

---

Sava Jevtić

## Izrada softvera za analizu krive sjaja promjenljivih na DSLR snimcima

---

*Cilj ovog rada je razvoj softvera za generisanje i analizu krive sjaja promjenljive zvezde, pomoću diferencijalne fotometrije, na osnovu snimaka dobijenih DSLR fotoaparatom. Softver je pisan u vidu biblioteke u jeziku Python. Procedure koje program izvršava obuhvataju učitavanje nekompresovanih snimaka, izdvajanje monohromatskih komponenti, binovanje, uklanjanje šuma, detekciju i korekciju pomeranja zvezda između uzastopnih snimaka, kao i aperturnu fotometriju i analizu perioda krive sjaja pomoću Lomb-Scargle periodograma. Program je testiran na zvezdi V2455 Cyg, koja je tipa  $\delta$  Scuti, u koji spadaju zvezde koje pulsiraju pravilno sa amplitudom reda veličine 0.01 do 1 mag i periodom reda veličine 1 h. Radi provere ove procedure, kriva sjaja je uporedo određena u programu *MaxIm DL*. Koristeći naš program, neodređenost merenja magnituda procenjena ispod 0.03 mag. Procenjena vrednost amplitude krive sjaja je  $(0.46 \pm 0.06)$  mag, a period pulsacija je procenjen na  $(2.3 \pm 0.5)$  h. Kriva sjaja dobijena našim programom odstupa od krive dobijene u *MaxIm DL*-u za prosečno 0.024 mag, dakle manje od neodređenosti merenja, što potvrđuje valjanost procedure koju naš program vrši.*

---

## DSLR fotometrija

Program za fotometriju DSLR snimaka rađen je kao biblioteka u programskom jeziku Python. Biblioteka obuhvata tri modula: za pripremanje snimaka (prepare), za analizu podataka (analysis) i za druge procedure (tools) (Jevtić 2019).

Ulazni podaci obuhvataju dve kategorije snimaka: *snimke zvezda* (light frames) i *kalibracione snimke*, kao i *podatke o položaju zvezda* čiji se sjaj meri. Snimci treba da budu u raw formatu (sirovi, nekompresovani format koji ne modifikuje količinu fluksa koja je doprla do detektora). Koristeći biblioteku *Rawkit* (Kunkel 2019), iz sirovog formata izdvajaju se podaci o pikselima, kao i podaci o vremenu snimanja i dužini ekspozicije. Za razliku od CCD snimaka, DSLR fotoaparati daju polihromatsku sliku, što znači da svaki snimak sadrži podatke o intenzitetu u četiri različita filtera (jednom crvenom, dva zelena i jednom plavom). Ovakvu polihromatsku sliku nazivamo Bajerovom matricom. Da ne bismo vršili fotometriju u više filtera istovremeno, vrši se *debajerizacija*, odnosno proces koji obuhvata razdvajanje različitih filtera, čime se dobijaju tri monohromatske slike – crvena, plava i zelena (od usrednjena dva zelena filtera). Na tako dobijenim snimcima izvršava se i jedan opcion korak, *binovanje*, koji više piksela usrednjava kao jedan, s ciljem da se umanjí šum i istakne sjaj zvezde. Bitan proces koji se izvršava pre fotometrije jeste *kalibracija* snimaka, koristeći gorepomenute kalibracione snimke.

Debajerizacija je proces karakterističan za DSLR fotometriju, zato što na CCD detektorima ne postoje ugrađeni filteri, a RGGB matrica je deo samog DSLR fotoaparata. Kalibracija snimaka se radi po uzoru na kalibraciju CCD snimaka. Kalibracioni snimci se dele na tri vrste, koje se razlikuju po načinu snimanja i svrsi; to su: *bias*, *dark* i *flatfield* snimci (Warner 2006).

---

Sava Jevtić (2000), Novi Beograd, učenik 4. razreda Matematičke gimnazije u Beogradu

MENTORSTVO:

Lazar Živadinović, student Matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

Sanja Mihajlović, studentkinja Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu

- Bias snimci (bias frames) se snimaju sa nultom ili jako malom ekspozicijom i poklopljenim objektivom. Oni predstavljaju elektronski šum na čipu fotoaparata.
- Dark snimci (dark frames) se snimaju istom ekspozicijom i na približno istoj temperaturi kao snimci zvezda, takođe sa poklopljenim objektivom; predstavljaju termalni šum koji se akumulira na čipu, tj. šum koji raste sa vremenom i sa temperaturom.
- Fletfild snimci (flat field frames) se dobijaju kada je kamera izložena uniformnom osvetljenju; predstavljaju neravnomernu raspodelu osetljivosti piksela na svetlost. Ovi snimci ne moraju biti snimani u istim uslovima kao i snimci zvezda.

Za razliku od CCD detektora, DSLR fotoaparati tipično nisu u mogućnosti da očitaju broj elektrona na pikselu u jednom trenutku, već se radi snimak sličan dark snimku, samo sa dosta manjom ekspozicijom. Prema tome, bias snimci će imati određenu količinu termalnog šuma, ali zanemarljivu u odnosu na tu koja se pojavljuje na snimcima zvezda.

Procedura kalibracije je sledeća:

1. po pojedinačnim pikselima se izračuna medijana za bias snimke; rezultat ovoga naziva se *master bias snimak* (Warner 2006)
2. master bias snimak se oduzme od dark i snimaka zvezda
3. slično kao kod 1. koraka, dobije se *master dark snimak*
4. master dark snimak se oduzme od snimaka zvezda na isti način
5. ako za fletfild snimke postoje bias i dark snimci, ponove se prethodna četiri koraka za fletfild snimke
6. fletfild snimci se normalizuju (svaka vrednost piksela se podeli sa srednjom vrednošću na celom snimku)
7. snimci zvezda se dele fletfild snimcima.

Nakon ovoga, na snimcima zvezda može raditi fotometrija. Procedura od učitavanja snimka do kalibracije vrši se u skripti *prepare.process*, i to obuhvata *Monochrome* klasa *DSLRIImage*, čija instanca sadrži sve potrebne podatke o određenom snimku.

Budući da teleskop ne može savršeno da prati prividno pomeranje zvezde u odnosu na Zemlju, potrebno je naći to pomeranje od snimka do snimka. To se vrši u skripti *tools.align*. Ovo podešavanje radimo pomoću *kros-korelacije*. Kros-korelacija podrazumeva računanje integrala proizvoda dve funkcije (u našem slučaju, intenzitete piksela na snimcima posmatramo kao funkcije položaja). Položaj maksimuma ovog integrala određuje pomeranje između ta dva snimka. Kros-korelaciju vršimo na dva „prozora” dve uzastopne slike. Prozori imaju iste koordinate u pikselima, i pomoću kros-korelacije nalazi se prividni pomeraj zvezde na jednom snimku u odnosu na drugi. Pomeranje u odnosu na snimak nije linearno, pošto zvezde prividno rotiraju u odnosu na severni nebeski pol. Zbog ovoga, kros-korelacija se radi odvojeno za svaku zvezdu.

Vrsta fotometrije koju mi radimo naziva se *aperturna fotometrija*. To znači da se podaci prikupljaju iz dve strukture: aperture, kružne oblasti koja obuhvata celokupan ili skoro celokupan sjaj zvezde, i anulusa, kružnog prstena sa istim centrom kao i zvezda, koji obuhvata ono što se smatra za šum. Unutrašnji poluprečnik anulusa veći je od poluprečnika aperture, kako se ne bi slučajno desilo da anulus zahvati oblast zvezde.

Pošto sjaj zvezde na snimku možemo predstaviti Gausovom raspodelom (Roth 2009), parametri aperture određuju se tako što se na zvezdu fituje dvodimenzionalni gausijan. Maksimum funkcije naziva se centroid zvezde, što je ujedno i centar aperture. Standardna devijacija funkcije se množi faktorom  $2 \cdot \sqrt{2 \ln 2}$ , i time se dobija poluprečnik aperture. Ovo se radi zato što se najveći deo sjaja zvezde nalazi u prečniku od 2 do 3 FWHM (full width at half maximum – širina na polovini maksimuma sjaja) zvezde (jednačina 1). Širina anulusa, kao i razmak između aperture i anulusa, jednaki su poluprečniku aperture.

$$\text{FWHM} = 2 \cdot \sqrt{2 \ln 2} \cdot \sigma \quad (1)$$

gde je  $\sigma$  standardna devijacija.

Prvi deo postupka fotometrijske analize podrazumeva merenje instrumentalnog fluksa zvezde ( $F_1$ ). Ovo se vrši tako što se sabere svi pikseli unutar aperture ( $a$ ), zatim se od njih oduzme

srednja vrednost piksela iz anulusa (A) pomnožena površinom aperture:

$$F_1 = \Sigma_a - \Sigma_A \cdot \frac{S_a}{S_A} \quad (2)$$

gde je  $\Sigma$  zbir vrednosti svih piksela, a  $S$  površina.

Nakon merenja instrumentalnog fluksa za neku zvezdu, koristi se jednačina 3 da se on pretvori u instrumentalnu magnitudu  $m_1$ :

$$m_1 = -2.5 \cdot \log_{10} F_1 \quad (3)$$

Instrumentalna magnituda kod referentnih zvezda varira od snimka do snimka (usled faktora kao što su uticaj atmosfere i neravnomerna osetljivost detektora na svetlost), tako da instrumentalnu magnitudu zvezde treba preračunati u sistem kataloških magnituda, za šta se koristi posmatranje referentnih zvezda. Prvo računamo srednju vrednost za kataloške (unapred poznate), a onda i za instrumentalne (merene) magnituda referentnih zvezda. Njihova razlika predstavlja magnitudu „nulte tačke”. Kada na instrumentalnu magnitudu dodamo magnitudu nulte tačke (jednačina 4), dobijamo katalošku magnitudu promenljive zvezde (Warner 2006):

$$m_k = m_1 + \bar{m}_{rk} - \bar{m}_{r1} \quad (4)$$

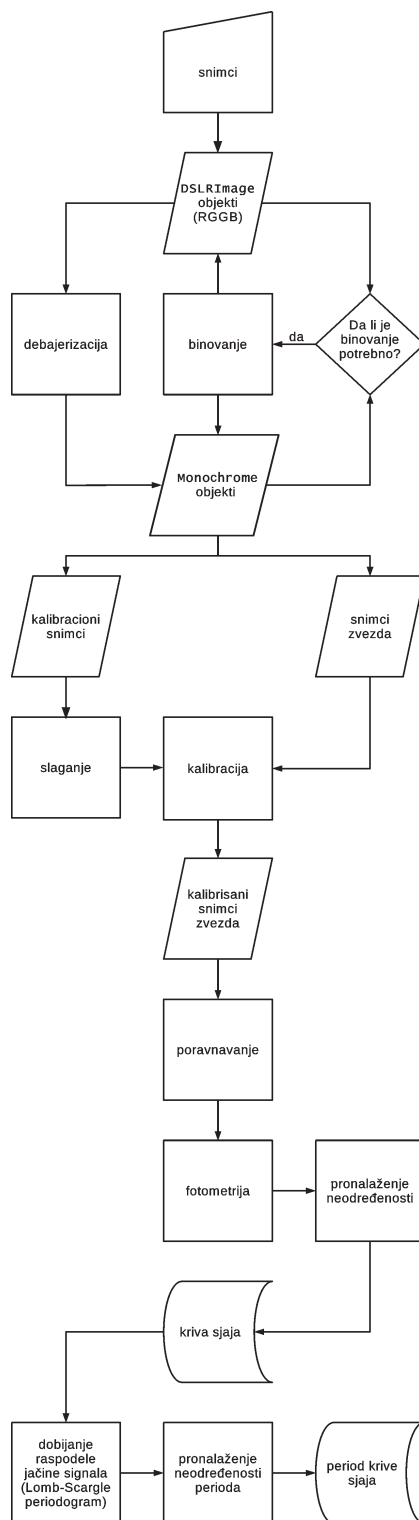
gde je  $m_k$  kataloška magnituda,  $\bar{m}_{rk}$  srednja kataloška magnituda referentnih zvezda, a  $\bar{m}_{r1}$  srednja instrumentalna magnituda referentnih zvezda. Radi računanja neodređenosti magnitude, određujemo odnos signala i šuma, odnosno SNR (signal-to-noise ratio) snimaka. SNR računamo pomoću jednačine 5:

$$\frac{\bar{a}}{\sigma_A} \cdot \sqrt{S_a} \quad (5)$$

gde je  $\bar{a}$  srednja vrednost intenziteta piksela u aperturi,  $\sigma_A$  standardna devijacija intenziteta piksela u anulusu, a  $S_a$  površina aperture.

Slika 1 (desno). Algoritam za dobijanje krive sjaja i njenog perioda

Figure 1 (right). The algorithm for obtaining the lightcurve and its period



Konačna kriva sjaja se dobija kada se za svako merenje izračuna neodređenost, što se radi pomoću SNR (Warner 2006):

$$\Delta m = \frac{1.0857}{\sqrt{\text{SNR}}} \quad (6)$$

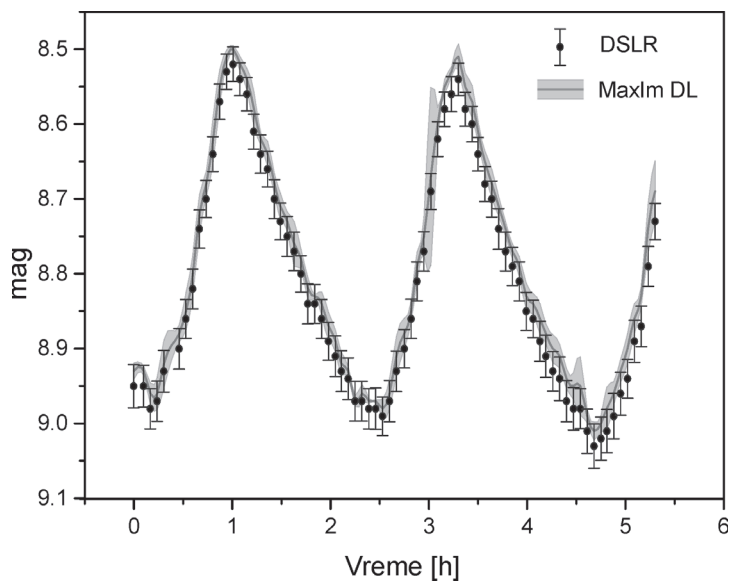
Fotometrija i procena neodređenosti krive sjaja vrše se u scripti `analysis.photometry`.

Algoritam za dobijanje krive sjaja i određivanje njenog perioda vizuelizovan je na slici 1.

## Rezultati testa i diskusija

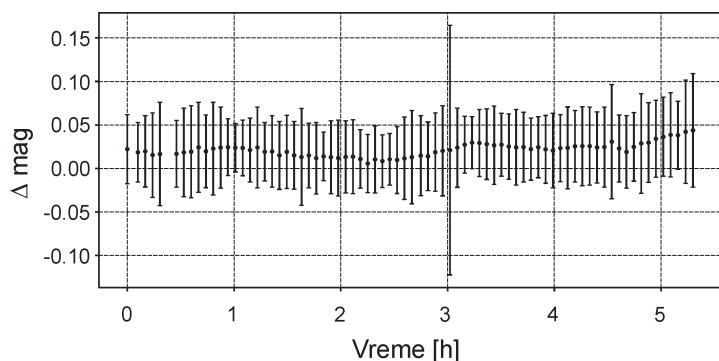
Izvršena je fotometrija na 77 snimaka zvezde V2455 Cyg (pri čemu je svaki od njih dobijen

slaganjem po 4 uzastopna snimka sa razmakom od 1 min 2 s) uz dve referentne zvezde: HD 204569 i BD+46 3328. Dobijena je kriva sjaja sa procenjenom amplitudom ( $0.46 \pm 0.06$ ) mag, pri čemu su greške merenja procenjene ispod 0.03 mag. Rezultati su upoređeni sa rezultatima slične procedure na istim snimcima u programu MaxIm DL. Dobijene krive sjaja (slika 2) imaju međusobno srednje odstupanje od 0.024 mag, a maksimalno odstupanje iznosi 0.044 mag (slika 3). Srednje odstupanje između ovih krivih je u granicama greške merenja magnitude, pa se može zanemariti. S druge strane, ova razlika se može objasniti razlikama u proceduri: u MaxIm DL-u neodređenost magnitude je računata prema formuli:



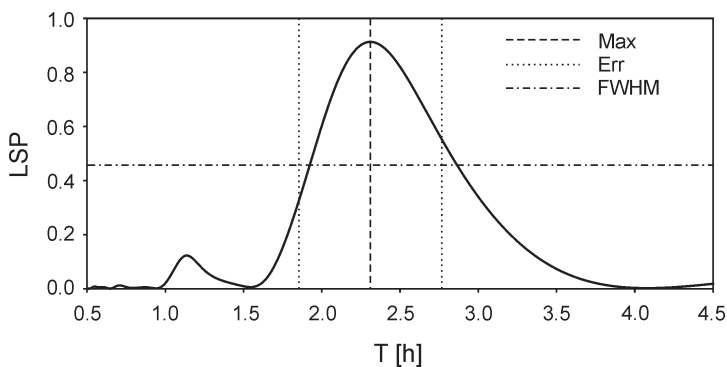
Slika 2. Krive sjaja V2455 Cyg dobijene našim softverom (DSLR) i u MaxIm DL-u (u drugom slučaju punom linijom su spojene srednje vrednosti, a senkom je označen interval greške)

Figure 2. Lightcurves of the star V2455 Cyg obtained in our software (DSLR), and with MaxIm DL (in the latter case, the mean values are connected with a solid line, while the uncertainty margin is marked with a shadow)



Slika 3. razlika između krive sjaja dobijene u našem softveru i one dobijene u MaxIm DL-u

Figure 3. difference between the lightcurve obtained in our software and the one obtained in MaxIm DL



Slika 4. Lomb-Scargle periodogram dobijene krive sjaja

Max – položaj maksimuma  
Err – margine greške  
FWHM – nivo polovine vrednosti maksimuma

Figure 4. The Lomb-Scargle periodogram of the obtained lightcurve

Max – location of the maximum  
Err – uncertainty margin  
FWHM – half maximum line

$$\Delta m = 2.5 \cdot \log_{10} \left( 1 + \frac{\Delta F}{F} \right)$$

gde je  $\Delta F$  standardna devijacija fluksa na 4 snimaka koji su složeni da bi se dobio konačni snimak, a  $F$  srednja vrednost tog fluksa, dok je neodređenost u našem programu računata prema formuli 6. Formula 6, koja je preuzeta iz literature (Warner 2006), prvenstveno je namenjena za CCD fotometriju, pa ne možemo biti sigurni da se ista tačnost i preciznost mogu dobiti ako se ista formula primeni za DSLR.

Na dobijenu krivu sjaja primenjen je Lomb-Scargle periodogram, algoritam koji fitovanjem sinusoide procenjuje frekvenciju, odnosno period nekog signala, tako što određuje zavisnost amplitude fitovane sinusoide od njene frekvencije (slika 4). Maksimum dobijene raspodele smatra se za period krive sjaja, a FWHM datog maksimuma uzima se kao neodređenost merenja. Na ovaj način dobijen je rezultat  $(2.3 \pm 0.5)$  h, dok je za krivu sjaja u MaxIm DL-u dobijen rezultat  $(2.3 \pm 0.7)$  h. Dobijeni rezultat je tačan, ali ne i precizan. Ovo se može objasniti nedovoljno velikim brojem snimaka, od kojeg zavisi preciznost procene perioda. Još jedan faktor koji doprinosi nepreciznosti izračunatog perioda je to što Lomb-Scargle periodogram koristi sinusoide, koje ne aproksimiraju oblik krive sjaja dovoljno precizno. Modelovanje krive sjaja i fitovanje modela krive sjaja umesto sinusoide moglo bi da učini periodogram preciznijim.

## Zaključak

Procedura je upoređena sa jako sličnom procedurom u MaxIm DL-u, za koju je pokazano da je pouzdana (Jevtić 2017). Na osnovu rezultata ovog poređenja možemo zaključiti da je naš program funkcionalan za fotometriju promenljivih zvezda, dok god je pomeranje promenljive i referentnih zvezda dovoljno malo. Funkcionalnost našeg programa takođe velikim delom zavisi od ulaznih podataka (količina šuma na snimcima, broj snimaka, broj referentnih zvezda).

Moguće unapređenje metoda je poboljšanje načina za određivanje perioda promene sjaja: da se umesto sinusoide na krivu sjaja fituje Furijeov red ili modelovana kriva sjaja. Takođe bi bilo korisno detaljnije analizirati DSLR fotometriju i korigovati formulu za grešku koja se primenjuje u CCD fotometriji, što bi potencijalno moglo da umanji grešku merenja magnitude.

Efikasnije funkcionisanje programa može se postići tako što se poboljša modul za poravnavanje snimaka na način da može naći tačan globalno pomeranje jednog snimka u odnosu na drugi (trenutno može samo lokalno). Na osnovu toga može se na snimke zvezda primeniti slaganje snimaka, što može da umanji šum i poboljša preciznost krive sjaja.

**Zahvalnost.** Autor želi da se zahvali Petru Sauliću na pomoći pri prvim koracima izrade softvera.

## Literatura

- Jevtić S. 2017. DSLR fotometrija promenljive zvezde V2455 Cyg. *Petničke sveske*, 76: 40.
- Jevtić S. 2019. DSLR photometry pipeline. <https://github.com/s-jevtic/DSLR-photometry-pipeline>
- Kunkel M. 2019. Photoshell – rawkit. <https://github.com/photoshell/rawkit>
- Roth G. 2009. *Handbook of Practical Astronomy*. Springer
- Warner B. 2006. *A practical guide to lightcurve photometry and analysis*. Springer

---

*Sava Jevtić*

## Software for Variable Star Light Curve Analysis on DSLR Frames

The purpose of this project was to develop a software that generates and analyzes the lightcurve using differential photometry based on DSLR camera frames. The software is written as a library for the programming language Python. The program encompasses the procedures of loading uncompressed frames (in RAW format) from the DSLR, extracting monochrome components, binning, noise reduction, detection of the shift between two adjacent frames, aperture photometry and the analysis of the period of the lightcurve, using the Lomb-Scargle periodogram. The program was tested on the star V2455 Cyg, from the variable star class  $\delta$  Scuti. The stars from this class pulsate regularly, with the amplitude ranging between 0.01 and 1 mag, and the period having the order of magnitude of 1 h. In order to verify this procedure, a lightcurve was also obtained in the software MaxIm DL. Using our program the magnitude uncertainties were estimated lower than 0.03 mag, the estimated amplitude of the lightcurve ( $0.46 \pm 0.06$ ) mag, and the period is estimated to be ( $2.3 \pm 0.5$ ) h. The mean deviation of our lightcurve compared to that from MaxIm DL is 0.022 mag, which is less than the measurement uncertainties, confirming the validity of the procedure. 