==

11. kapitola o CCD

Charge Coupled Device

= zařízení vázající náboj <- vlastně soustava kondenzátorů (fotodiod, PN přechodů)
s potenciálovými jámami, ve kterých jsou "uvězněné" elektrony
uvolněné z polovodiče (PN přechodu) FOTOELEKTRICKÝM JEVEM

fotoelektrický jev (Einstein 1905):

- pro záření s energií kvant (frekvencí) menší než určitá kritická
se z kovu neuvolní ŽÁDNÉ elektrony BEZ OHLEDU NA MNOŽSTVÍ,
ale po překročení je náboj přímo úměrný intenzitě záření
(mikroskopicky to odpovídá kvantování energie záření
a překročení ionizační energie atomů kovu).

v 80. letech 20. století zařízení způsobilo revoluci v astronomii,
protože je o řád citlivější než fotografie a dnes má i vyšší rozlišení

organizovaný posun nábojů ven z matice způsobovaný změnami potenciálů na PN přechodech
-> časově proměnný elektrický proud na výstupu
-> zesilovač
-> A/D převodník
-> číselná matice A (s hodnotami ADU) odpovídající energii záření
absorbované na jednotlivých pixelech

OBR struktury CCD čipu a posunu nábojů

OBR D/A převodník a komparátor => A/D převodník

ADU (Analog Digital unit) - bezrozměrní INSTRUMENTÁLNÍ jednotka odpovídající energii

signál nabývá hodnot od 0 do 2^N, kde N je počet bitů A/D převodníku (8, 12, 16)
(65536 u astronomických CCD kamer, 255 nebo 4096 u digitálních fotoaparátů)

pozn. o nastavení citlivosti ISO u digitálních fotoaparátů = zesílení na zesilovači

pozn. o barevných snímcích: předřazení filtrového karuselu UBVRI před celý čip
(u digitálních fotoaparátů jsou fixní matice s filtry RGGB před každým pixelem;
u některých kamer dichorický hranol rozdělující záření na trojici čipů).

ukázky zařízení s CCD prvky:

CCD kamera SBIG PixCel 255,
digitální fotoaparát Canon PowerShot A85,
počítačová myš,
atd.

OFFSET, DARK a FLAT <- základní redukce snímku
----

nulový proud (offset, O):
- přidaný elektronicky kvůli zápornému šumu a A/D převodu
- co nejkratší expozice se zakrytým objektivem

temný snímek (dark frame, D):
- tepelný šum, elektrony emitované polovodičem bez vnějšího záření
- stejně dlouhá expoziční doba jako u snímku objektu, ale se zakrytým čipem
  výrazná závislost na teplotě -> chlazení čipu Peltierovým článkem, kapalným dusíkem

rovnoměrné pole (flat field, F):
- koriguje nerovnoměrnou citlivost čipu, prachová zrníčka, vinětaci dalekohledu
- snímek rovnoměrně osvětlené plochy nebo oblohy při svítání, kdy už nejsou
  vidět hvězdy (signál asi v polovině rozsahu ADU)

máme tedy matice A (tj. snímek) O D F -> A' (jako výsledný snímek)

operace s nimi: A' = (A-D-O) / (F-D-O) (pixel po pixelu)

praktická ukázka pořízení korekčních snímků v učebně
a redukce snímku oblohy

ŠUM - Jaké jsou jeho zdroje?

- poissonovský šum (fotonový, od hvězdy, od oblohy)
- temný proud (tepelný), také poissonovský
- vyčítací šum (také tepelný), který vnáší zesilovač před A/D převodníkem;
  není poissonovský, ale "jednorázový" (=> druhá mocnina vvv)
- kvantizace hodnot při A/D převodu

POISSONOVSKÁ STATISTIKA dobře popisuje emisi fotonů, protože:
- jde o NÁHODNÝ proces
- STŘEDNÍ doba mezi emisemi je konstantní
- tato doba NEZÁVISÍ na předchozí emisi

Její důležitou vlastností je, že si mohu VYPOČÍTAT ŠUM (noise N) ZE SIGNÁLU (signal S) jako:

N =~ sqrt(S)

Jednotlivé šumy se přitom sčítají jako:

N = sqrt(N_star^2 + N_sky^2 + N_dark^2 + N_readout^2)

takže výsledný poměr signál/šum je:

S/N = S_star / sqrt(S_star + S_sky + S_dark + N_readout^2)

protože S \propto expoziční době t

=> poměr S/N roste NANEJVÝŠ jako ODMOCNINA z expoziční doby!

OBR S/N(expoziční doba t) =~ sqrt(t) při skládání snímků

PŘED pozorováním si volím, jaký chci S/N a podle toho pozorování plánuji!

přibližně: pro S = 100 je N = 10 % * S, pro S = 10000 => N = 1 % * S

součet 2x2, 3x3 nebo více pixelů (binning) => zvýšení S/N za cenu ztráty rozlišení

při operacích se snímky (odečítání, dělení) se šumy také sčítají v kvadrátech
(proto je vhodné používat PRŮMĚRNÝ offset, dark a flat z několika RŮZNÝCH snímků)

ASTROMETRIE

- poloha zdroje záření na CCD čipu se sub-pixelovou přesností
  <- výpočet 2-D těžiště (CENTROIDu) v dané APERTUŘE:

  T(x,y) = (Suma_aperturu x*ADU / Suma ADU, Suma y*ADU / Suma ADU)

  ^^^ UKÁZKA v programu ccdview

- porovnání polohy s okolními hvězdami, jejichž polohy (RA, DE)
  na obloze znám <- výpočet metodou nejmenších čtverců (LSM)
- katalog USNO 2.0
- astrometrie PSF v přeplněných polích (např. kulových hvězdokupách)

Point Spread Function -> odezva atmosféry/dalekohledu/kamery
na bodový zdroj záření v nekonečnu -> typicky 2-D gaussovský profil
o nějaké typické pološířce (třeba 1 arcsec na obloze => určitý počet
pixelů na čipu, třeba 4x4).

Jaké je ZORNÉ POLE kamery při dané velikosti zobrazovacího prvku D?

tg alpha/2 = D/2 / f

V tomto zorném poli musím mít dostatečný počet vhodně jasných
srovnávacích hvězd! (Přejíždět sem-tam nemohu, to by degradovalo přesnost.)

Jaká velikost jednotlivého pixelu D' je vhodná pro astrometrii?

D' = 2 * f * tg alpha'/2 (tj. tentýž vztah)

-> musím vzorkovat PSF větším počtem pixelů než 1 ("mřížka")
-> seeing je u nás typicky 2"
-> průměr hvězdy vychází několik "
-> alpha' má být méně než 2"
-> při ohnisku f = 2 m je
D' = 2 * 2 m * tg 2"/2
\doteq 4 * 1/60 * 1/(60*60) m
\doteq 20 mikronů

=> při daném f mi z toho plyne ZÁROVEŇ celková velikost CCD čipu
   i velikost jednotlivých pixelů!

Typická přesnost astrometrických měření shromažďovaných MPC je 0.2".

FOTOMETRIE aneb "od hvězdy k ADU"

- porovnání zdroje záření s hvězdou o známé (konstantní) jasnosti
  <- součet signálů v dané APERTUŘE, odečtení oblohy, Pogsonova rce:

m_* - m_známá = -2.5 log (Suma_aperturu ADU_* - Suma ADU_oblohy) / (Suma ADU_známé - Suma ADU_oblohy)

^^^ UKÁZKA v programu ccdview

Příklad typických číselných hodnot pro "známou" *:

- hvězda má zářivý výkon 1e26 W = 1e26 J/s,
  emituje IZOTROPNĚ fotony, mimo jiné s lambda = 500 nm,
  f = c/lambda = 3e8 / 5e-7 Hz = 1.5e16 Hz,
  E = h f = 6e-34 * 1.5e16 J = 1e-17 J,
  => řádově 1e43 kvant za sekundu

Pozn.: kterých kvant je nejvíce (IR nebo V)?
Viz Planckovu fci dělenou energií h*f => více je IR!

- vzdálenost hvězdy (určená podle paralaxy) je r = 500 pc
  = 500 * 2 * 1e5 * 1.5 * 1e11 m = 1.5 * 1e19 m

takže odpovídající plocha sféry je: 4 pi r^2 = 2e39 m^2

před "nastražený" CCD čip musím zařadit nějakou optiku,
jinak by se mi tam "míchalo" záření od jiných hvězd
- tzn. alespoň nejjednodušší dírkovou komoru;
- lepší je ale použít dalekohled s větší sběrnou plochou:

průměr zrcadla 1.0 m, tj. plocha pi R^2 = 0.8 m^2

poměr ploch 0.8/2e39 \doteq 4e-40

odhad počtu fotonů zachycených dalekohledem 1e43 * 4e-40 = 4e3 f. za sekundu

záření se ale po zobrazení na čipu dělí na ~3x3 pixely => ~4e2 fotonu/s připadá na 1 pixel
(to je docela MÁLO kvant, a proto je TAK patrný šum!)

expoziční doba 30 s => ~12000 fotonu

špičková kvantová účinnost čipu může být ~80 % => ~10000 elektronů
vytvořených v pixelu

účinnost A/D převodníku bývá i 1 ADU/e- => signál 10000 ADU

lze očekávat fotonový šum ~ sqrt(10000) \doteq 100 ADU

signál oblohy (při mírném světelném znečištění :) 2000 ADU => šum oblohy 45 ADU

temný proud indukovaný za 30 s je 100 ADU => šum 10 ADU

vyčítací šum kamery je ~ 15 ADU

N = sqrt(N_star^2 + N_sky^2 + N_dark^2 + N_readout^2) = 110 ADU

=> S/N ratio ~= 100

Celou * ale pozoruji v 3x3 pixelech => tzn. menší šum!
protože signály budou ~10 krát větší a

=> S/N ~= sqrt(S) ~= 300 (což je vcelku dobré pozorování)

Jakou má ona hvězda absolutní a zdánlivou hvězdnou velikost?

Jaká jasnost odpovídá nulté magnitudě ve V? (pův. definováno pouze relativně!)

DEF: m = -2.5 mag log (j/j_0), kde j_0 \doteq 2.54e-6 lm/m^2

DEF: M_bolometrická = 0 mag <=> izotropní L_0 = 3.055e28 W

M_bol naší hvězdy je tedy dle Pogsonovy rce:

M_* - 0 mag = -2.5 log L_* / L_0 = -2.5 log 1e26/3e28 mag = 6.2 mag   (OK, u Slunce vychází 4.76 mag)

modul vzdálenosti:

m - M = -2.5 * log (L/r^2 / L/(10 pc)^2) = 5 * log [r]_pc - 5 = +14.7 mag

a zdánlivá * velikost m = 20.9 mag   <- to je na 1 m dalekohled akorát

Jak zjistím tuto ZDÁNLIVOU JASNOST Z ADU?!
<- musím porovnávat s okolními *, u nichž m znám z nějakého katalogu!

Jaky je ZÁŘIVÝ TOK od hvězdy?

Phi = L/(4 pi r^2) = 1e26 W / 2e39 m^2 = 5e-14 W/m^2

pozn. o softwaru pro CCD fotometrii: CCDOPS, Munipack, IRAF

pozn. o automatizaci fotometrie pro série snímků (matching)

převod na STANDARDNÍ FOTOMETRICKÝ SYSTÉM, aby bylo možné snadno
porovnat měření z různých observatoří:

OBR propustnosti standardních filtrů

hvězdné velikosti: instrumentální (u,b,v,r,i) vs. standardní (U,B,V,R,I)
                   relativní (dv,dV) vs. absolutní (v,V)

příklad převodních vztahů:

U = v + Au * (b - v) + Bu * (u - b) - Xu * M
B = v + Ab * (b - v) - Xb * M
V = v + Av * (v - r) - Xv * M
R = v + Ar * (v - r) - Xr * M
I = v + Ai * (v - r) + Bi * (r - i) - Xi * M

(b-v), (v-r) ... barevné indexy, A, B ... barevné koeficienty,
X ... extinkční koeficienty, M =~ sec z ... vzdušná hmota

základní princip:

- změřím uvbri pro nějaké standardní pole hvězd, u kterých znám UBVRI
- spočtu koeficienty A,B,X (z přeurčené soustavy rovnic metodou LSM)

- ve stejné výšce nad obzorem změřím ubvri pro neznámé pole
- z rovnic vypočítám UBVRI pro neznámé srovnávací hvězdy

APLIKACE

Měření jasností proměnných hvězd a~jejich interpretace:

např. zákrytové dvojhvězdy, pulsující proměnné, soustavy s akrečním diskem, ...

světelné efemeridy: JD Min I = JD_0 + P * E

O-C diagram: pozorovaný O minus vypočítaný C čas události
v závislosti na pozorovaném čase O

interpretace O-C <> 0:

- chybně určená perioda, základní minimum -> oprava pomocí LSM,
  správné váhování dle chyb pozorovacích dat (CCD, fotoelektrických, vizuálních)

- reálné změna periody: třetí těleso, přenos hmoty

3. KZ: a^3/P^2 = M_1 + M_2 = M
dM = -2 a^3/P^3 dP
dP/P = -1/2 dM/M

OBR obrazovky z programu Phoebe a model XX Leo od Petra Zasche

ANIMACE dvojhvězdy s akrečním diskem a polaru EX Hya

Měření jasností planetek a inverzní problém určení tvaru:

1. odhad eliptického tvaru z amplitudy světelné křivky:

LV = -2.5 log (pi a b) / (pi b^2) = -2.5 log a/b

různé geometrie Slunce-planetka-pozorovatel při různých opozicích
=> možno jednoznačně rekonstruovat polohu rotační osy v prostoru
a konvexní obálku tvaru

pozn. o řídké fotometrii z teleskopu PanSTARRS a družice GAIA

ANIMACE světelné křivky Erosu od Pepy Ďurecha
