

Analiza obrazów CCD z kamery internetowej

Grzegorz Wrochna
wrochna@fuw.edu.pl

Kamery internetowe (ang. *webcam*) są najtańszymi (200-400 zł) urządzeniami zawierającymi sensory CCD. Wysoki poziom szumów i mocno ograniczony (zwykle < 1 s) czas ekspozycji wykluczają profesjonalne zastosowanie tych urządzeń w astronomii. Mogą być one jednak z powodzeniem wykorzystywane przez amatorów np. do obserwacji zakryć czy pomiarów blasku gwiazd zmiennych z dokładnością lepszą niż nieuzbrojone w elektronikę oko.

Obróbka zarejestrowanych obrazów jest zasadniczo podobna do standardowej procedury stosowanej w przypadku profesjonalnych CCD (odjęcie *ciemnej klatki*¹, fotometria aperturowa itd.).² Aby jednak pokonać typowe dla kamer internetowych ograniczenia (wysoki szum i krótki czas ekspozycji) niezbędne jest zmodyfikowanie standardowej procedury. Po pierwsze, konieczne jest sumowanie wielu (kilkudziesięciu) klatek. Po drugie, sumowane klatki powinny być względem siebie przesunięte tak, aby dodawane były pomiary z fizycznie różnych pikseli. W przeciwieństwie do profesjonalnych CCD kroki te są niezbędne do zwiększenia zasięgu obserwowanych gwiazd i uzyskania zadowalającej precyzji pomiaru. Poniżej przedstawiam szczegółowe uzasadnienie obu kroków i wyjaśnię dlaczego nie są one stosowane do profesjonalnych CCD.

Dla ilustracji posłużę się zdjęciami wykonanymi kamerą *Philips Vesta PCVC675K* z CCD o przekątnej 1/4 cala, 640×480 pikseli (rozmiar piksela $5,6 \mu m \times 5,6 \mu m$). Sensor przykryty jest matrycą filtrów ($\begin{smallmatrix} R \\ G \\ B \end{smallmatrix}$). Każdy piksel odczytywany jest przez 8-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC), ale informacja ta nie jest bezpośrednio dostępna dla użytkownika. Na wyjściu otrzymujemy macierz 640×480 , której elementy zawierają 8-bitową informację o każdym kolorze (R,G,B) będącą kombinacją liniową sąsiednich pikseli. Czarno-biały obraz uzyskujemy sumując trzy kolory. Zakres dynamiczny wynosi więc teoretycznie 3×256 , ale korelacje spowodowane kodowaniem koloru zmniejszają go do ok. 500. Ponadto wysoka wartość offsetu (piksele *ciemnej klatki* przy krótkim czasie ekspozycji dają wartość rzędu 250) ogranicza użyteczny zakres dynamiczny do ok. 250.

Przykładowe zdjęcia wykonano obiektywem *Zenith*³ $f/2$, $f = 50$ mm pokrywającym obszar nieba $4^\circ \times 3^\circ$ wykorzystując maksymalny czas ekspozycji 1/5 s. Temperatura otoczenia wynosiła kilkanaście stopni Celsjusza (układ nie jest chłodzony). *Ciemną klatkę* przygotowano licząc medianę 121 klatek zarejestrowanych z zasłoniętym obiektywem na kilka minut przed właściwymi zdjęciami przy identycznych ustawieniach czasu ekspozycji i wzmocnienia.

Na rys. 1 pokazano obrazy trzech gwiazd uzyskane z pojedynczej klatki oraz z nałożenia 20 i 121 klatek. Na pojedynczej klatce widać wyraźnie gwiazdę $6^m 8$, ale przypadkowe fluktuacje wzmocnione przez korelacje spowodowane kodowaniem koloru również wyglądają podobnie jak gwiazdy i łatwo mogą prowadzić do błędnej interpretacji. Obrazy gwiazd $8^m 5$ i $9^m 5$ nie wyróżniają się istotnie spośród przypadkowych fluktuacji. Po nałożeniu 20 klatek obraz gwiazdy $6^m 8$ jest już nie do pomylenia z żadną fluktuacją. Gwiazda $8^m 5$ też jest dość wyraźnie widoczna. Gwiazda $9^m 5$ ciągle ginie w szumach. Dopiero nałożenie 121 klatek umożliwia uzyskanie czystego obrazu gwiazdy $8^m 5$ i dostrzeżenie gwiazdy $9^m 5$.

Dlaczego sumowanie coraz większej liczby klatek umożliwia dostrzeżenie coraz słabszych gwiazd? Jak widać z powyższego przykładu zasięg jest limitowany poziomem szumu. Oznaczmy przez σ_1 średni poziom szumu na pojedynczej klatce wyznaczony np. przez dopasowanie krzywej Gaussa do rozkładu wartości odczytanych z poszczególnych pikseli. Jeśli wartości odczytane z kolejnych klatek nie są skorelowane to poziom szumu obrazu powstałego z nałożenia k klatek będzie dany wzorem

$$\sigma_k = \sigma_1 \sqrt{k} \quad (1)$$

W opisywanym przykładzie σ_1 jest rzędu 10, a więc stanowi aż 4 % zakresu dynamicznego kamery.

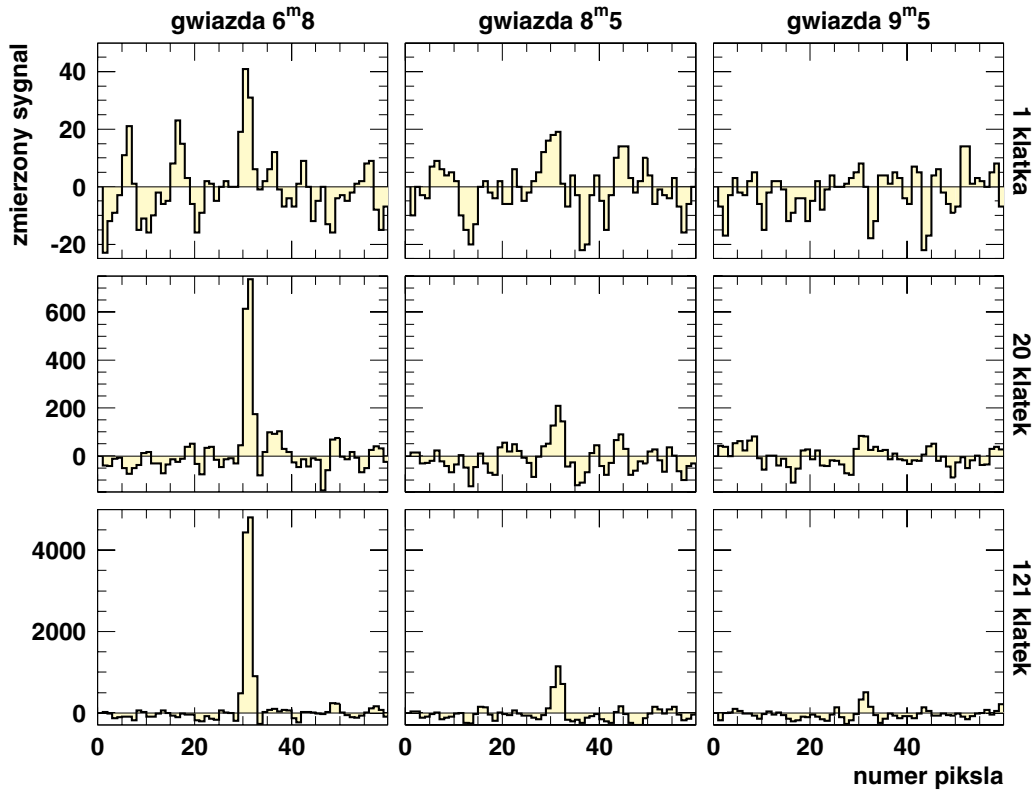
Średnia wartość sygnału $s_k(m)$ pochodzącego od gwiazdy o jasności m będzie proporcjonalna do liczby zsumowanych klatek k :

$$s_k(m) = s_1(m)k \quad (2)$$

¹Angielski termin *dark frame* tłumaczy się zwykle na *obraz prądu ciemnego* co jest uzasadnione w przypadku profesjonalnych CCD. W przypadku krótkich czasów naświetlania charakterystycznych dla kamer internetowych efekt prądu ciemnego jest dużo mniejszy niż stały offset, *dark frame* jest zatem raczej mapą offsetów.

²Początkujących amatorów, którzy nie zetknęli się z technikami CCD zachęcam do przeczytania artykułów na ten temat w czasopiśmie DELTA 2/2002 i 3/2002 oraz do zajrzenia na strony <http://hep.fuw.edu.pl/~wrochna/astro>.

³Pierścień redukcyjny do przymocowania obiektywu do kamery można zamówić w firmie ASTROKRAK (<http://www.astronmica.com/astrokrak/>).



Rysunek 1: Przekrój przez 60 pikseli zawierających w środku obrazy gwiazd o jasnościach $6^m 8$, $8^m 5$ i $9^m 5$ dla pojedynczej klatki oraz zsumowanych 20 i 121 klatek.

gdzie $s_1(m)$ oznacza średnią wartość sygnału od danej gwiazdy na pojedynczej klatce.

Można przyjąć, że gwiazdę da się wyróżnić spośród szumu, jeżeli sygnał z piksla o maksymalnym natężeniu jest 5 razy większy od średniego poziomu szumu:

$$s_k(m)/\sigma_k > 5 \quad (3)$$

Rys. 2 pokazuje stosunek sygnału do szumu $s_k(m)/\sigma_k$ dla kilku przykładowych gwiazd. Punkty odpowiadają wartościom zmierzonym (z tym, że np. punkty dla $k = 1$ odpowiadają sygnałowi zmierzonymu na jednej klatce, a nie średniej wartości z wielu klatek, co tłumaczy duży rozrzut punktów). Linie ciągłe przedstawiają zależność

$$\frac{s_k(m)}{\sigma_k} = \frac{s_1(m)k}{\sigma_1\sqrt{k}} = \frac{s_1(m)}{\sigma_1}\sqrt{k} \quad (4)$$

Linia przerywaną zaznaczono granicę 5σ . Punkt przecięcia linii ciągłych z przerywaną wyznacza zasięg. Z wykresu można odczytać konkluzję podobną do wyciągniętej poprzednio. Wystarczy zsumować kilka klatek aby jednoznacznie zidentyfikować gwiazdę o jasności $6^m 8$. Co najmniej 20 klatek potrzeba do wyróżnienia z tła gwiazdy $8^m 5$, około 60 — do $8^m 9$ a ponad 100 do $9^m 5$.

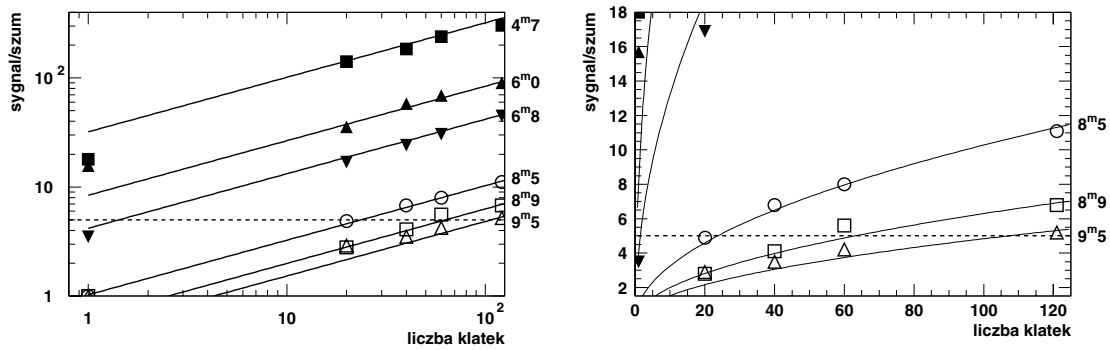
Jeżeli zdefiniujemy zasięg m_z jako jasność, dla której sygnał s_k jest 5 razy większy od szumu σ_k

$$s_k(m_z)/\sigma_k = 5 \quad (5)$$

to zależność $m_z(k)$ będzie opisana wzorem:

$$m_z(k) = m_0 + 2.5 \log_{10} \left(\frac{s_1(m_0)}{5\sigma_1} \sqrt{k} \right) \quad (6)$$

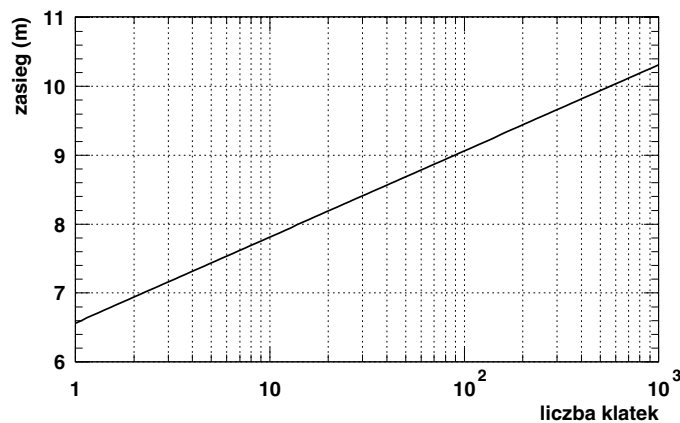
gdzie $s_1(m_0)$ oznacza wartość sygnału dla wybranej gwiazdy odniesienia o jasności m_0 . Rys. 3 przedstawia tę zależność dla wartości $s_1(m_0 = 6^m 0) = 80.7$ i $\sigma_1 = 9.6$ charakterystycznych dla opisywanego przykładu.



Rysunek 2: a) Stosunek sygnału (piksel o maksymalnej wartości) do szumu (σ) dla kilku gwiazd o jasnościach $4^m7 - 9^m5$ w funkcji liczby zsumowanych klatek. Punkty odpowiadają opisanym w tekście pomiarom. Linie przedstawiają parametryzację (4). Linia przerywaną zaznaczono limit 5σ . b) Powiększenie obszaru najślabszych gwiazd z rys. a) w skali liniowej.

Przedstawiona zależność zasięgu m_z od liczby zsumowanych klatek k jest jedynie przybliżona. Nie uwzględnia faktu, że obraz gwiazdy rozkłada się na więcej niż jeden piksel. Nie opisuje też korelacji między pikselami spowodowanymi kodowaniem koloru. Dobrze jednak charakteryzuje podstawową własność kamer internetowych: zasięg limitowany jest poziomem szumu, a zatem można go poprawić przez sumowanie wielu (kilkudziesięciu) klatek.

Nieco inaczej sprawa przedstawia się w przypadku profesjonalnych CCD. Charakteryzują się one niskim poziomem szumu, dodatkowo zredukowanym przez układ chłodzący. W takim przypadku o zasięgu decyduje nie poziom szumu, ale czułość urządzenia. Jeżeli wartość zgromadzonego na danym pikselu ładunku nie przekroczy progu najniższego bitu ADC odczytane zostanie zero. Nic więc nie pomoże sumowanie choćby tysiąca klatek bo suma tysiąca zer to nadal zero. Owszem, nakładanie klatek może poprawić stosunek sygnału do szumu, ale nie zwiększy zasięgu.⁴ Zamiast tego stosuje się dłuższe czasy naświetlania, rzędu minut, co jest zupełnie nieosiągalne dla typowych kamer internetowych bez ingerencji w ich układ elektroniczny.



Rysunek 3: Parametryzacja zależności zasięgu zdefiniowanego jako jasność gwiazdy dającej sygnał 5σ powyżej szumu od liczby zsumowanych klatek opisana wzorem (6).

⁴Ścisłej rzecz biorąc liczba fotonów docierających do CCD w danym czasie nie jest stała ale podlega pewnemu rozkładowi (w pierwszym przybliżeniu rozkładowi Poissona). Nawet więc jeżeli średnia wartość sygnału przy danym czasie ekspozycji jest niższa od progu ADC to wśród dostatecznie wielu klatek pojawiają się takie, dla których próg ten został przekroczony i zamiast zera zapisana zostanie np. jedynka. Ponieważ liczba takich "jedynek" będzie proporcjonalna do całkowitej liczby klatek k , ma szansę przekroczyć poziom szumu, który rośnie jak \sqrt{k} . Widziałem wykonane kamerą internetową zdjęcie M57 będące złożeniem 10 000 klatek (!) ewidentnie bazujące na tym efekcie (http://www.geocities.com/astro_snap/).

W przypadku profesjonalnych CCD znacznie efektywniejsze jest rzecz jasna wydłużenie czasu ekspozycji. Opisana "gimnastyka" ma sens jedynie w przypadku, gdy z przyczyn technicznych dłuższe czasy naświetlania nie są możliwe.

Drugim elementem obróbki obrazów z kamer internetowych różnym od standardowej procedury jest sumowanie klatek przesuniętych tak aby dodawane były fizycznie różne piksele.⁵ Krok ten umożliwia kilkukrotne zmniejszenie szumu. Dlaczego?

Podając wzór (1) zaznaczyliśmy, że jest on słuszny o ile wartości odczytane z kolejnych klatek nie są skorelowane. Tymczasem korelacja taka istnieje, gdyż od wszystkich klatek odjęliśmy tę samą *ciemną klatkę*, która – rzecz jasna – nie była idealna. Oznaczmy δ_1 średni błąd na danym pikselu wnoszony przez pojedynczą *ciemną klatkę*. (Możemy go oszacować np. porównując dwie różne *ciemne klatki*.) Dla pojedynczej klatki błąd ten jest zwykle znacznie mniejszy od szumu i w omawianym przykładzie wynosi $\delta_1 = 1.9$ czyli pięciokrotnie mniej niż σ_1 szumu. Jednak przy nakładaniu wielu klatek błąd ten będzie się sumował:

$$\delta_k = \delta_1 k \quad (7)$$

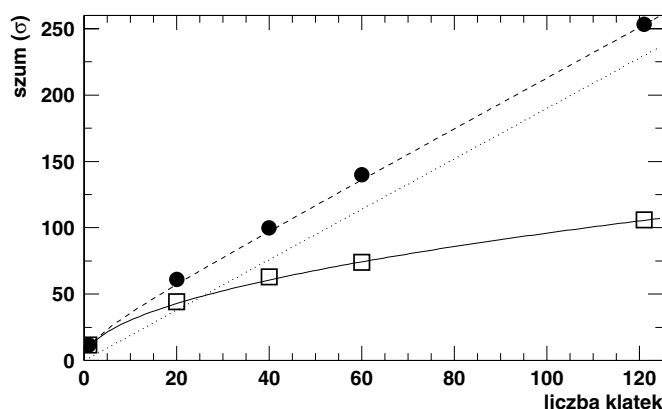
Ponieważ błędy na różnych pikselach nie są wzajemnie skorelowane, można je traktować jako przyczynę do szumu. Szum całkowity będzie więc pierwiastkiem z sumy kwadratów obu wkładów (1) i (7):

$$\sqrt{\sigma_k^2 + \delta_k^2} = \sqrt{(\sigma_1 \sqrt{k})^2 + (\delta_1 k)^2} = \sqrt{\sigma_1^2 k + \delta_1^2 k^2} \quad (8)$$

Rys. 4 pokazuje porównanie przedstawionych wzorów z rzeczywistymi pomiarami. Kółka przedstawiają szum na obrazach składanych bez przesuwania klatek. Wynik jest dobrze opisany pierwiastkiem z sumy kwadratów wkładów (1) i (7). Przesunięcie dodawanych klatek (kwadraty na rys. 4) znosi korelację między nimi i sprawia, że wkład od niedokładności *ciemnej klatki* podlega uśrednieniu i wzór (7) należy zastąpić formułą $\delta_k = \delta_1 \sqrt{k}$:

$$\sqrt{\sigma_k^2 + \delta_k^2} = \sqrt{(\sigma_1 \sqrt{k})^2 + (\delta_1 \sqrt{k})^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \delta_1^2} \cdot \sqrt{k} \quad (9)$$

Ponieważ zaś w praktyce $\delta_1 \ll \sigma_1$, wyraz ten można zaniedbać i wynik jest dobrze opisany samym tylko wkładem statystycznym (1).



Rysunek 4: Zależność σ szumu od liczby zsumowanych klatek k z przesuwaniem klatek (kwadraty) i bez (kółka). Linia ciągła przedstawia zależność (1) będącą wynikiem sumowania błędów statystycznych. Linia kropkowana jest wynikiem sumowania błędów systematycznych wspólnej dla wszystkich klatek składowych *ciemnej klatki* (7). Linia przerywana jest pierwiastkiem z sumy kwadratów obydwu wkładów (8).

Różnica między kółkami i kwadratami na rys. 4 pokazuje jak bardzo istotne jest przesuwanie sumowanych klatek w przypadku kamer internetowych, kiedy to dodajemy do siebie dużą liczbę klatek. Zauważmy jednak że dla małej liczby klatek (< 20) człon systematyczny (liniowy) jest mniejszy od statystycznego (\sqrt{k}) i dlatego przesuwanie klatek niewiele wnosi. Z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia w przypadku profesjonalnych CCD, gdzie nakłada się zwykle najwyżej kilka klatek.

Podsumowując, aby za pomocą typowej kamery internetowej osiągnąć interesujące dla amatorskiej astronomii rezultaty należy nieco zmodyfikować procedurę obróbki obrazu stosowaną do profesjonalnych CCD. Konieczne jest nakładanie bardzo wielu klatek i przesuwanie ich względem siebie. Pozostałe kroki obróbki (odejmowanie *ciemnej klatki*, fotometria aperturowa itd) są podobne do standardowej procedury.

⁵W praktyce przy ogniskowych rzędu 50 mm możemy wykonać sekwencję zdjęć nieruchomą kamerą, a następnie poprzesuwać sumowane klatki tak, aby obrazy danej gwiazdy nałożyły się na siebie.