

Kalibracja kamer CCD

Paweł Duch

10 grudnia 2009

Streszczenie

The aim of the research was optimisation of functioning of camera with CCD sensor consisted of two separately read parts. The method of adjusting one part to another was proposed and script which performs automatic calibration was written. Then the callibration stability was checked. Possible improvements of the process of calibration were also indicated.

1 Wstęp

1.1 Fizyczne aspekty działania czujnika obrazu CCD

Czujnik obrazu CCD zbudowany jest z matrycy kondensatorów ułożonych jeden obok drugiego, wytworzonych na podłożu półprzewodnikowym typu p, na którym znajdują się metalowe bramki odizolowane za pomocą SiO_2 . Podczas ekspozycji w półprzewodnikowej warstwie wskutek efektu fotoelektrycznego wytworzone zostają elektrony. Są one utrzymywane w pobliżu miejsca generacji dzięki temu, że wartości napięć przyłożonych do kolejnych bramek tworzą dwuwymiarową siatkę studni potencjału [1]. Poprzez zsynchronizowaną zmianę napięć na kolejnych bramkach zebrany ładunek może być przesuwany w kierunku krawędzi matrycy, a następnie jednego (lub kilku) z jej wierzchołków, gdzie następuje zliczanie elektronów. Układ zliczający daje na wyjściu napięcie U proporcjonalne do liczby zarejestrowanych fotoelektronów (N_e):

$$U = KN_e \quad (1)$$

Następnie sygnał trafia do wzmacniacza wyjściowego i konwertera A/DC [2], gdzie zostaje zamieniony na liczbę całkowitą (najczęściej 16 lub 32 bitową).

1.2 Specyfikacje kamer używanych przez zespół „Pi of the Sky”

W skład kamer jakimi dysponuje zespół „Pi of the Sky” wchodzi następujące podzespoły:

- Matryca o rozdzielczości 2048×2048 , zbudowana z pixeli o wymiarach $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$. Matryca podzielona jest na dwa obszary o wymiarach 1024×2024 pixeli, a odczyt liczby fotoelektronów zebranych w każdej komórce matrycy dokonuje się w jej dwóch wierzchołkach leżących na przekątnej matrycy (elektrony zebrane w danym pixelu trafiają do wierzchołka należącego do obszaru, w którym znajduje dany pixel).
- Dwa układy zliczające elektrony i dające na wyjściu określone napięcie
- Dwa przedwzmacniacze napięcia
- Dwukanałowy konwerter analogowo cyfrowy zamieniający napięcie na 32-bitową liczbę całkowitą zawierającą wbudowany wzmacniacz napięcia, którego parametry pracy można regulować niezależnie dla każdego kanału,
- Ogniwo Peltiera służące do chłodzenia matrycy CCD w celu zmniejszenia szumu,
- Obiektyw firmy Canon EF $f = 85\text{mm}$, $f/d = 1.2$
- Układ cyfrowy sterujący pracą matrycy, wzmacniaczy, konwerterów i ogniwa Peltiera.
- Moduł umożliwiający komunikację z komputerem za pośrednictwem interfejsu USB lub Ethernet.

Informacje o liczbie zliczonych elektronów w poszczególnych pixelach znajdujących się w różnych obszarach matrycy są przetwarzane przez niezależne układy wzmacniające i konwertery analogowo-cyfrowe. Dlatego, w celu poprawnej pracy kamery, konieczna jest jej kalibracja, polegająca na doborze odpowiednich parametrów regulujących pracę wzmacniaczy występujących w przetwornikach.

1.3 Parametry wzmacniacza napięcia

Na pracę wzmacniacza napięcia wpływają dwa parametry:

- poziom wzmocnienia: ADC_gain
- offset: ADC_offset

Wyjściowe napięcie V_{out} jest następującą funkcją napięcia wejściowego V_{in} :

$$V_{out} = \frac{6.0}{1.0 + 5.0 \left(1 - \frac{\text{ADC_gain}}{63}\right)} (V_{in} + \text{ADC_offset} \times 1.2\text{mV}) \quad (2)$$

Parametry ADC_gain oraz ADC_offset można ustawiać niezależnie dla każdego kanału.

1.4 Współczynnik wzmocnienia

Ważnym parametrem opisującym działanie kamery CCD jest tzw. współczynnik wzmocnienia G . Jest on równy stosunkowi liczby całkowitej zwracanej przez przetwornik A/D do liczby elektronów wzbudzonych w danym pixelu. Aby wyznaczyć wielkość tego parametru najczęściej wykorzystuje się fakt, że w przypadku, gdy na matryce nie padają fotony (zdjęcie przy zamkniętej migawce), liczbę wygenerowanych elektronów można opisywać przy użyciu statystyki Poissona. Oznacza to, że odchylenie standardowe σ_e liczby zliczonych elektronów w każdym pojedynczym pixelu jest równe pierwiastków wartości średniej S_e liczby zliczonych elektronów. Niech S_{ADU} oraz σ_{ADU} będą odpowiednio średnią wartością ADU (liczba otrzymywana na wyjściu przetwornika A/D) oraz odchyleniem standardowym tej wielkości dla całego zdjęcia. Ponieważ $S_{ADU} = GS_e$ oraz $\sigma_{ADU} = G\sigma_e$. Ze związku pomiędzy S_e i σ_e ($\sigma_e = \sqrt{S_e}$) otrzymujemy:

$$\sigma_{ADU} = G\sigma_e = G\sqrt{S_e} = \sqrt{G}\sqrt{GS_e} = \sqrt{G}\sqrt{S_{ADU}} \quad (3)$$

Po prostym przekształceniu dostajemy:

$$G = \frac{S_{ADU}}{\sigma_{ADU}^2} \quad (4)$$

1.5 Sterowanie kamerami

Do sterowania kamerami służy specjalnie w tym celu napisany w języku $C++$ program *test2K2K* [3]. Umożliwia on schłodzenie kamery do pożądanej temperatury, wykonywanie zdjęcia o podanym przez użytkownika czasie naświetlania, zmianę parametrów pracy każdego z kanałów wzmacniacza oraz dowolnych innych parametrów kamery.

2 Skrypt wyznaczający optymalne parametry pracy kamery

2.1 Opis działania skryptu

Skrypt rozpoczyna swoją pracę od schłodzenia kamery do temperatury $-10^{\circ}C$ oraz wykonania 3 próbnych zdjęć. Następnie wykonuje serię zdjęć dla wartości offsetów z zakresu $[\min, \max]$ (\min, \max - parametry podawane przez użytkownika). Dla każdej wartości offsetu wykonywane są dwa zdjęcia przy zamkniętej migawce (czas naświetlania 10s), przy czym pierwsze jest odrzucane ze względu na możliwe zakłócenia. Skrypt zapisuje do pliku `calib_halves_data.txt` średnie wartości ADU na górnej i dolnej połówce zdjęcia. Po wykonaniu pomiarów za pomocą programu `gnuplot` tworzony jest wykres obrazujący zależność średniej wartości ADU od ustawionego offsetu (do punktów pomiarowych dopasowywane są proste).

Kalibracja opiera się na ustawieniu takiego offsetu dla dolnej połówki, aby przy standardowym offsecie 50 ustawionym dla górnej połówki średnie wartości ADU były jak najbardziej zbliżone. W tym celu zakładamy, że zależność ADU od offsetu dla dolnej połówki jest ściśle liniowa (współczynnik kierunkowy a prostej wyznaczany jest za pomocą funkcji `fit` programu `gnuplot`). Niech N_1, N_2 - średnie wartości ADU odpowiednio dla górnej i dolnej połówki matrycy przy offsecie 50 ustawionym na obu połówkach. Optymalny offset wyznaczony dla dolnej połówki (przy domyślnym offsecie 50 ustawionym dla górnej) wynosi:

$$\text{offset}_{bottom} = 50 + \frac{N_1 - N_2}{a} \quad (5)$$

W trakcie wykonywania całej procedury parametr wzmocnienia `ADC_gain` pozostaje jednakowy dla obu połówek i równy wartości domyślnej 38.

2.2 Instrukcja używania skryptu

Aby uruchomić skrypt należy wydać w terminalu następujące polecenie:

```
calib_halves.sh camera min max offset_step
```

Na pracę skryptu wpływają trzy parametry:

- `camera` - nazwa kamery (np. `cam9` lub `k2e`)
- `min` - minimalna wartość offsetu, dla którego wykonywany jest pomiar (domyślna wartość 40, zalecana wartość powinna być ≤ 40)
- `max` - maksymalna wartość offsetu, dla którego wykonywany jest pomiar (domyślna wartość 70, zalecana wartość powinna być ≥ 70)
- `offset_step` - wartość o jaką zmienia się offset przy każdym kolejnym pomiarze (domyślna wartość 10)

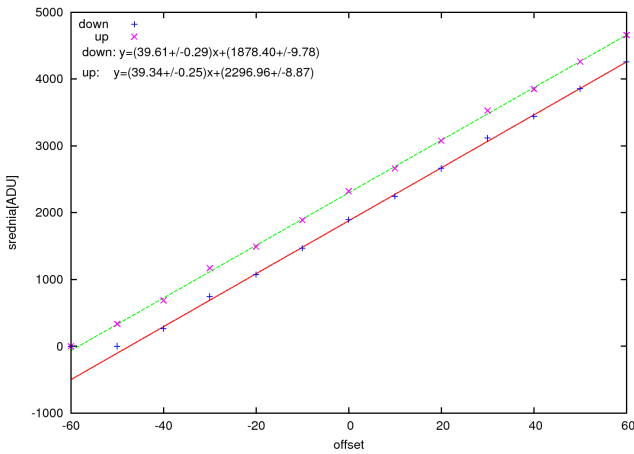
W wyniku działania skryptu powstają następujące pliki:

- `calib_halves_data.txt` - zawiera wyniki pomiarów (średnie wartości ADU dla każdej połówki matrycy w funkcji offsetu)
- `calib_halves_chart_data.eps` - wykres obrazujący zależność ADU od ustawionego offsetu
- `calib_halves_optimal_offset` - plik zawiera wyznaczoną wartość optymalnego offsetu

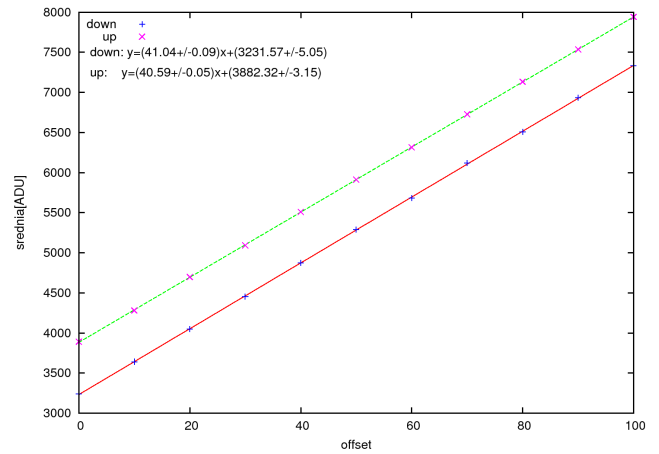
3 Wyniki działania skryptu na trzech wybranych kamerach

Testom poddano trzy kamery o akronimach `cam9`, `cam21` oraz `k2e`. Dla każdej z nich wyznaczono optymalną wartość offsetu. Dzięki użyciu skryptu `calib_halves.sh` cały proces był w pełni zautomatyzowany i trwał około 3 minut dla każdej z kamer (nie wliczając czasu potrzebnego na ich schłodzenie).

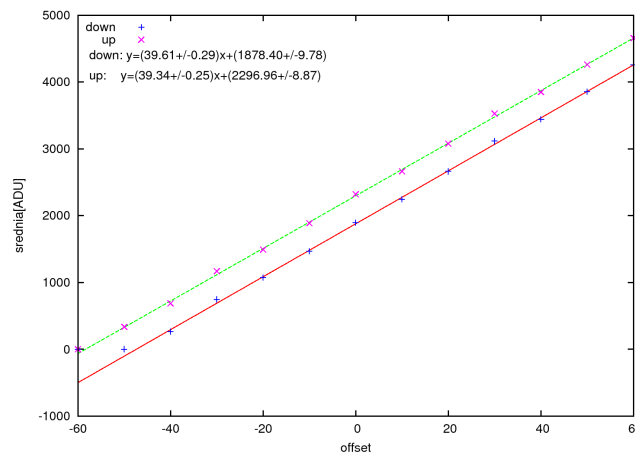
Jak widać na wykresach zależność średniej wartości ADU od offsetu jest z dobrym przybliżeniem liniowa dla każdej z kamer - pozwala to na wygodną ekstrapolację tej zależności pomiędzy punktami pomiarowymi, na której opiera się działanie skryptu. Wyznaczone za pomocą skryptu optymalne wartości offsetów dla dolnej połówki zebrano w tabeli (1).



Kamera *cam9*



Kamera *cam22*



Kamera *k2e*

Rysunek 1: Zależność średniej wartości ADU od offsetu dla kamer

	górze	dół
cam9	50	61
cam22	50	65
k2e	50	71

Tablica 1: Optymalne wartości offsetów

4 Skrypt testujący stabilność kalibracji kamery

4.1 Opis działania skryptu

Skrypt wykonuje serię zdjęć o czasie naświetlania z przedziału $[5s, 60s]$ ze skokiem co $5s$ (przy zamkniętej migawce i optymalnych wartościach offsetu). Wynikiem działania skryptu jest plik zawierający zebrane dane pomiarowe oraz wykonany za pomocą programu `gnuplot` wykres zależności względnej różnicy średnich wartości ADU na każdej z połówek od czasu naświetlania.

4.2 Instrukcja używania skryptu

Aby uruchomić skrypt należy wydać w terminalu następujące polecenie:

```
calib_stable.sh camera bottom_offset
```

Na pracę skryptu wpływają dwa parametry:

- `camera` - nazwa kamery (np. `cam9` lub `k2e`)

- `bottom_offset` - wartość optymalnego offset dla dolnej połówki (np. wyznaczona za pomocą skryptu `calib_halves.sh camera min max`)

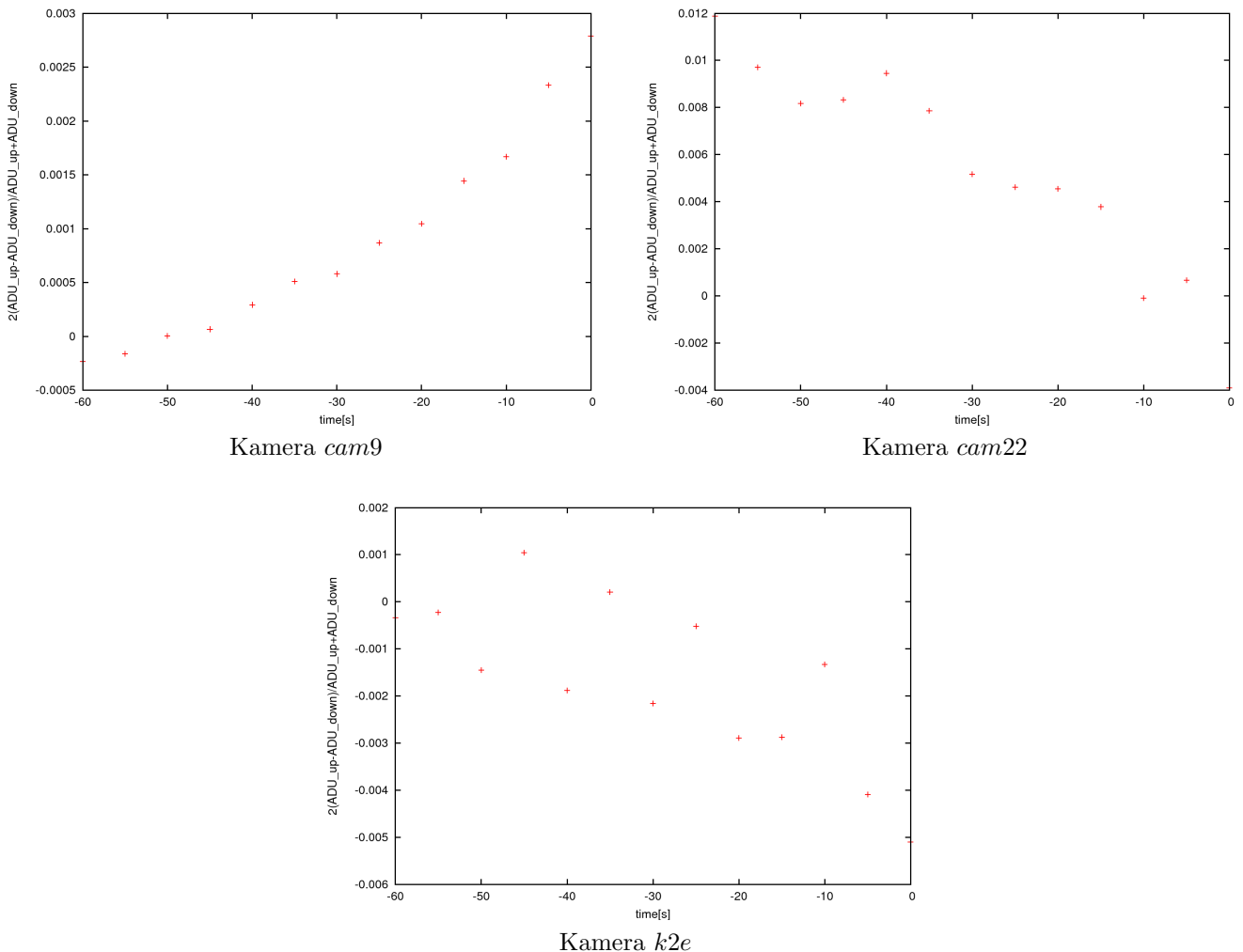
W wyniku działania skryptu powstają następujące pliki:

- `calib_stable_data.txt` - zawiera wyniki pomiarów
- `calib_stable_chart_data.eps` - wykres obrazujący zależność różnicy średniej wartości ADU dla każdej z połówek od czasu naświetlania

4.3 Wyniki działania skryptu na trzech wybranych kamerach

W celu sprawdzenia czy wyznaczone poprzednio optymalne wartości offsetu odpowiadają prawidłowej kalibracji kamery (niezależnie od czasu naświetlania średnie wartości ADU na każdej połówce w przypadku zdjęć robionych przy zamkniętej migawce powinny być w przybliżeniu sobie równe).

Jak widać na wykresach (2) różnica wartości ADU na każdej z połówek nie przekracza 1% mierzonych wartości - świadczy to o tym, że dopasowanie jest zadowalające. Jednocześnie należy zwrócić uwagę na fakt, że nawet dla czasu naświetlania $-10s^1$, dla którego wykonywana była kalibracja różnica nie jest zerowa. Wynika to z faktu, że ustawiana wartość offsetu musi być liczbą całkowitą. Niedokładność wyznaczania offsetu wynosi zatem ± 0.5 , co przekłada się na niedokładność dopasowania połówek matrycy rzędu $20ADU$ (0.5 mnożone przez współczynnik kierunkowy prostej opisującej zależność ADU od offsetu).



Rysunek 2: Zależność względnej różnicy wartości średnich ADU na każdej z połówek od czasu naświetlania (ujemna wartość oznacza naświetlanie przy zamkniętej migawce)

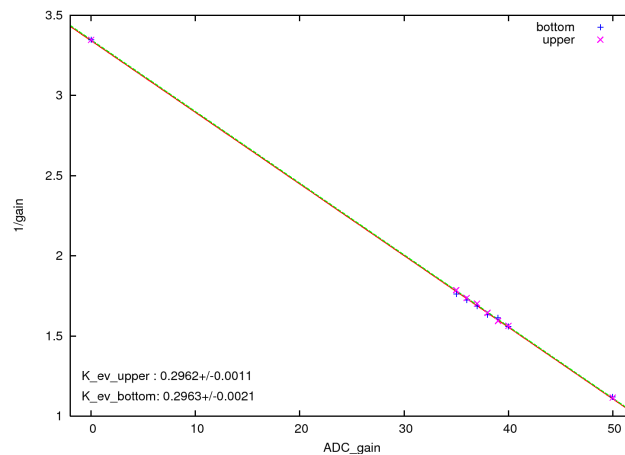
¹Ujemny czas naświetlania oznacza, że naświetlanie miało miejsce przy zamkniętej migawce

5 Pomiar zależności współczynnika wzmocnienia G [ADU/e] od parametru wzmocnienia ADC_gain

W celu ewentualnego udoskonalenia kalibracji kamery zbadano zależność współczynnika wzmocnienia zdefiniowanego w paragrafie 1.4 od parametru wzmocnienia ustawianego na wzmacniaczu znajdującym się w konwerterze A/D. Pomiar przeprowadzane były przy użyciu skryptu `cam_test.sh`, którego działanie opiera się na metodzie opisanej w paragrafie 1.4. Pozwoliły one wyznaczyć współczynnika proporcjonalności K współczynnikiem wzmocnienia i rzeczywistym wzmocnieniem wzmacniacza opisanym wzorem (2) - wynika stąd, że odwrotność współczynnikiem wzmocnienia G jest liniową funkcją parametru wzmocnienia ADC_gain:

$$\frac{1}{G} = \frac{1}{K} \frac{1.0 + 5.0 \left(1 - \frac{\text{ADC_gain}}{63}\right)}{6.0} \quad (6)$$

Pomiary przeprowadzono na kamerze `cam9` przy optymalnych wartościach offsetu (górną połówką 50, dolną 61).



Rysunek 3: Zależność odwrotności współczynnika wzmocnienia od parametru wzmocnienia

Dla każdej połówki matrycy niezależnie wyznaczono współczynnik K (wartości naniesiona na wykres). Współczynniki te są zgodne w zakresie błęd pomiarowego (oszacowanego metodą regresji liniowej). Wykorzystując wzór (6) oraz wyznaczoną wartość współczynnika K oszacowano o ile zmieni się współczynnik wzmocnienia G przy zmianie parametru wzmocnienia ADC_gain o jeden przy wyjściowej domyślnej wartości ADC_gain = 38 (parametr ten przyjmuje wartości całkowite): $\Delta G = 0.027 \text{ ADU/e}$. Pozwala to na ewentualną zmianę współczynnika wzmocnienia jednej z połówek matrycy w celu ich lepszego dopasowania.

Literatura

- [1] Maciej Kwiatkowski, *Astronomiczna kamera CCD nowej generacji bazująca na procesorze wbudowanym ARM*, Praca magisterska
- [2] James R. Janesick, *Scientific charge-coupled devices*, The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers 2001
- [3] Opis programu test2K2K, <http://www.fuw.edu.pl/~msok/test2K2K.html>