



CCD technika

Határfényesség

Ha egy CCD-kép egyfajta minőségét kívánjuk számszerűleg meghatározni, vagy az égen, távcsőben szabad szemmel látható csillagokra kívánunk számszerű minőségjelzőt találni, szokványosan a határfényességet, kevésbé pontos megjelöléssel a határmagnitúdót szoktuk megadni.

De mit is értünk határfényesség alatt? A még látható leghalványabb csillagok fényességét? Ha megkérdezzük néhány, a témához többé-kevésbé értő személyt, először általában ezt a választ kapjuk, relatíve nagy egyetértésben. Majd ha részletesebben kérdezősködünk, hamarosan kiderül, hogy ahány ember, annyiféleképpen vélekednek a határfényességről.

Valójában még az igen konkrét kérdésekre sem kapunk egyöntetű választ. Hogyan válasszunk meg egy CCD-kamerás expozíciót, hogy ugyanolyan körülmények közt egy magnitúdóval jobb határfényességű képet kapjunk? Két és félszer kell többet exponálni, vagy hatszor (ahogy a rengeteget észlelő Herbert Raab, tapasztalatai alapján, gyakran hangsúlyozza)? Vagy a pontos szám épp az egyébként ugyanolyan körülményektől is függ? És hogyan romlik a határfényesség, ha kiterjedt objektumokra próbáljuk megadni, mennyivel lesz rosszabb egy kis galaxisokból álló galaxishalmaz határfényessége, mint a vele egy látómezőben látható csillagoké? És ha nagyok a galaxisok?

Az alábbiakban egy lehetséges választ keresünk ezekre a kérdésekre, és általában a határfényesség természetére. Nem állítható, hogy ez a tárgyalás az egyedül helyes; ám remélhetőleg egyszerű, többé-kevésbé hasznos képet ad, és a fentiekhez hasonló kérdéseket pontosan meg tudjuk válaszolni.

Statisztikus megközelítés

Hogy az alább részletezendő eszmefuttatás olvasmányosabb legyen, a matematikai részleteket csak a legszükségesebb mértékben vázolom. Ez alapján viszonylag gyorsan végig lehet gondolni az egzakt formalizmusokat is, ha valakinek ehhez van kedve; ám a cikk lényege akkor is érthető lesz, ha a matematikai részletek iránt kevésbé érdeklődő Olvasó egyszerűen figyelmen kívül hagyja a matematikát.

A határfényességgel kapcsolatos nézetek sokszínűségének egyik oka az, hogy a határfényesség – szigorúan véve – statisztikus mennyiség. Ennek az az oka, hogy a fényességmérés – fotondetektálás – Poisson-statisztikát követő véletlenszerű folyamat, és e folyamat statisztikus jellege természetes módon örökítődik át a határfényesség meghatározásába. Ezt a tulajdonságot a hétköznapokban nyugodtan el lehet felejteni, ám a felvetett kérdések megválaszolásához ez a megközelítés feltétlenül szükséges.

Hogy konkrét példát említsek: egy adott CCD-képen nem feltétlenül van rajta a látómező összes 18 magnitúdós csillaga, ám lehet, hogy rajta van egy olyan csillag is, amely 20 magnitúdós. Szigorúan véve nem mondhatjuk, hogy e CCD-kamerás felvétel határfényessége 18 magnitúdó (hiszen van 18 magnitúdós csillag, ami nem látszik), és nem mondhatjuk, hogy 20 magnitúdós – ez még félrevezetőbb volna. A 20 magnitúdós csillag csak azért van rajta ezen a képen, mert a csillagról áramló fotonok véletlen eloszlásában épp egy nagyobb csomó érkezett az expozíció alatt. De lehetséges ez a gyakorlatban?

Feltétlenül azt kell mondanunk, hogy igen. Tegyük fel, hogy elég sötét egünk és elég jó kameránk van, egy csillagot meglátunk a CCD-képen, ha annak fénye legalább 6 ADU-t kelt. Válasszunk egy olyan expozíciót, amely mellett a 18,3 magnitúdós csillagok 'várhatóan' produkálnak ennyi! Ez esetben kimutatható, hogy a 17,7 magnitúdós csillagok 90%-át fogjuk majd detektálni (10% véletlenül nem produkál ennyi ADU-t); és például minden 1700 20 magnitúdós csillagból is meglátunk egyet!

Utalhatunk egy a Sky and Telescope-ban az elmúlt években megjelent cikkre. A szerző kiszámítja, hogy kisebb, 6–8 cm-es távcsövekkel is meg lehet látni (vizuálisan!) 15 magnitúdós csillagokat, ha az észlelő elég türelmes, és megvár egy ilyen „fotonsomót”. Az említett példában néhány óras feszült várakozás szükséges ehhez, ami gyakorlatilag akadályokba ütközik, elméletileg azonban lehetséges ez az észlelés.

Így a határfényesség fogalmát pontosabban kell meghatározni. A szakirodalom általában azt a csillagot jelöli meg határfényességként, amit még 90%-kal lehet detektálni, vagyis amely csillag 10 képből 9-en rajta van. Ezzel a meghatározással élve mondhatjuk, hogy a fenti példában 1 ezrelék valószínűséggel meglátunk a határfényességnél 2,4 magnitúdóval halványabb csillagot. (Ezt az ezrelékes küszöböt nevezhetjük a továbbiakban a kép mélységének.)

Ha világosabb egünk van, vagy zajosabb kameránk, akkor már közel sem ilyen kedvező a helyzet. Például ha 30 ADU szükséges egy csillag detektálásához, kereken 1 magnitúdóval, ha 50 darab, akkor 0,7 magnitúdóval látunk a hmg alá „ezrelék valószínűséggel”, ennyivel mélyebb képet kapunk. Vizuális észlelésekre ez úgy igaz, hogy egy receptoron kb. 50 foton másodpercenkénti fényt már érzékelünk. Érthető tehát, hogy sötétebb égen 1–2 perc nézelődéssel sokkal több „határfényesség alatti” csillagot megláthatunk, mint városban; hogy a sötétebb ég háttere mennyivel bársonyosabb, sokkal több csillagot sejtető, mint a városi ég.

A mély-ég észlelők „nehéz objektumai” általában a határfényesség alatt vannak – hiszen 90%-nál jóval kisebb valószínűséggel látszanak. Például egy kvazár 1–2-szer villan be percenként.

A fényszennyezés pedig nem ugyanolyan ütemben csökkenti a kép (vizuális látvány) mélységét, mint a határfényességet, hanem sokkal gyorsabban.

Növeljük a határfényességet!

A hmg növelésére egy kézenfekvő lehetőség, hogy csökkentjük a kép zaját. Ezt elérhetjük a kamera zajának csökkentésével (hűtés), vagy a sötétebb háttérű ég választásával (kivonulás a városból). Ezáltal csökken a csillagok detektálásához szükséges fotoelektronok mennyisége, így a hmg növelésén túl a kép mélységét is növeltük, esetleg jelentős mértékben.

Adott távcsővel és kamerával még egy lehetőség adódik a hmg növelésére: az (effektív) expozíciós idő növelése. De vajon mennyire növeljük az expozíciót, hogy 1 magnitúdóval jobb képet nyerjünk?

Az egyszerű válasz, miszerint az 1 magnitúdó különbség 2,51-szeres fényességkülönbséget jelöl, ennyivel kevesebb foton detektálásához tehát ennyivel kell növelni az expozíciós időt: nagyon gyakran nem igaz. Nem igaz akkor, ha a kép zaja függ az expozíciós időtől – mint például a nem folyékony nitrogénnel hűtött összes kamera esetében. És nem igaz akkor, ha az ég háttérfényessége (a legsötétebb egű magashegyekről is 20,5 magnitúdó négyzetív másodpercenként) már összemérhető a megcélzott háttérfényességgel.

Vagyis általában a 2,5-szeres expozíciónál is többet kell exponálnunk 1 magnitúdó nyereséhez, különösen akkor, ha a 15 magnitúdó alatti tartományt célozzuk meg.

A megoldás kulcsa az, hogy a nem a jelet, hanem a jel/zaj viszonyt kell 2,51-szeresére növelnünk. Hogyan tehetjük ezt meg pl. világos égen?

A Poisson-statisztika fontos tulajdonsága, hogy annyi a szórása, mint a várható érték négyzetgyöke. Ha a kameránk jó, és nagyrészt az égi háttér szórása adja a kép zaját, akkor a feladat a háttér relatív szórásának adott módon való csökkentése. Ez a négyzetgyökös arányosság miatt azt kívánja, hogy az expozíciót 2,51 négyzetével, 6,3-szor hosszabbra válasszuk!

Miután a kamerák sötétzaja is az expozíciós idő négyzetgyökével nő, akkor is közel 6,3-szor hosszabb expozíciókat kell választanunk, ha sötét égen dolgozunk, de nagy sötétzajú kamerával, és a referenciának választott kép eleve elég zajos. A 2,5-szörös növelés nagyon sötét égen, kiváló kamerával; vagy zajosabb kamerával és fényesebb égen, amíg eleve rövid expozíciókról van szó: majdnem elegendő. Az általában előforduló köztes esetekben pedig e két érték közt lesz valahol a megoldás, s hogy pontosan mennyi, az nagyon erősen függ az összes körülménytől.

Kiterjedt objektumok határfényessége

Hogyan változik a helyzet, ha a pontszerű csillagok helyett kiterjedt objektumokra kívánjuk a határfényességet – 90%-os valószínűségű detektálás értelmében – kiterjeszteni? Ehhez szintén egy kis statisztikát kell segítségül hívnunk!

Vizsgáljunk egy egészen speciális esetet: legyen egy zajos háttérű CCD-képen egyetlen kiterjedt objektum, amelyről előzetesen tudjuk, hogy homogén felületi fényességű, és tegyük fel, hogy az összfényességét egyébként ismerjük. Kérdezzük, hogy milyen határfényességű képet készítsünk ahhoz, hogy ez a kiterjedt objektum 90% valószínűséggel látszódjék a képen.

Általánosabb konfiguráció vizsgálata szükségtelenül hosszadalmas lenne, és matematikai tanulságokon kívül nem sok plusz ismeretet adna. Így is még további közelítéseket kellene tenni, hogy az alábbi, egyszerű okoskodást matematikai értelemben használhassuk, ám ezen kitételek nélkül is fogadjuk el, hogy nem teljesen egzakt matematikával azért „elég jó” eredményt fogunk kapni.

Legyen ugyanis a háttér (mérhető) szórása s , mérhető átlagértéke pedig m (ADU). Legyen a kiterjedt objektum felületén a pixelek átlagértéke M , és foglaljon el a kiterjedt objektum N darab pixelt. Annak eldöntésére, hogy a kiterjedt objektumon mérhető nagyobb intenzitás valószínűleg nem a szórás csomósodásának eredménye, használjuk az ún. u -próbát. Számítsuk ki az

$$u = \sqrt{N} \cdot (M - m) / s$$

mennyiséget! Ez a mennyiség standard normál eloszlású, ami hétköznapi nyelven fogalmazva annyit jelent, hogy $u > 1,65$ esetén 90%, hogy nem a háttér véletlen csomósodását, hanem ténylegesen „valami” objektumot látunk. Ha pedig $u > 3$, akkor 999:1000 bizonyossággal mondhatjuk, hogy „ott van”.

Ebből a következőket vonhatjuk le. A homogén, kiterjedt, detektálható objektum egyedi pixeleinek intenzitása fordítottan arányos az objektum területének négyzetgyökével. Magnitúdóban fogalmazva: a kétszer akkora területű, azonos összfényességű objektum detektálásához 0,38 magnitúddal jobb határfényességet kell elérnünk. Hogy ehhez pontosan mennyire kell növelni az expozíciót, az szintén a megfigyelés körülményeitől függ; ám ha meg tudjuk becsülni a háttér szórásának alakulását az expozíciós idő függvényében, elvileg ki is tudjuk számítani az új expozíciós időt.

A főnti formula a seeing hatásának becslésére is alkalmas. Ha ugyanis a csillagok képe – a romló seeing miatt – kétszer akkora sugarú, azaz négyszer akkora területű korong lesz, akkor 0,75 magnitúddal fog romlani a határfényességünk.

Átlag vagy medián?

Talán már említeni sem kell, hogy az utólagos képfeldolgozás alkalmával is jelentősen növelhető a határfényesség, mégpedig több kép kombinálásával. A szoftverek által felkínált két lehetőség közül azonban gyakran nehéz választani: átlagoljuk (összegezzük) a képeket, vagy képezzük a képek mediánját? A medián mellett szól, hogy megszűri a kozmikus sugarakat, és ha az objektum helye kissé változik (a rossz vezetés miatt), akkor a medián a hibás pixeleket, és a rossz darkból adódó struktúrákat is sikeresen kiszedi a képből. Hadd vegyem mégis védelembe a „mezei” átlagot, a számtani közepet.

A medián csak a szimmetrikus eloszlású statisztikát hagyja torzítatlanul. A foton-detektálás statisztikája viszont csak elég fényes objektumok esetén válik szimmetrikussá, halvány objektum esetén nagyon nem szimmetrikus. Ez végül azzal jár, hogy a mediánnal elveszítjük a leghalványabb csillagokat, és azok a halvány csillagok, amelyeket még látunk az eredményképen, szintén mesterségesen halványabbaknak mutatkoznak majd. Mediánnal kombinált képen ne végezzünk semmilyen fotometriát!

Más dolog a flat készítése, ott kötelező minden „szemetet” levenni a képről. Erre a medián kiválóan alkalmas – ám a jó flat intenzitása sok ezer, tízezer ADU pixelenként, ezt már nem torzírtja a medián. A helyesen elkészített világosképeket nyugodtan lehet (sőt, kell) mediánnal kombinálni.

Még egy előnyét szokták a medián kombinációnak említeni: azt, hogy a zajt gyorsabban szűri, mint az átlag (azaz a mediánnal kombinált képek zaja kisebb lenne). Ez egyszerűen nem igaz; e téves elképzelés a kozmikus sugarak hatékony szűréséből adódó rossz általánosítás. Az igazság az, hogy éppen az átlagolás szűri a leggyorsabban a zajt. A mediános kép háttere ugyan sötétebb, de csak azért, mert a medián torzít!

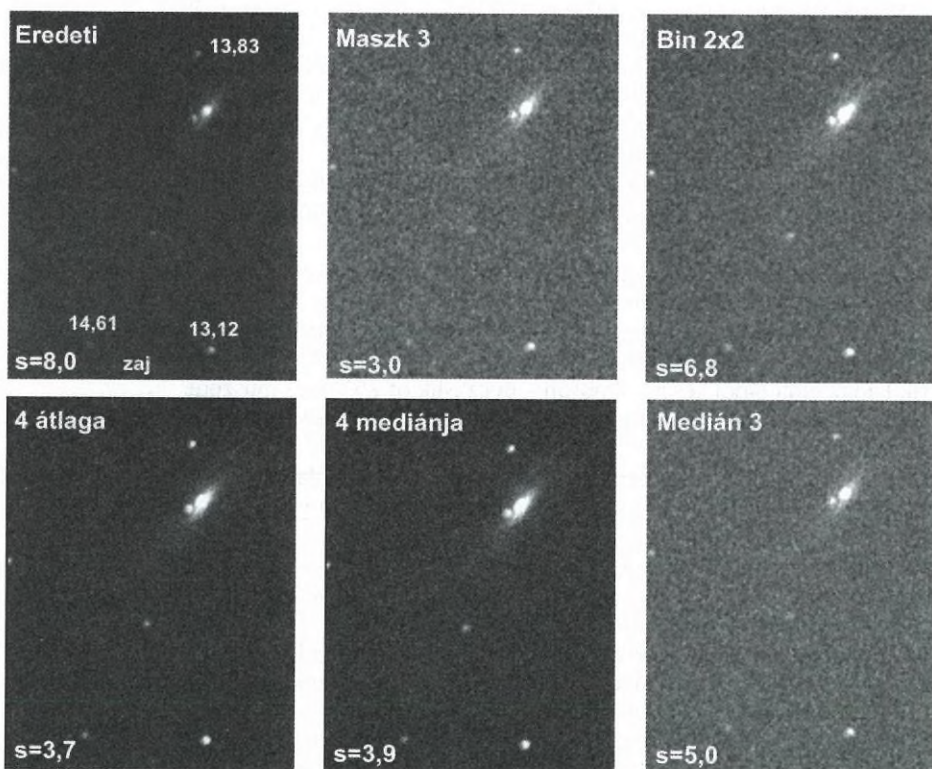
Ha egyetlen kép zaját akarjuk (a felbontás rovására) szűrni, akkor a kockamaszkkal (csupa 1-esből álló konvolúciós szűrők) járhatunk a legjobban. Ez ugyanis kissé elkeni a csillagokat, de a háttérzajt is csökkenti, így a csillagokra vonatkozó határfényes-

ség alig romlik. Pontosabban fogalmazva, a kockamaszk ugyan egyértelműbbé teszi a halvány csillagok képét (különösen, ha szélesek a csillagprofilok), de a háttér véletlen csomósodásait is ugyanígy erősíti. A kiterjedt objektumok azonban lényegesen jobban látszanak majd – és pont az azonos súllyal átlagoló algoritmus emeli ki ezeket a leghatékonyabban a háttérből.

Szerencsés statisztikát követ a fényességmérés: hiszen van olyan statisztikus eljárás, amely a leggyorsabban közelíti a mért eredményt a valósághoz, a lehető leggyorsabban fogyasztja a háttér zaját, és egyben torzításmentes is. Ez az eljárás pedig az átlagolás.

Binnelés

Mi történik, ha „binnelünk”, azaz több pixel képét egy pixelbe olvasztva vizsgáljuk? Ezt az eljárást már a kamerában alkalmazzák, ha túl nagy a kép, és az adott megfigyelés (pl. okkultációk) lényegével összeegyeztethetetlen módon lassú a képek letöltése. Utólag is alkalmazható, ha brutális eszközt keresünk valami nagyon nagy és halvány objektum kiemelésére.



Az SN 2002bo környéke 2002.04.02-én, különböző hmg-javító eljárásokkal kidolgozva

Folytatás a 35. oldalon!

Folytatás a 33. oldalról!

A binnelés ugyanis a kép felbontását drasztikusan csökkenti (2x2 pixelt olvas egybe, vagy akár 3x3-at). A 2x2-es bin a háttér szórását (a négyzetgyökös összefüggés miatt) kétszeresére, a 3x3-as a háromszorosára emeli, a kiterjedt objektumok felületi fényességét viszont négyszeresíti, kilencszeresíti. Így a jel/zaj viszony pixelenként elvileg kétszer (0,75 magnitúdó javulás), háromszor (1,2 magnitúdó) jobb lehet, a kiterjedt objektumok jobban látszanak majd.

Ez azonban csak akkor ilyen hatékony, ha a kiemelő diffúz objektum tényleg „irdatlanul” nagy, és „kétségtelenül” rajta van a képen. Ha kicsi és alig látszó objektumot kívánunk kiemelni (tehát a kétséges detektálás miatt az u-statisztikát már figyelembe kell venni), akkor számolnunk kell azzal is, hogy a 2x2-es bin az objektumok méretét negyedeli. Ekkor semmit sem nyerünk, hiszen az u szorzója felére csökken, a nevező kétszeresére nő, és ezt éppen csak kompenzálja a számláló négyszeresődése.

A binnelés miatt azonban nő a háttér szórása, romlik a csillagok határfényessége, ezért drasztikusan romlik a kép mélysége (lásd Statisztikus megközelítés). Ha ehhez hozzávesszük, hogy a bin rontja a „seeinget”, vagyis szélesíti a csillagprofilokat, akkor nyugodtan levonhatjuk a következtetést: a határfényesség növelésére nem a binnelés a legalkalmasabb.

A főnti okoskodás alátámasztására bemutatunk egy képsorozatot. Az eredeti kép C-11 távcsővel, 20 mp expozícióval, erős szélben, a szegedi Dóm fénybúrája alatt készült az NGC 3190 galaxis környékéről és az SN 2002bo szupernóváról. A kép határfényessége 14 magnitúdó, ám látszik rajta egy 14,61 magnitúdós csillag. Mellette egy hasonló kinézetű álcillag a háttér véletlen csomósodása.

Az eredetitől jobbra egy 3x3-as kockamaszkkal, konvolúciós szűrővel készült kép, jobbra fönt pedig a 2x2-es digitális binnelés eredménye. Jobbra lent a 3x3-as medián maszkkal szűrt kép (érdemes összevetni a kockamaszkkal is). Balra lent és középen 4 (hasonló) kép átlaga és medián kombinációja, 80 másodperc effektív expozícióval. Figyeljük meg a háttér jel/zaj viszonyát, relatív egységekben ($s=...$), a csillagok és a galaxis részleteinek láthatóságát! Figyeljük meg, hogy a zajos csomócska minden képmánipuláció alatt meggyőző csillagocskává változik. A szupernóva kiméréséhez egyébként 20 kép összegére volt szükség.

Következtetések

Az adott műszerrel készített CCD-képek határfényessége (legalább 90% valószínűséggel detektált csillagai) erősen függ a kamera zajától, az égi háttér fényességétől és a seeingtől. A kép mélysége (az egyáltalán látható leghalványabb csillag fényessége) mindezen paramétertől még sokkal inkább függ. A határfényesség 1-gyel való növeléséhez szükséges expozíció akár hatszorosára nő, ha fényszennyezett helyen észlelünk.

Nagy határfényességű képek készítéséhez, halvány objektumok megörökítéséhez vagy megtekintéséhez meneküljünk a városok közeléből. Jó, ha kis sötétzajú kamerát tudunk használni, és a lehető leghosszabb expozíciót választva készítsünk átlagképeket, hogy a lehető legkevesebbszer terheljük meg a végeredményt a kiolvasási zajjal. Nem utolsósorban pedig: várjuk meg a tökéletes nyugodtságú éjszakát, és fókuszál-

junk nagyon pontosan, hogy a csillagok „lényeges” része a lehető legkevesebb pixelre essék.

Kiterjedt objektum biztos detektáláshoz nem szükséges, hogy az objektum felületén sokkal nagyobb intenzitású pixeleket nyerjünk, mint a háttérben. Ha a megörökített égitest elég nagy (Helix-köd, IC443 stb.), akkor is látszani fog a képen, ha a háttérből egyébként csak a szórás töredékével emelkedik ki.

A képek medián kombinációját, medián szűrését és a binnelést csak nagyon indokolt esetben alkalmazzuk. Ha nem nagyon nagy, vagy nem nagyon sérült képekkel dolgozunk, minden szempontból akkor járunk a legjobban, ha a kamerából lejövő eredeti képeket átlagolással kombináljuk, esetleg a végeredményt kockaszakkal szűrjük. Ez utóbbi esetben romlik a csillagok határfényessége, de a kiterjedt objektumoké látványosan javul. Kisebb javításhoz, esztétikai okokból szóba jöhet Gauss-szűrés is, ám a „kockaszűrőhöz” hasonló hatékonyságú zajsűréshez olyan félértékisélességű Gauss-szűrőt kell alkalmaznunk, ami szinte „rondább” képet eredményez, mint az előbbi.

Vannak szintetikus képrekonstrukciós eljárások, amelyek segítségével javítható a képek felbontása, miközben nem növekszik jelentősen a bennük lévő zaj (pl. maximum-entrópia dekonvolúció, vagy még jobbak). Ezen eljárások titka, hogy nagyon sok szempontból az adott megfigyelés körülményeire vannak optimalizálva, de éppen ezért meglehetősen bonyolultak, és a kép minőségét jellemző hangolható paraméterekre hihetetlenül érzékenyek. Elmondható, hogy ezek az eljárások igazán látványosan javítják a képek kinézetét, és számos alkalmazás szempontjából nagyon hasznosak; de csodára nem képesek, és a határfényességet legalább kissé rontják.

SZABÓ M. GYULA

✂

Belépési nyilatkozat

Kérem felvételemet a Magyar Csillagászati Egyesületbe **rendes tagként 2004-re** (a tagdíj összege 400 Ft, illetmény: *Meteor csillagászati évkönyv 2004 és a Meteor c. folyóirat*)

Név:

Cím:

Szül. dátum: év hó nap

Telefonszám: E-mail:

A tagdíjat az MCSE postacímére (1461 Budapest, Pf. 219.)
kérjük feladni rózsaszín postautalványon!

M2003/11