

Osservatorio Astronomico Pubblico di Soresina Gruppo Astrofili Soresinesi – G.A.S.

Sezione Stelle Variabili

Esito dei Test su camera digitale Nikon D600 per fotometria stellare

Davide Iannone

Le risultanze sperimentali descritte in questo documento sono state ottenute acquisendo immagini RAW a 14 bit non-compresse, nelle date 31/03/2018 e 07/04/2018, seguendo le indicazioni contenute nelle appendici della guida “AAVSO - DSLR Observing Manual v1.4”, di cui si rimanda al seguente link:

<https://www.aavso.org/dslr-observing-manual>

Per realizzare i rilevamenti sui frame, è stato impiegato il software freeware (solo se per uso non-commerciale) per l’elaborazione delle immagini astronomiche *IRIS*, di cui si rimanda al seguente link:

<http://www.astrosurf.com/buil/iris-software.html>

e il software freeware (solo se per uso non-commerciale) *IrfanView*, di cui si rimanda al seguente link:

<https://www.irfanview.com/>

Per approfondimento sulla terminologia delle varie grandezze analizzate da questo test, si rimanda al seguente libro:

Berry – Burnell, “*The Handbook of Astronomical Image Processing*”

I test sono stati condotti con la seguente strumentazione, messa a disposizione da Alberto Cortesini e da Rosalia Intravaia: camera Nikon D600 applicata al fuoco diretto di un telescopio riflettore Newtoniano D = 254mm e rapporto di apertura F = 4.5, sull’obiettivo del quale è stato applicato un flat field generator, artigianalmente costruito con un panno bianco, illuminato frontalmente da una sorgente luminosa di colore bianco, prodotta da una torcia a batterie domestica.

1. Decodifica RAW → CFA

E’ stato verificato che il modello di decodifica per Nikon D600 (e per Nikon D500, di cui non è stato effettuato il test in modo completo) corrisponde al modello di decodifica per Nikon D300, impostabile da *IRIS*.

La sequenza dei canali nei quali si splittano i frame CFA (Color Filter Array) è pertanto riconosciuta come la seguente:

C1 ↔ G1
C2 ↔ B
C3 ↔ R
C4 ↔ G2

2. Transiente termico

Per decidere la tecnica di ripresa più appropriata, è stato necessario stabilire il *rateo di crescita* della temperatura del sensore in funzione del tempo. Tuttavia, Nikon non rilascia informazioni sulla temperatura del sensore, per mezzo dei log *EXIF*, per cui è stato necessario analizzare l'andamento temporale del segnale (in *unità analogico-digitali*, o “ADU/pixel”) sui frame dark.

Sono stati acquisiti 100 frame consecutivi, da 20 secondi di esposizione ciascuno, a partire dalle condizioni di camera spenta all'equilibrio termico con l'ambiente, ottenendo le seguenti variazioni di segnale, uguali su ciascun canale a ISO fissata:

ISO 800 → $\Delta I = 1 \text{ ADU} / 100 \text{ frame} \times \text{pixel}$
ISO 1600 → $\Delta I = 1 \text{ ADU} / 100 \text{ frame} \times \text{pixel}$
ISO 3200 → $\Delta I = 2 \text{ ADU} / 100 \text{ frame} \times \text{pixel}$

Si è pertanto stabilito, in forza delle misurazioni sui valori del guadagno strumentale (vedasi nel seguito), che nelle condizioni sperimentate il sensore presenta un transiente termico sufficientemente lungo, da poter considerare costante il segnale dovuto al dark frame entro la finestra temporale di operatività.

3. Dead pixel

La camera non presenta dead pixel: tutti i pixel reagiscono almeno alla corrente di dark, come è stato verificato sui quattro canali.

4. Soglia di saturazione

Il segnale è stato misurato come valore medio su una ROI quadrata (region of interest) centrale al frame, con lato di 200 pixel, conducendo ai valori seguenti espressi in *ADU / pixel*.

ISO	G1	B	R	G2
100	15802	15879	15879	15828
200	15803	16383	16383	15828
400	15799	16383	16383	15825
800	15806	16383	16383	15832
1600	16383	16383	16383	16383
3200	16383	16383	16383	16383

5. Guadagno di sistema

La rilevazione è stata condotta in regime di presunta linearità, poi confermata dal test di risposta lineare (vedasi nel seguito), operando su ROI quadrate di lato 100 pixel, centrali al frame laddove possibile: per il solo caso di ISO 200 non sono stati esplorati adeguati tempi di esposizione, tali da garantire segnale non saturato sulla ROI centrale, quindi si è selezionata una ROI laterale centrata al pixel (2700,230) con un livello di segnale ancora sufficientemente alto.

Nella tabella seguente si riassumono i valori del guadagno di sistema, espresso in *elettroni / (ADU x pixel)*, riportati in **grassetto**; in parentesi rotonde sono riportati i valori del segnale medio sulla ROI esplorata, espressi in *ADU / pixel*.

ISO	G1	B	R	G2
100	5.0469 (7141)	5.0641 (6178)	4.0561 (3116)	4.8516 (7125)
200	2.3950 (7173)	2.5579 (6194)	2.0934 (3131)	2.3840 (7158)
400	1.0002 (7925)	1.0565 (6972)	1.0408 (3454)	1.1880 (7922)
800	0.5919 (6288)	0.5280 (5563)	0.5137 (2748)	0.5962 (6291)
1600	0.3047 (6286)	0.2600 (5570)	0.2645 (2756)	0.3039 (6286)
3200	0.1484 (6305)	0.1286 (5579)	0.1267 (2777)	0.1525 (6310)

Da un'analisi dell'andamento del guadagno in funzione della ISO dichiarata da Nikon, traspare una correlazione leggermente migliore sul canale G2, rispetto al canale G1.

6. Offset bias e termico

Tutti i valori sono intesi espressi in *elettroni / pixel*. Le analisi sono state ottenute su una ROI centrale quadrata di lato 100 pixel.

ISO	G1	B	R	G2
100	0.000	0.000	0.000	0.000
200	0.000	0.000	0.000	0.000
400	0.100	0.211	0.208	0.000
800	0.118	0.158	0.000	0.060
1600	0.091	0.026	0.000	0.122
3200	0.089	0.051	0.025	0.153

7. Full Well Capacity

I valori sono riassunti nella seguente tabella, e sono espressi in *elettroni / pixel*.

ISO	G1	B	R	G2
100	79751	80413	64407	76791
200	37848	41906	34297	37734
400	15803	17309	17052	18801
800	9356	8650	8415	9439
1600	4992	4259	4334	4978
3200	2432	2108	2075	2498

8. Rumore di lettura e termico

I valori sono riassunti nella seguente tabella, e sono espressi in *elettroni / pixel*. Le analisi sono state ottenute su una ROI centrale quadrata di lato 100 pixel.

ISO	G1	B	R	G2
100	2.8550	2.8647	2.2945	2.7445
200	2.0322	2.3513	1.7763	2.0229
400	1.6267	2.0171	1.9135	1.9322
800	1.7160	1.6054	1.5255	1.6864
1600	1.6807	1.5994	1.5899	1.7189

3200 |1.6162|1.5464|1.5227|1.6371|

9. Range di risposta lineare

Questo test è stato ottenuto a guadagno quasi unitario (ISO 400), in modo da avere una più diretta corrispondenza tra segnale rivelato ed elettroni (fotoni) conteggiati.

L'andamento del segnale in funzione del tempo di esposizione (la sorgente luminosa può soltanto fornire un flusso costante) ha evidenziato, inoltre, la presenza di *glitches* ossia anomalie di risposta, in corrispondenza dei tempi di esposizione della forma $T = 1 / (3k)$ secondi con k intero, e dell'esposizione $T = 1 / 13$ secondi: probabilmente ciò è dovuto ad un errore di arrotondamento per difetto, nel meccanismo di regolazione dell'apertura dell'otturatore, che tende a rimanere aperto per un intervallo di tempo leggermente inferiore a quanto dichiarato da Nikon.

L'analisi del range di linearità è stata condotta sui quattro canali, ed è stato determinato un intervallo massimale comune (la scelta è stata fatta compatibilmente ai dati disponibili), in modo da essere contenuto nei singoli range di risposta lineare determinati per ciascun canale separatamente: il range di risposta lineare della Nikon D600 considerata, adatto a finalità fotometriche, è valutato in

[40 ADU/pixel – 13000 ADU/pixel]

a ISO 400, e comunque valido anche per ISO superiori (il tratto lineare del diagramma di risposta tenderà a verticalizzare, guadagnando qualche ulteriore valore verso l'alto, ma che per precauzione escludiamo dal range).

L'analisi del range di risposta lineare è stata condotta con il metodo dei minimi quadrati sul canale G2, fittando i punti presenti sul tratto iniziale del diagramma di risposta, al fine di massimizzare il coefficiente di correlazione e l'ampiezza dell'intervallo esplorato con il modello lineare, risultando in

$$\langle \text{ADU} \rangle = 148172.124145909 * T - 10.6865014067, R^2 = 0.999968817$$

Per completezza, è stato esplorato con modello lineare il tratto iniziale per valori bassi del segnale (40 ADU / pixel → 200 ADU / pixel, per un totale di otto punti), osservando ancora una forte correlazione e, quindi, confermando un trend lineare a quei livelli di segnale.

10. Dark current

I valori sono intesi espressi in *elettroni / (pixel x secondo)*.

ISO	G1	B	R	G2
800	0.059	0.048	0.046	0.054
1600	0.037	0.031	0.028	0.035
3200	0.024	0.022	0.018	0.027

11. Esposizione ottimale per il flat field e qualità

E' risultata la seguente tabella indicativa, per tempi di esposizione tali da garantire un segnale medio di circa 7400 ADU / pixel sui canali G1 e G2, entro una ROI centrale di lato 100 pixel.

ISO 400 → 1 / 20 secondi

ISO 800 → 1 / 40 secondi

ISO 1600 → 1 / 80 secondi

ISO 3200 → 1 / 160 secondi

Per valutare la qualità del flat field, si sono acquisiti due flat a ISO 400: uno con la camera ruotata per 90°. Dopo lo split dell'immagine decodificata CFA, si sono effettuati i rapporti tra canali corrispondenti, amplificandone il risultato di un fattore 10000. Poi, per considerare la sola zona centrale dell'immagine (dato che per applicazioni fotometriche cerchiamo di ridurre l'effetto del coma e della vignettatura), si è ritagliata una ROI centrale di lato 500 pixel. Si è così ottenuto per la ROI la fluttuazione percentuale seguente:

G1 → 2.6%

B → 2.8%

R → 3.2%

G2 → 2.6%

Queste disuniformità sono ***ben 6 volte maggiori*** del massimo consentito da AAVSO (fluttuazioni massime dello 0.5%). Tuttavia, per ovviare all'inconveniente ho sviluppato una tecnica di acquisizione dati alternativa: essa si divide in quattro fasi, nelle quali il corpo macchina della Nikon D600 è ruotato per 90° dalla precedente fase a quella successiva, sul portaoculare del telescopio. In questo modo si dovrebbero ottenere condizioni sperimentali dalle quali, dopo avere ottenuto i corrispondenti frame calibrati (rimozione, dalle immagini, dei dark frame e divisione per il flat field corrispondente a quella fase), si può passare alla media delle immagini di ogni fase (dopo averle allineate): questa procedura (che ha già rimosso le imperfezioni dell'ottica del telescopio e del sensore, dalle immagini, operata all'interno di ciascuna fase sperimentale) "equivale" a dividere per un ***flat field medio armonico***, la cui procedura di calcolo prevede che le disuniformità dei flat delle singole fasi vengano distribuite equispaziate angolarmente intorno al centro, così da ottenere un flat medio nel quale si abbia ***isotropia nel gradiente di intensità*** (questa condizione è proprio ciò che bisogna ottenere, nell'ipotesi in cui l'asse ottico del flat field generator sia collimato all'asse ottico del telescopio).

La motivazione del fatto che la procedura descritta sopra equivale a dividere per un flat armonico medio risiede semplicemente in questo calcolo:

$$\begin{aligned} & [(I_1 / Flat_1) + (I_2 / Flat_2) + (I_3 / Flat_3) + (I_4 / Flat_4)] / 4 = \\ & = I * [(1 / Flat_1) + (1 / Flat_2) + (1 / Flat_3) + (1 / Flat_4)] / 4 = I / < FlatArmonicoMedio > \end{aligned}$$

dove: nel primo passaggio sto calcolando il frame calibrato medio, dovuto alle quattro fasi sperimentali a camera ruotata, supponendo di avere già de-rotato i frame I_k (ottenuti semplicemente sottraendo il master dark dalle immagini grezze); nel secondo passaggio ho raccolto a fattore comune le immagini I_k , perché posso supporre siano identiche (a meno di effetti di rifrazione, poco apprezzabili) ad una immagine $I = I_1$; nel terzo passaggio ho riscritto il secondo fattore del secondo passaggio tramite la definizione di media armonica, cioè

$$\begin{aligned} FlatArmonicoMedio & := \{[(1 / Flat_1) + (1 / Flat_2) + (1 / Flat_3) + (1 / Flat_4)] / 4\}^{-1} = \\ & = 4 / [(1 / Flat_1) + (1 / Flat_2) + (1 / Flat_3) + (1 / Flat_4)] \end{aligned}$$

Allo scopo di quantificare in modo appropriato la ***qualità*** di un tale flat field medio, risultante dalle procedure indicate qui sopra, è stato preparato il test descritto qui sotto.

1. Prendere un campione di Flat decodificato in CFA

Menu File > Load a Raw file...

2. Separare i canali CFA e usare un canale verde [formato 3016 x 2014]

```
SPLIT_CFA G1 B R G2
LOAD G1
```

3. seleziona un quadratino sul frame centrando su (1508,1007) e crea una ROI di lato 1000 pixel:

```
WINDOW3 1000
SAVE X1
```

4. Ruotare per 90°, per 180° e per 270° e salvare le quattro ROI ruotate: X₁, X₂, X₃, X₄
La procedura IRIS è:

```
LOAD X1
ROT 500 500 90.0
SAVE X2
ROT 500 500 90.0
SAVE X3
ROT 500 500 90.0
SAVE X4
```

5. Fare la media armonica di X₁, X₂, X₃, X₄: questa dovrebbe approssimare la ROI centrale del FLAT che otterrei, se avessi un flat field generator ben collimato al telescopio. La procedura IRIS, con i flat X₁, X₂, X₃, X₄ ottenuti come al punto 4., è la seguente:

```
LOAD X1
STAT
(prendere il valore f come MEAN: f < 8000 ADU evita overflow)
NEW 1000 1000
OFFSET f
SAVE F
--- i seguenti passaggi si devono ripetere per k = 1, ... , 4 ---
LOAD F
DIV Xk f
SAVE Fsquared_on_Xk
--- fine iterazione su k ---
ADD2 Fsquared_on_X 4
SAVE Y
LOAD F
MULT 4
DIV Y f
SAVE harmonic_flat
STAT
(prendere il valore g come MEAN)
```

```
ROT 500 500 90.0
SAVE harmonic_flat_90
LOAD harmonic_flat
DIV harmonic_flat_90 g
```

La procedura indicata qui sopra permette di **sintetizzare** il flat field armonico medio (“harmonic_flat”), che matematicamente si può scrivere come:

$$\langle X \rangle = 4 / [(1/X_1) + (1/X_2) + (1/X_3) + (1/X_4)] = \\ = (4 * f^2) / [(f^2/X_1) + (f^2/X_2) + (f^2/X_3) + (f^2/X_4)]$$

dove nell’ultimo membro dell’equazione abbiamo moltiplicato e diviso per f^2 , operazione che non cambia il tipo di calcolo che matematicamente svolgiamo, ma è necessaria per IRIS al fine di ottenere dei frame con segnale ad alto range dinamico (altrimenti il segnale è schiacciato su un range piccolissimo, ed è praticamente inutilizzabile per questo test simulato).

Quindi il test ha messo in evidenza che: mediare frame calibrati ottenuti in quattro condizioni strumentali, date come orientazione della camera su quattro direzioni ortogonali, riduce:

- la disuniformità del segnale di flat, rispetto alla condizione ideale di un gradiente isotropo (come si verifica dalla simulazione)
- la disuniformità del cielo, causata da gradiente naturale (come ci si aspetta ed è ragionevole).

L’esito del test, sulla qualità di un tale flat field armonico medio, è stato avere fluttuazioni tra le due “copie” (l’originale e la copia ruotata per 90°) inferiori ad 1 parte su 10000, e dunque inferiore allo 0.01%: ben 50 volte inferiore alla massima tolleranza concessa da AAVSO! Va sempre ricordato che, tuttavia, questa è una stima basata su un test sintetizzato al computer, per cui sarà la verifica sperimentale a darci un’idea del risultato: bisognerà controllare l’uniformità del fondo del cielo entro una ROI di lato 1000 pixel.

12. Range di Magnitudine Esplorabile

Le impostazioni operative di acquisizione dei campi stellari saranno le seguenti:

T = 10 secondi, ISO = 400, n° configurazioni camera = 4, n° immagini/conf. = 20

dove per “configurazione” si intende l’orientazione della camera su quattro angoli di posizione separati per 90° ciascuno, quando inserita nel portaoculare (questa scelta è giustificata dalle analisi riassunte alla sezione 11). Il numero dei Dark acquisiti sarà: 20, all’inizio della sessione di acquisizione con camera spenta all’equilibrio termico con l’ambiente; 20, a fine sessione insieme a 100 Bias a T = 1/4000.

Le riprese sono svolte al fuoco diretto in modalità “full frame”, in modo da coprire un campo complessivo di 1° 48' x 1° 12'. Di questo, solo la regione centrale di circa 30' sarà ritenuta utile ai fini fotometrici, in quanto affetta da coma minore. La zona rimanente del campo potrà essere oggetto di interesse per eventuali survey fotometriche (scoprire nuove stelle variabili nell’area).

E’ stato condotto un test sul campo stellare di M92 in data 25/05/2018, fuori asse appositamente per poter misurare con maggiore precisione le magnitudini stellari nella regione centrale del FOV. La fase lunare era dell’86% con il satellite distanziato per più di 70° dall’ammasso. La misura è stata fatta solo sul canale G.

La finestra fotometrica utile, per confronto con Stellarium e tramite il metodo della “fotometria di apertura a tre cerchi”, è risultata di **8.0 – 15.0**: dove l’estremo inferiore è raggiunto con singolo fotogramma, mentre l’estremo superiore si ottiene sommando alcuni frame (nel test, 14).

L’analisi del profilo di intensità stellare più debole ha restituito un segnale sufficientemente definito e ben campionato ($2.5\text{pixel} < \text{FWHM} < 3.5\text{pixel}$, per la magnitudine 15.0).

13. Dati EXIF – Impostazioni di Acquisizione

Nel seguente esempio di listato, relativo alle condizioni di ripresa impostate, solamente le voci in *corsivo* sono dipendenti dal fotogramma, ma sono indipendenti dalle impostazioni di acquisizione della camera. Queste impostazioni di acquisizione vanno mantenute per le applicazioni fotometriche: molte di queste non sono direttamente controllabili dai comandi della camera, tranne quelle indicate in **grassetto**.

Filename - DSC_0858.NEF

ImageWidth - 160

ImageLength - 120

BitsPerSample - 8 8 8

Compression - 1 (None)

PhotometricInterpretation - 2

Make - NIKON CORPORATION

Model - NIKON D600

StripOffset - 64584

Orientation - Top left

SamplesPerPixel - 3

RowsPerStrip - 120

StripByteCount - 57600

XResolution - 300

YResolution - 300

PlanarConfiguration - 1

ResolutionUnit - Inch

Software - Ver.1.03

DateTime - 2018:03:26 21:26:26

Artist -

ReferenceBlackWhite - 0

Copyright -

ExifOffset - 1640

DateTimeOriginal - 2018:03:26 21:26:26

ExposureTime - 20 seconds

FNumber - 0.00

ExposureProgram - Manual control

ISO SpeedRatings - 800

DateTimeOriginal - 2018:03:26 21:26:26

DateTimeDigitized - 2018:03:26 21:26:26

ExposureBiasValue - 0.00

MaxApertureValue - F 1.00

MeteringMode - Center weighted average

LightSource - Auto

Flash - Flash not fired, compulsory flash mode

FocalLength - 0.00 mm

UserComment -

SubsecTime - 00
SubsecTimeOriginal - 00
SubsecTimeDigitized - 00
SensingMethod - One-chip color area sensor
FileSource - Other
SceneType - Other
CustomRendered - Normal process
ExposureMode - Manual
White Balance - Auto
DigitalZoomRatio - 1 x
FocalLengthIn35mmFilm - 0 mm
SceneCaptureType - Standard
GainControl - Low gain up
Contrast - Normal
Saturation - Normal
Sharpness - Normal
SubjectDistanceRange - Unknown

GPS information: -
GPSVersionID - 2.3.0.0

Maker Note (Vendor): -
Data version - 0120 (808530480)
ISO Setting - 800
Image Quality - RAW
White Balance - AUTO1
Focus Mode - MANUAL
Flash Setting -
Flash Mode -
White Balance Adjustment - 0
White Balance RB - 802
Exposure Difference - 0.0
Thumbnail IFD offset - 23134
Flash Compensation - 67072
ISO 2 - 800
Serial number - 6018255
Colorspace - sRGB
Active D-Lighting - Off
Picture control - Version - 0100
Picture control - Name - NEUTRAL
Picture control - Base - NEUTRAL
Picture control - Adjust - Default
Picture control - Quick Adjust - Not available
Picture control - Sharpness - +2
Picture control - Contrast - Normal
Picture control - Brightness - Normal
Picture control - Saturation - Normal
Picture control - Hue Adjustment - Normal
ISO 3 - 800
ISO Expansion - Off
Lens type - Manual
Lens - 0.00

Flash Used - Not fired

Shooting Mode - 0

Contrast Curve - I0

Noise Reduction - OFF

Lens info - 0204

Total pictures - 30305

Vari Program - Not defined

AF info 2 - version - 0100

Contrast Detect AF - Off