódik, hogy a optikai rendszer tökéletlensége miatt nem egyenletes világítódik meg a detektor. A fánk alakú jellegzetes foltokat valamelyik, a detektorhoz közeli optikai elemen levő apró porszemcsék okozzák, míg a pontszerű, sötét foltok közvetlenül a detektoron levő szennyeződésekből adódnak.

jóval nagyobb, mint a hibátlan pixeleké. A nyers képről a dark képet le kell vonni. A dark kép természetesen tartalmazni fogja a bias képnél leírt zérusponti különbségeket is, így amennyiben dark képet használunk, a bias képet már nem kell külön levonni a nyers képről.

Flat: A CCD fényérzékenysége pixelről pixelre változik, melyre a végső kép kalibrációjakor szintén korrigálni kell. Ebből a célból egy olyan felvételt készítünk, ahol a CCD-t lehetőleg egyenletesen világítjuk meg. Ez általában úgy történik, hogy egy egyenletesen megvilágított fehér vagy szürke lapra (csillagászati megfigyelésekkor a szürkületi égboltra) exponálunk, a korrigálandó képpel megegyező expozíciós idővel. Az egyenletesebb megvilágítás érdekében a lapot a kamera fókuszánál közelebb kell elhelyezni úgy, hogy betöltse az egész látómezőt. Természetesen az így készült felvételek nem csak a CCD érzékenységének változásait fogják tartalmazni, hanem az optikai rendszer fényintenzitásváltozásait is (vignettálás, porszemcsék). A Poisson-zaj csökkentése érdekében érdemes több flat képet kiátlagolni. Miután a nyers képről a dark felvételt levontuk, elosztjuk azt a flat képpel. A 6. ábra egy tipikus *flat* felvételt mutat.
A végső, kalibrált képet a következő formula szerint kapjuk:

$$P = \frac{R - D}{F},$$

ahol R a nyers kép beütésszáma, D a dark, F a flat és P a kalibrált beütésszám.

7. Mérési összeállítás

A Santa Barbara Instruments Group (SBIG) által gyártott ST-5 típusú CCD-kamera kifejezetten csillagászati célra készült, mely főbb paramétereit a 7. táblázatban foglaltuk össze. A kamerafej egy termoelektromos (Peltier-elemes) hűtéssel ellátott kisméretű frame-transfer CCD-t tartalmaz, melyet anti-blooming megoldással is ellátták. A CCD-szenzor egy apró vákuumkamrában helyezkedik el, így 0 °C alatti hőmérsékletre is lehűt-

gyártó	Texas Instruments
típusszám	TC255
oszlopok száma	243
sorok száma	324
szenzor mérete	3,2 × 2,4 mm
pixelméret	10 × 10 μm
elektronikus retesz sebessége	1/60-1/50000 s
jel/zaj arány	jobb mint 66 dB
tárolható elektronok száma	kb. 60000e$^-$/pixel
töltéskonverzió	12 μV/e$^-$
tipikus zaj (RMS)	20e$^-$
A/D felbontás	14 bit
pixelfrekvencia	30 kHz

1. táblázat. Az SBIG ST-5 típusú kamera detektorának és A/D-konverterének főbb paraméterei.

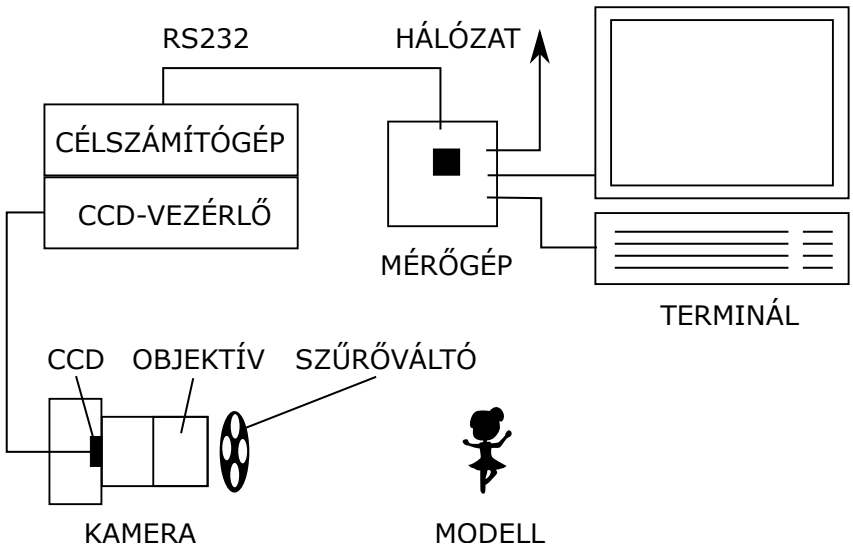
hető anélkül, hogy a levegőben levő pára kifagyna a detektor felületére. A Peltier-elemes hűtés −10 °C-ig képes lehűteni a detektort.

A mérési összeállítást a 7. ábra mutatja. A laborban mért összeállítás távcső helyett egy egyszerű fixfókuszú objektívet tartalmaz, mely kb. 50 cm távolságból készít éles képet. A CCD kis mérete és az objektív relatíve nagy fókusztávolsága miatt a látómező kis méretű, mindössze kb. 2 × 2 cm. Az objektív fényereje egy blende segítségével $f/2.8$ és $f/22$ között változtatható. Az objektív f-száma egy dimenziótlan mennyiség, melyet tradicionálisan f/N alakban írunk, ahol $N = f/D$, ahol most f a fókusztávolság és D az apertúra átmérője. Az objektívek úgy készülnek, hogy az f-számok többnyire $\sqrt{2}$ reciprokának geometriai soraként álljanak elő. Ennek megfelelően az egymást követő, növekvő f-számokhoz fele fényintenzitás tartozik. Az apertúra méretének csökkentésével a fényintenzitás csökken, ugyanakkor az ún. mélységélesség – vagyis az a tárgytávolság-intervallum, melyen belül a detektoron éles képet kapunk – nő. A kamera előtt egy kézzel állítható szűrőváltó található, mely öt állásából egy teljesen fényzáró, egy teljesen fényáteresztő a további háromban pedig vörös, zöld és kék színszűrők találhatók.

A kamera hűtésének szabályozásáról és a CCD vezérléséről egy célszámítógép gondoskodik, melyhez a laborterminál RS232-es soros vonalon kapcsolódik. A CCD vezérlőegységével való kommunikációhoz, és a képek letöltéséhez az sbigpy Python programcsomagot használjuk, míg a képek digitális utófeldolgozását és megjelenítését a szokásos Numpy és Matplotlib eszközökkel végezhetjük el. Mivel a jegyzőkönyvekhez kapcsolódó Python-kernel nem a laborszámítógépen, hanem a tanszéki szervereken fut, ezért a soros kapcsolatot egy egyszerű shell scripttel, TCP kapcsolaton keresztül játsszuk át a mérőgépről a Jupyter-szerver irányába.

8. Az sbigpy Python csomag

Az sbigpy programcsomag az ST-5 kameravezérlő processzorához biztosít közvetlen elérést Pythonból. Az alábbiakban a legfontosabb függvényeket ismertetjük. Az alábbi mintaprogram létrehoz egy ST5 osztályt, és annak függvényeit meghívva kapcsolódik a kamerához, majd kiolvassa annak állapotát.



14. ábra. A mérési összeállítás vázlata.

```
import sbigpy

st5 = sbigpy.ST5("tcp://157.181.168.27:3333")
st5.open()
st5.print_status()
```

`ST5.print_status()`: Kiolvassa és a kimenetre írja a kameraprocesszor és a termosztát pillanatnyi állapotát.

`ST5.take_image(exposure_time, ...)`: Kitörli a CCD pixeleit, majd `exposure_time` $\times 1/100$ s idejű expozíciót készít, majd kiolvassa a képet a kameraprocesszor memóriájába.

`ST5.read_image()`: Letölti az utoljára exponált képet a kameraprocesszorról és `uint16` típusú Numpy tömbként adja vissza.

`ST5.get_temperature()`: Kiolvassa a CCD pillanatnyi hőmérsékletét.

`ST5.set_temperature(celsius)`: Beállítja a termosztát kapcsolási hőmérsékletét.

`ST5.reset_temperature()`: Kikapcsolja a termosztátot, és engedi, hogy a CCD szobahőmérsékletre melegedjen.

Néhány hasznos Numpy és matplotlib függvény a képek megjelenítéséhez és manipulálásához:

`imshow(img, cmap='gray')`: Szürkeárnyalatos képként értelmezve jeleníti meg a tömböt.

`clim([a, b])`: Az `imshow` a szürkeárnyalatos skálát automatikusan a két minimum és maximum pixelértékéhez igazítja. A `clim` függvény segítségével a skálát manuálisan rögzíthetjük.

`hist(img, bins)`: Felrajzolja a kép pixelérték-eloszlását.

`uint8(img)`: A képet 8-bites értékké alakítja. Ügyeljünk arra, hogy a `read_image` függvényt 16-bites számokat ad vissza, így a 8-bitessé konvertálás előtt a számokat a 0-255 tartományba kell konvertálni.

`np.imread(file)`: Betölt egy képfájt. Csak (uint8) típusú tömbökkel működik.

`np.imsave(img, file)`: Elment egy képfájt. Csak (uint8) típusú tömbökkel működik.

`np.save(file, arr)`: Elmenti az `arr` tömböt egy `file` nevű fájlba. Akkor hasznos, ha nem `uint8` típusú tömbökkel dolgozunk.

`np.load(file)`: Betölti a `file` nevű fájlban tárolt tömböt. Akkor hasznos, ha nem `uint8` típusú tömbökkel dolgozunk.