

Procena vremena ekspozicije

Uvod

Posmatrajući željeni objekat CCD kamera beleži i druge izvore koji generišu električni impuls u sistemu. Sav električni impuls koji nije generisan od strane fotona sa izvora karakteriše se kao šum. Tako se mogu definisati određeni izvori šuma:

- toplotni (tamna struja) - zbog termalnog kretanja elektrona čipa
- read-out - posledica same elektronike usled očitavanja snimka
- pozadinski - posledica svetlosnog zagađenja
- kosmički zraci - detekcija kosmičkih zraka koji prave lažne detekcije
- defekti piksela - pogrešna očitavanja piksela (neispravni poluprovodnički spojevi)

Kvalitet snimka definiše veličina koja se naziva odnos signala prema šumu SNR (eng. *signal-to-noise ratio*). Veće vrednosti SNR znače da imamo kvalitetniji snimak. Nepisano pravilo je da se koriste podaci sa SNR većim od 2 ili 3. Time, može se postaviti pitanje, sa određenom opremom (teleskop + CCD) koja je na raspolaganju za posmatranje određenog nebeskog tela, koliko je vreme ekspozicije za datu vrednost SNR ? Odgovor nije uopšte jednostavan i ne postoji apsolutna jednačina po kojoj se može odrediti tačno vreme ekspozicije. Umesto toga, zadržavajući se na nekim pretpostavkama može se dati procena tog vremena.

Šumovi koju se javljaju pri snimanju nekog nebeskog tela su:

Šum signala. U osnovnom slučaju, ako se pretpostavi da nema nikakvog izvora šuma, na kraju opet postoji neka greška merenja (šum signala). Taj šum potiče od samog odbroja fotona koji dolaze sa izvora. Detekcija fotona na CCD čipu odvija se prema Poasonovoj raspodeli koja kaže da je šum koji se registruje proporcionalan korenu broju fotona koji je došao do CCD čipa u nekom vremenu posmatranja. Sa linearnim povećanjem vremena ekspozicije SNR raste sa korenom vremena ekspozicije. Detektovani signal se opisuje brojem elektrona u sekundi $[S_{sig}] = e^-/s$.

Termalni šum. Poznato je da se čestice na određenoj temperaturi kreću (Maksvelova raspodela čestica po brzinama). Tako se ponašaju i elektroni u poluprovodniku samog CCD čipa. Termalni šum se najčešće eliminiše snižavanjem temperature same kamere. Što je niža temperatura to je manji termalni šum. Međutim, na dalje ćemo pretpostaviti da se kamera nalazi na određenoj temperaturi gde je termalni šum potrebno razmatrati. Tada postoji neka konačna verovatnoća da će elektron iz samog poluprovodnika upasti u potencijalnu jamu (upati u odgovarajući piksel). Termalni šum se može eliminisati prilikom kalibracije snimaka. Međutim, ukoliko imamo sirov snimak, termalni šum je karakteristika same kamere na određenoj temperaturi i opisuje se brojem elektrona koji se generišu u jednom satu po pikselu – $[S_{dc}] = e^-/h/pix$.

Pozadinski šum. Svetlosno zagađenje je osnovni izvor granične magnitude optičkog instrumenta koji se koristi, bilo to oko ili teleskop. Takođe, Mesec je još jedan dominantan izvor pozadinskog šuma. Zbog toga su posmatrački ciklusi u noćima bez Meseca ili se posmatra deo neba koji je udaljen više od 90° od Meseca. Pozadinski šum je merljiva veličina i za određeno mesto (u zavisnosti od faze Meseca) daje se kao broj elektrona u jedinici vremena koji padne na jedan piksel – $[S_{sky}] = e^-/s/pix$. Takođe, dosta često, može biti dat i u magnitudama po kvadratnom lučnom uglu – $[B_{sky}] = mag/arcsec^2$.

Read-out. Prilikom očitavanja snimka može se desiti da elektronika stvori dodatno nekoliko elektrona. Generisani broj elektrona se može predvideti i poznat je za svaku kameru i ne zavisi od vremena ekspozicije. Vrednost read-out šuma je data kao broj elektrona koji se generiše po pikselu u toku jednog čitanja – $[S_{ro}^2] = e^-/pix$.

Pored nabrojanih izvora šuma na samu vrednost SNR utiče i binovanje snimka koje za posledicu ima promenu rezolucije što dovodi do povećanja vrednosti SNR ¹. Pored toga i veličina čipa, $[u] = \mu m$, isto utiče na rezoluciju snimka. Naravno, kvantna efikasnost CCD čipa igra značajnu ulogu – predstavlja odnos generisanih elektrona i broja fotona koji su došli do CCD čipa i najčešće se označava kao q .

Na osnovu prethodnog možemo izvesti jednačinu koja nam daje SNR određenog objekta koji se posmatra. Svi šumovi koji utiču na posmatranje se propagiraju u kvadraturama, pošto su to zapravo greške merenja, i na kraju se dobija izraz:

$$SNR = \frac{S_{sig} \cdot t}{\sqrt{S_{sig} \cdot t + R_{sky} \cdot t + S_{dc} \cdot t \cdot n + S_{ro}^2 \cdot n}} \quad (1)$$

gde je t vreme ekspozicije (u sekundama), a n broj piksela koji zahvata izvor na CCD čipu. U prethodnoj jednačini R_{sky} predstavlja broj elektrona u jedinici vremena od pozadine koji je detektovan na CCD čipu i možemo ga povezati sa S_{sky} preko sledeće relacije $R_{sky} = S_{sky} \cdot n$.

Zadatak

Napisati program u programskom jeziku Python3 koji će na osnovu unetih karakteristika teleskopa (veličinu objektiva D i f-broja $f/\#$), CCD čipa (q , S_{dc} , S_{ro}^2 i u), objekta koji se posmatra (V , r) i karakteristika neba datog mesta (S_{sky}) izračunati vreme ekspozicije da bi se dobila zadata vrednost SNR .

Pretpostaviti da lik izvora predstavlja kružnu aperturu određenog radijusa r (u lučnim sekundama), da se posmatranje vrši u V filteru čija je širina $\Delta\lambda = 900\text{\AA}^2$. Smatraćemo da je objekat u zenitu ($X = 1$) i fluks nulte magnitude je $f_0 = 1000 \text{ fotona/s/cm}^2/\text{\AA}$. Potrebno je priložiti grafike zavisnosti vremena ekspozicije od:

1. $SNR = \overline{3, 103}$ za $r = \{1, 1.5, 3\} \text{ arcsec}$
2. $V = \overline{18, 28}$ za $D = \{1, 2.5, 6, 11\} \text{ m}$
3. $B_{sky} = \overline{18, 24} \text{ mag/arcsec}^2$ za $r = \{1, 1.5, 3\} \text{ arcsec}$
4. $q = \overline{0.35, 0.99}$ za $u = \{5, 14, 27, 50\} \mu m$

Prethodna priča odnosi se na tačkasti izvor. Međutim, može se proceniti i vreme ekspozicije u slučaju rasprostratog izvora (npr. galaksija). Uzeti da je $B_{sig} = 25 \text{ mag/arcsec}^2$ i da zauzima 4×4 piksela na CCD čipu. Nacrtati grafik promene vremena ekspozicije za $SNR = \overline{3, 103}$, $n = \{4, 15, 70\}$.

Ako drugačije nije naglašeno zadatkom pretpostavite da su aktuelne vrednosti:

$$\begin{array}{lll} D = 8m & q = 0.7 & V = 25^m \\ f/\# = 2.77 & S_{dc} = 3 \text{ } e^-/s/pix & B_{sky} = 22 \text{ mag/arcsec}^2 \\ S_{ro}^2 = 5 \text{ } e^-/pix & r = 2 \text{ arcsec} & \\ u = 27 \mu m & SNR = 10 & \end{array}$$

¹Za očitavanje binovanog snimka imamo veći broj registrovanih fotona (elektrona) za istu vrednost read-out šuma.

²Pretpostaviti da je fluks konstantan u tom intervalu. Ovo možemo uraditi zato što tražimo red veličine vremena ekspozicije, a ne tačnu vrednost. U suprotnom se stvari dosta komplikuju.

Zadatak za vežbu: Izračunati vreme ekspozicije za M31 ukoliko se posmatra teleskopom Milanković sa kamerom SBIG ST-10ME. Pretpostaviti da je osvetljenost neba $B_{\text{sky}} = 19 \text{ mag/arcsec}^2$. Traži se snimak sa $SNR = 100$.

Literatura

[1] Bolte M., 2006. Signal-to-noise in Optical Astronomy, skripta. http://www.ucolick.org/~bolte/AY257/s_n.pdf.

[2] Massey P., Armandroff T., De Veny J., Claver C., Harmer C., Jacoby G., Schoening B., Silva D., 2002. Direct Imaging Manual for Kitt Peak, skripta. <https://www.noao.edu/kpno/manuals/dim/#ccdtime>.

[3] „Optimum exposures“: <https://starizona.com/acb/ccd/advtheoryexp.aspx>.

[4] „Imaging with CCDs“: http://123.physics.ucdavis.edu/week_7_files/CCD_imaging_lecture.pdf.

[5] „CCD Signal-To-Noise Ratio“: <https://www.microscopyu.com/tutorials/ccd-signal-to-noise-r>

Dodatak

Jedan od efikasnijih načina povećanja SNR vrednosti je poklapanjem više snimaka kraćih ekspozicija i njihovim usrednjavanjem. Na taj način, pošto je signal objekta od interesa konstantan, a šum proizvoljan, imamo da će nakon usrednjavanja doći do porasta SNR kao \sqrt{N} , gde je N broj snimaka koji smo usrednjili. Na taj način, mnogo efikasnije i brže se može dobiti kvalitetniji snimak i time smanjiti posmatračke greške. Postoje i druge tehnike usrednjavanja kako bi se eliminisali određeni šumovi.

Pored usrednjavanja, može da se tražiti i mediana snimaka ili se radi *sigma-clipping* koji eliminiše piksele sa ekstremnim vrednostima (vruće i hladne piksele koji su posledica defekta kamere). Svaki od metoda ima svoje prednosti i mane, ali se najčešće koristi prvi metod.