Obserwatorium Astronomiczne
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
w Poznaniu

Optymalizacja metod redukcji obserwacji fotometrycznych CCD

Praca magisterska

Maciej Adamczak

Kierownik pracy: prof. dr hab. Tadeusz Michałowski

Opiekun pracy: dr Tomasz Kwiatkowski

Poznań 1999

Pracę złożono w systemie LaTeX.

Pragnę podziękować
prof. dr hab. Tadeuszowi Michałowskiemu
oraz dr Tomaszowi Kwiatkowskiemu,
za opiekę i wszelką pomoc udzieloną mi
w trakcie pisania niniejszej pracy.

„Każda wystarczająco zaawansowana technologia jest magią."

Arthur C.Clarke

Spis treści

Wstęp **9**

1 Rys historyczny **10**

2 Budowa i zasada działania kamery CCD **12**
2.1 Budowa kamery CCD 12
2.2 Zasada działania kamery CCD 13
2.3 Charakterystyka kamery ST-7 15

3 Redukcja obserwacji CCD **17**
3.1 Czynniki negatywne 17
3.2 Klatki korekcyjne 19
3.2.1 Offset 19
3.2.2 Klatki ciemne 21
3.2.3 Pole wyrównujące 24
3.3 Testowanie kamery CCD ST-7 27
3.3.1 Analiza klatek offsetowych 27
3.3.2 Podział pikseli na określone wartości ADU 29
3.3.3 Zależność prądu ciemnego kamery od temperatury . . . 30
3.3.4 Zależność prądu ciemnego kamery od czasu ekspozycji 32
3.3.5 Charakterystyka liniowości kamery 33
3.3.6 Maksymalny, bezpieczny stopień schładzania kamery . 35
3.3.7 Wpływ migawki na ekspozycje 37
3.4 Badanie klatek korekcyjnych 39
3.4.1 Stabilność klatek offsetowych 39
3.4.2 Stabilność klatek ciemnych 41
3.4.3 Stabilność klatek wyrównujących 44
3.4.4 Klatki ciemne w charakterze klatek offsetowych 47

4 Podsumowanie **50**

Bibliografia **51**

Spis rysunków

2.1 Zdjęcie kamery CCD ST-7 firmy SBIG. 13
2.2 Schemat budowy chipa CCD 14

3.1 Klatka offsetowa 20
3.2 Klatka ciemna 23
3.3 Klatka pola wyrównującego 25
3.4 Trójwymiarowe przedstawienie struktury offsetu 28
3.5 Histogram klatki ciemnej (0° C, 300 s) 29
3.6 Histogram klatki ciemnej (−10° C, 300 s) 30
3.7 Zależność prądu ciemnego kamery od temperatury 31
3.8 Zależność prądu ciemnego kamery od czasu 32
3.9 Charakterystyka liniowości kamery ST-7 33
3.10 Odchyłka od liniowości kamery ST-7 34
3.11 Stabilność temperaturowa — populacja II 35
3.12 Stabilność temperaturowa — gorące piksele 36
3.13 Wpływ migawki na ekspozycje 38
3.14 Histogram różnicy klatek ciemnych — przypadek 1 44
3.15 Histogram różnicy klatek ciemnych — przypadek 2 45
3.16 Trójwymiarowa prezentacja uśrednionej klatki wyrównującej . 46
3.17 Histogram klatki wyrównującej z rysunku 3.16 47
3.18 Histogram klatki wyrównującej po wykonaniu operacji dzielenia 48

Spis tablic

2.1 Podstawowe parametry kamery CCD ST-7 firmy SBIG 16

3.1 Stabilność klatek offsetowych. Seria 1. 40
3.2 Stabilność klatek offsetowych. Seria 2. 40
3.3 Stabilność klatek offsetowych. Seria 3. 41
3.4 Stabilność klatek ciemnych. Seria 1. 42
3.5 Stabilność klatek ciemnych. Seria 2. 42
3.6 Stabilność klatek ciemnych. Seria 3. 43
3.7 Stabilność klatek ciemnych. Seria 4. 43
3.8 Porównanie klatek offsetowych. Seria 1. 49
3.9 Porównanie klatek offsetowych. Seria 2. 49

Wstęp

Celem niniejszej pracy magisterskiej była optymalizacja metod redukcji obserwacji fotometrycznych, wykonywanych teleskopem 0,4 m i kamerą CCD-ST7 w Borówcu koło Kórnika.

Pod pojęciem redukcji należy tu rozumieć usuwanie wszelkich negatywnych czynników z otrzymywanych zdjęć, co w przypadku CCD wykonuje się przy użyciu klatek korekcyjnych. Pomimo, że istnieją już standardowe metody redukcji, zadaniem autora było zoptymalizowanie ich dla modelu kamery ST-7 firmy SBIG, wykorzystywanej do rutynowych obserwacji w Obserwatorium Astronomicznym UAM.

W pracy omówiono: budowę i ogólne zasady działania detektorów CCD, a także klatki korekcyjne i sposoby ich tworzenia. Przedstawiono wyniki badań: podstawowych parametrów kamery ST-7, optymalnego sposobu redukcji klatek CCD uzyskiwanych z kamery ST-7 i optymalnych warunków wykonywania obserwacji tą kamerą.

Ze względu na brak polskich odpowiedników niektórych angielskich określeń, autor użył własnych sformułowań, które nie zawsze są wiernym tłumaczeniem ale z pozycji naszego języka najlepiej odpowiadają rzeczom, które opisują.

Rozdział 1

Rys historyczny

Kamera CCD[1] jest to urządzenie służące do rejestracji obrazu, oparte na procesach elektrycznych, w szczególności na zjawisku fotoelektrycznym.

Pierwszy egzemplarz CCD został zbudowany w 1969 roku, przez dwóch naukowców: Willarda S. Boyle'a i George E. Smitha z Bell Telephone Laboratories. Szukali oni nowego sposobu rejestracji obrazu, który miał znaleźć zastosowanie w projektowanym wideotelefonie. Urządzenie miało być tanie a jego technologia oparta na krzemie. Pierwsza kamera złożona była z ośmiu pikseli ułożonych w jeden rząd. Większy model — o rozmiarach 100×100 pikseli — powstał dopiero w 1973. Rok później twórcy otrzymali patent. Wynalazkiem zainteresowało się wielu astronomów widząc jego duże możliwości i zalety. W 1973 NASA Jet Propulsion Laboratory i Texas Instruments zainicjowały program rozwoju dużych matryc CCD dla astronomii kosmicznej. W latach 1973-1979 Texas Instruments rozwijał produkcję CCD, które najpierw osiągały rozmiary 100×160 a ostatecznie 800×800 pikseli.

Na początku 1976 roku otrzymano pierwsze astronomiczne zdjęcia wykonane przy użyciu CCD. Na 61 calowym teleskopie na Mt Bigelow w Santa Catalina sfotografowano Jowisza, Saturna i Urana używając specjalnego filtru przepuszczającego światło w paśmie pochłaniania metanu. Najciekawsze okazało się zdjęcie Urana. Po raz pierwszy można było zobaczyć fotografię tarczy z jasnymi krawędziami wykonaną w takim paśmie. Jeden z obserwatorów stwierdził wówczas: „Każdy [...] kto widział te zdjęcia zgadza się, że potencjał CCD jest większy niż innego sprzętu fotograficznego tych czasów".

Dzisiejsza technika (1999 rok) pozwala na produkcję chipów mieszczących typowo od 4-16 mln pikseli (największe detektory osiągają rozmiary 7000×9000 pikseli), przy czym same piksele mają coraz mniejsze rozmiary wynoszące od 52 do 7 μm^2. Aktualnie kamera CCD jest bardzo rozpowszechnionym narzędziem. Dzięki swoim możliwościom (natychmiastowemu otrzy-

[1] CCD — akronim od *charge-coupled device*

mywaniu zdjęć, dużej czułości, prostocie obróbki) zrewolucjonizowało technikę fotograficzną znajdując zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, między innymi w astronomii.

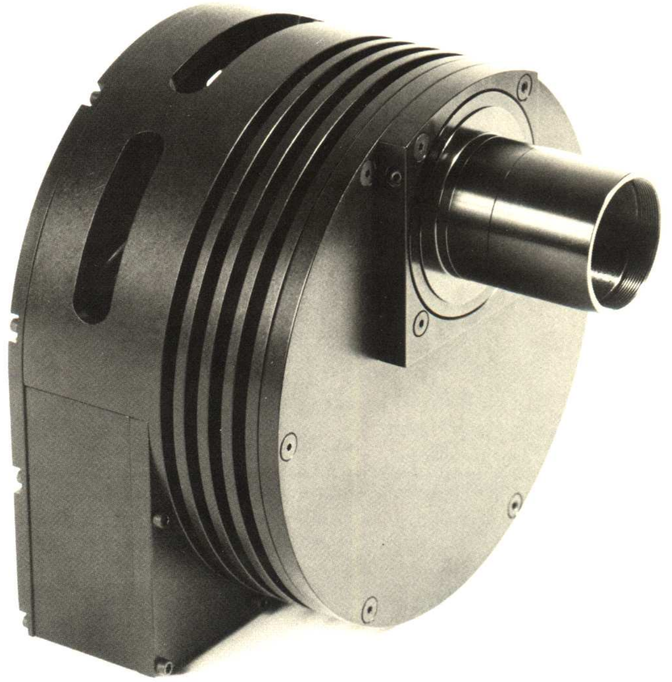
Rozdział 2

Budowa i zasada działania kamery CCD

2.1 Budowa kamery CCD

Zasadniczą częścią kamery jest światłoczuły detektor CCD, który stanowi krzemowa płytka. Składa się ona z trzech warstw: krzemowego podłoża, izolatora i metalowych elektrod. Całość podzielona jest na niewielkie, niezależne elementy zwane pikselami (rys. 2.2). Stanowią one najmniejszą jednostkę zbierającą fotony. Ich rozmiar wynosi zazwyczaj od kilku do kilkudziesięciu μm^2. Do każdego piksela doprowadzona jest elektroda. Pod wpływem przyłożonego do niej napięcia powstaje studnia potencjału, w której może zgromadzić się pewien ładunek. Padający w tym miejscu foton dzięki efektowi fotoelektrycznemu wewnętrznemu przekazuje swoją energię elektronowi, który przemieszcza się w kierunku dodatnio naładowanej elektrody i zostaje tam zatrzymany. Na końcu każdego rzędu pikseli znajdują się elektrody, przez które po zakończeniu ekspozycji zgromadzony sygnał (w postaci elektronów) trafia do wyjściowego wzmacniacza i opuszcza chip. Kolejnym elementem jest przetwornik analogowo-cyfrowy. Jego zadaniem jest zamiana wzmocnionego wcześniej sygnału na postać cyfrową, która po wyprowadzeniu z kamery może być przetwarzana przez urządzenia zewnętrzne np. komputer z odpowiednim oprogramowaniem.

Nieodłącznym elementem kamery jest podzespół chłodzący detektor CCD i odprowadzający ciepło na zewnątrz. Dzięki temu istnieje możliwość obniżenia temperatury chipa nawet o kilkadziesiąt stopni poniżej temperatury otoczenia, co wpływa na zmniejszenie się ilości negatywnych czynników takich jak szumy. Najefektywniejsze metody opierają się na zastosowaniu ciekłego azotu, choć obecnie coraz powszechniej stosuje się chłodzenie termoelektryczne (radiator chłodzony powietrzem lub cieczą płynącą w rurkach).

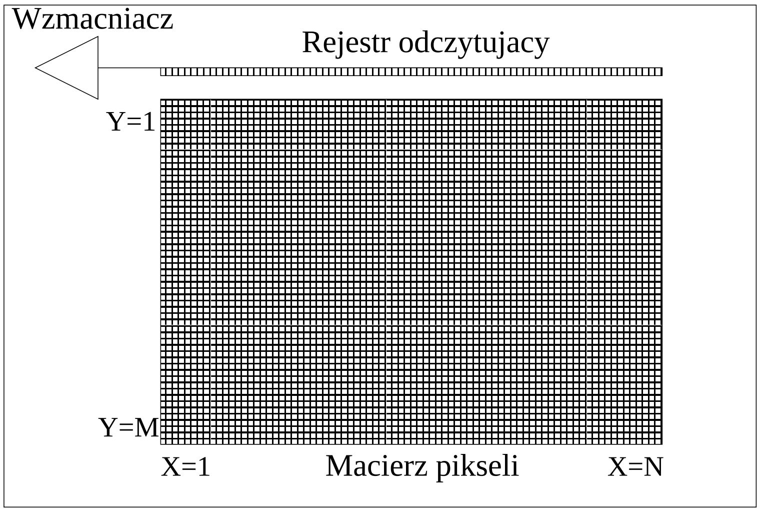


Rysunek 2.1: Zdjęcie kamery CCD ST-7 firmy SBIG.

2.2 Zasada działania kamery CCD

Proces rejestracji obrazu przez kamerę CCD można podzielić na cztery etapy (Newberry, 1995):

1. Wygenerowanie ładunku.
   Jest ono zależne od wydajności kwantowej (QE), która określa jaka część padających na detektor fotonów zostanie zarejestrowana. W idealnym przypadku wydajność ta powinna wynosić 100%, co na razie jest nieosiągalne (np. ze względu na to, że QE jest zależne od długości fali). Kiedy na płytkę krzemową pada foton, w wyniku efektu fotoelektrycznego wewnętrznego następuje przekazanie jego energii elektronom. Jeżeli foton ma wystarczająco dużą energię, wynoszącą przynajmniej 1,13 elektronowolta, powstaje jeden lub kilka wolnych elektronów. Energia ta z kolei jest ściśle związana z długością fali co powoduje, że czułość CCD jest różna dla różnych częstotliwości padającego światła. Zakres czułości kamery CCD mieści się na ogół w przedziale od 330 nm do 1100 nm, osiągając swoje maksimum w okolicach 650 nm. Fale krótsze niż 650 nm zaczynają być pochłaniane przez elektrody na powierzchni płytki krzemowej, zmniejszając tym samym wydajność detektora w zakresie krótkofalowym (w okolicach 400 nm QE na ogół nie przekracza kilku procent). Stosuje się różne techniki, aby podnieść wydajność



Rysunek 2.2: Schemat budowy chipa CCD. Zasadniczą jego część stanowi macierz pikseli rejestrująca fotony. Po zgromadzeniu ładunku trafia on do rejestru odczytującego, a z tamtąd do wyjściowego wzmacniacza.

kwantową. Jedna z nich polega na oświetlaniu płytki krzemu od tyłu, gdzie jej powierzchnia nie jest przesłonięta przez siatkę elektrod. Pozwala to przekroczyć 80% próg rejestracji fotonów, ale jest bardzo kosztowne.

2. Zbieranie ładunku.
   Wydajność tego procesu jest zależna od trzech parametrów:

   - Ilości pikseli w detektorze.
     Im większa płytka i mniejsze piksele tym większa rozdzielczość i zdjęcie. Jednak wadą jest dłuższy czas odczytywania detektora i trudności z obsłużeniem tak dłużej matrycy. Optymalnym rozmiarem piksela jest 15 μm^2 mogące zgromadzić do 500 tys. elektronów.
   - Ilości elektronów, które mogą być zgromadzone w jednym pikselu.
     Wielkość ta zazwyczaj mieści się w przedziale od 50 tys. do 1 mln. Im większa wartość tym lepiej (można uzyskać większy kontrast). Poza tym większe piksele pozwalają zebrać więcej ładunku.
   - Zdolność do utrzymania ładunku zanim zostanie on zmierzony.
     Wiąże się z tym możliwość rozlewania ładunku na inne piksele,

co daje wrażenie jakby zdjęcie nie było dobrze zogniskowane. W idealnej sytuacji elektrony zgromadzone przez piksel powinny w nim pozostać do czasu dokonania odczytu.

3. Transfer ładunku.
Po zgromadzeniu ładunku, musi on zostać przesłany do wyjściowego wzmacniacza poprzez cały rząd oddzielających go elementów. W tym celu przykłada się do wejścia napięcie, które zmusza elektrony do ruchu od jednego piksela do następnego. Jeden ze sposobów transferu to tzw. transfer liniowy, gdzie najpierw odczytuje się pionowe piksele a następnie sprawdza się do którego rzędu należą. Drugi to transfer klatkowy polegający na skopiowaniu całej klatki do innej, która służy jako pamięć do chwili odczytu. W czasie tych operacji ważne jest aby stracić jak najmniejszą część tego ładunku. Współczesne kamery CCD mają wydajność transferu przekraczającą 99,9999%.

4. Pomiar zgromadzonego ładunku.
Pomiar dokonywany jest w małym kondensatorze (o pojemności ok. 50 fF), podłączonym do wyjściowego tranzystora. Tranzystor działa jak wzmacniacz, generując napięcie proporcjonalne do ładunku. Ostatecznie sygnał trafia do przetwornika analogowo-cyfrowego.

2.3 Charakterystyka kamery ST-7

Poniżej przedstawiono podstawowe parametry kamery CCD ST-7 (rys. 2.1) firmy Santa Barbara Instrument Group (dane producenta).

Model kamery ST-7 wyposażony jest w dwa detektory CCD. Zasadniczym elementem jest chip Kodak KAF-0400 CCD, który służy do rejestracji obrazu obserwowanego obiektu, natomiast drugi chip zajmuje się wyłącznie jego śledzeniem.

Całość, łącznie z elektroniką zamknięta jest w zwartej obudowie, przypominającej walec o średnicy 12,5 cm i wysokości 7,5 cm. Umieszczono w niej także termoelektryczny radiator, regulowany z dokładnością $0,1°C$ i mogący schłodzić wnętrze kamery o 25°C poniżej temperatury otoczenia. Całość waży ok. 0,9 kg.

Kamera współpracuje z komputerami PC lub Macintosh. Komunikacja z nimi odbywa się przez standardowy port równoległy. Do obsługi kamery służy program CCDOPS w wersji dla DOS lub Windows.

Podstawowe parametry kamery przedstawiono w tablicy 2.1.

Tablica 2.1: Podstawowe parametry kamery CCD ST-7 firmy SBIG

Parametry dotyczące chipa:	
Chip CCD:	Kodak KAF-0400
Rozdzielczość:	765×510 pikseli
Całkowita liczba pikseli:	390150
Rozmiar piksela:	9 μm^2
Wymiary chipa:	$6,9 \times 4,6$ mm
Studnia potencjału:	30 tys. e^-
Wydajność kwantowa (maks.):	55%
Prąd ciemny:	$1e^-$ /piksel/s przy 0°C
Parametry dotyczące odczytu:	
Migawka:	elektro-mechaniczna
Czas ekspozycji:	$0,11$ s — 3600 s
	rozdzielczość $0,01$ s
Przetwornik analogowo/cyfrowy:	16 bitowy
	$2,3e^-$/ADU
Szum odczytu:	$15e^-$

Rozdział 3

Redukcja obserwacji CCD

3.1 Czynniki negatywne

W procesie wykonywania zdjęć kamerą CCD na drodze do otrzymania ostatecznego zdjęcia, należy wziąć pod uwagę czynniki negatywnie wpływające na jego jakość: wynikające z praw fizyki, rozwiązań konstrukcyjnych a także zwykłego zabrudzenia. Ze względu na niedoskonałość techniczną urządzenia, w procesie robienia zdjęcia należy uwzględnić tzw. offset[1], prąd ciemny[2] i pole wyrównujące[3] zwracając uwagę na kolejności powyższych korekcji. W przeciwnym wypadku można otrzymać obraz na którym znajdą się plamki, rozjaśnienia i inne uboczne efekty. W rozważaniach na temat redukcji obserwacji CCD należy wziąć pod uwagę kolejność w jakiej fotony oddziałują na drodze od źródła światła, poprzez system optyczny do zamiany w cyfrowe zdjęcie i pracować w odwrotnej kolejności.

Poniżej przedstawiono porządek zdarzeń dla fotonów wędrujących w postaci promieni od chwili gdy wchodzą one do teleskopu, do czasu gdy zdjęcie jest odczytane przez detektor (Newberry, 1995):

1. Światło pada na obiektyw teleskopu tworząc ogólny sygnał S proporcjonalny do oświetlenia R_o i czasu ekspozycji t: $S = R_o t$

2. System optyczny ma różne stopnie winietowania, które redukują intensywność poza osiowych promieni. Efekt ten oznaczono jako V.

3. Cząstki kurzu na filtrach i szkłach optycznych redukują intensywność promieniowania. Ponieważ znajdują się one poza ogniskiem, ich cienie

[1] offset — bias
[2] prąd ciemny — dark count
[3] pole wyrównujące — flat field

na CCD mają postać krążków dyfrakcyjnych; ich wpływ oznaczono przez s.

4. Migawka w kamerze CCD porusza się ze skończoną prędkością i może powodować nierównomierne ekspozycje na całej powierzchni detektora. W niektórych kamerach migawka jest otwarta dłużej w jej centrum niż na krańcach. To powoduje, że promienie padające centralnie są dłużej naświetlane, niż te padające na krawędzie. Przy krótkich ekspozycjach różnice te mogą stanowić duży procent całkowitej ekspozycji.

5. Piksele, które rejestrują padające na nie promienie, mogą się różnić czułością. Całkowity sygnał zarejestrowany przez piksel zależy od jego wydajności kwantowej q.

6. Podczas ekspozycji detektor wytwarza własny, wewnętrzny (termiczny) ładunek, nawet podczas nieobecności światła. Ten ładunek, określany jako prąd ciemny S_d zależy od współczynnika prądu ciemnego R_d i czasu aktywizacji detektora t_d: $S_d = R_d t_d$. Efekt prądu ciemnego usuwa się odejmując od zdjęcia tzw. ciemną klatkę[4], będącą ekspozycją wykonaną przy zamkniętej przysłonie.

7. Rejestracja padającego światła przez detektor CCD wymaga obecności w nim pewnego stałego, dodatniego ładunku elektrycznego B zwanego offsetem. Ponieważ jego wielkość nie zależy od czasu naświetlania, można go usunąć z otrzymanego zdjęcia odejmując od niego inne zdjęcie, wykonane z zerowym czasem ekspozycji.

Całkowity sygnał zapamiętany przez piksele naświetlone przez dwa przykładowe promienie S_1 i S_2 jest dany przez poniższe równania. Oryginalny sygnał $R_o t$ znajduje się w pierwszej części każdego równania:

$$\begin{aligned} S_1 &= R_{o1} t_1 V_1 s_1 q_1 + R_{d1} t_{d1} + B_1, \\ S_2 &= R_{o2} t_2 V_2 s_2 q_2 + R_{d2} t_{d2} + B_2. \end{aligned} \tag{3.1}$$

Właściwą drogą do usunięcia każdego efektu jest praca z równaniami od prawej do lewej i usunięcie każdego efektu w odwrotnej kolejności jak powstał. Poprawek dokonuje się najpierw ze wzgl. na offset (odejmowanie), potem na prąd ciemny (odejmowanie) i na końcu na czynniki multiplikatywne V, s, q (dzielenie). W powyższych równaniach należy zwrócić uwagę na pogrupowanie wyrażeń, które mogą zazwyczaj być poprawiane za jednym razem (np. korekcję ze wzgl. na czynniki V, s, q wykonuje się łącznie za pomocą tzw. pola wyrównującego).

[4]klatka ciemna — dark frame

Oprócz powyższych, możliwych do skorygowania efektów, pojawiają się losowe szumy na które nie ma wpływu.

Zdjęcia CCD są podatne na następujące źródła szumów:

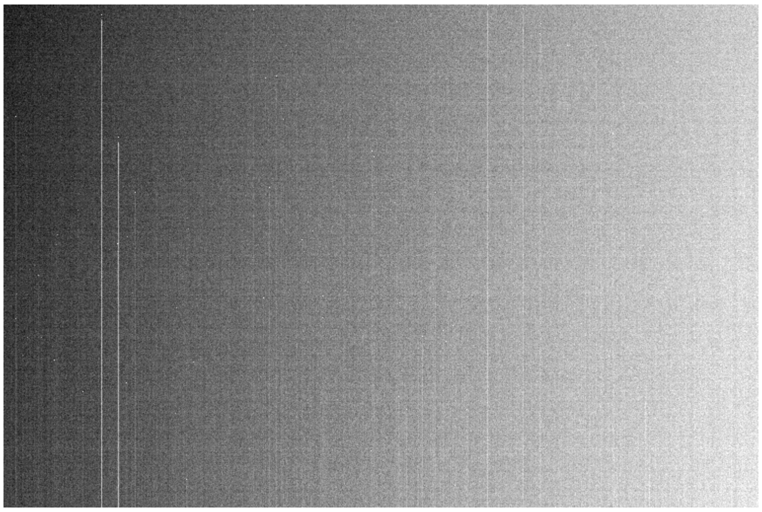
- szum fotonowy — losowe fluktuacje w fotonowym sygnale; proporcje w jakich fotony są otrzymywane nie są stałe,
- szum termiczny — statystyczne fluktuacje w tworzeniu termicznego sygnału; współczynnik przy którym elektrony są produkowane w półprzewodnikowej warstwie odpowiadającej za termiczne efekty, nie jest stały,
- szum odczytu — błędy w odczycie sygnału; generowane głównie na wyjściowym wzmacniaczu,
- kwantyzacja szumu — błędy wprowadzane w trakcie konwersji w przetworniku analogowo-cyfrowym,

3.2 Klatki korekcyjne

3.2.1 Offset

Offset jest dodatnim ładunkiem przyłożonym do CCD, aby uaktywnić jego pojemność zbierającą fotony. Jest obecny jako fałszywy sygnał w każdym zdjęciu. Na ogół poziom offsetu dryfuje w górę i dół wraz z czasem, gdy zmienia się temperatura elektroniki kamery. W ten sposób pomiary robione natychmiast po wykonaniu zdjęcia, dają najlepszą ocenę offsetu. Wydaje się, że jest to wystarczające aby odjąć pojedynczą klatkę offsetową[5] ze zdjęcia. Powoduje to jednak niepotrzebne obniżenie stosunku sygnału do szumu (ang. S/N[6]) z końcowego zdjęcia. Lepszy rezultat jest osiągany przez rozdzielenie offsetu na dwa składniki: poziom offsetu[7] i strukturę offsetu[8]. Matematycznie można opisać całkowity offset B jako sumę wolnego od szumów offsetu strukturalnego B_s, wolnego od szumów poziomu offsetu B_o oraz szumu R powstającego w trakcie odczytywania detektora. Tak więc $B = B_s + B_o \pm R$. To powoduje, że możemy oddzielić B_s od B_o i poprawić je oddzielnie aby otrzymać lepszy S/N.

[5] klatka offsetowa — bias frame
[6] S/N — signal/noise
[7] poziom offsetu — bias offset
[8] struktura offsetu — bias structure



Rysunek 3.1: Typowa klatka offsetowa wykonana w temperaturze 0° C i czasie ekspozycji $0,11$ s (jest to najkrótszy możliwy czas dla kamery ST-7). Cechą charakterystyczną jest widoczna ziarnistość oraz wzrost jasności punktów od lewego górnego narożnika do prawego dolnego. W niektórych miejscach ujawniły się tzw. gorące piksele (o nadzwyczaj dużym ładunku), które w trakcie odczytywania zaznaczyły swoją drogę pionowymi jaśniejszymi liniami.

Tworzenie klatek offsetowych

Niektóre kamery wytwarzają klatki offsetowe (rys. 3.1) bezpośrednio przez strumieniowe naładowanie z detektora i jego natychmiastowy odczyt. Odpowiada to wykonaniu normalnej ekspozycji z zerowym czasem naświetlania. Jeżeli kamera nie ma takich możliwości, można do tego celu użyć dwóch klatek ciemnych. Najpierw trzeba sprawdzić czy „surowa” klatka ciemna zawiera prąd ciemny i offset. Jeśli całkowity prąd ciemny wynosi $R_d t_d$, a nieznany offset — B, wtedy surowy prąd ciemny wynosi: $D = B + R_d t_d$. Biorąc dwie klatki ciemne (uzyskane w tej samej temperaturze detektora) D_1 i D_2, z których jedna miała dwukrotnie dłuższy czas ekspozycji niż druga, można uzyskać klatkę offsetową. W tym celu podwaja się klatkę krótszą i odejmuje od niej dłuższą:

$$2D_1 - D_2 = (2B - B) + (2R_d t_1 - R_d 2t_1) = B. \tag{3.2}$$

Najlepsze rezultaty otrzymuje się przy krótkich ekspozycjach rejestrujących przynajmniej 1 tys. elektronów na piksel.

Poprawianie poziomu offsetu

Poziom offsetu B_o powinien być odjęty od każdego piksela. Jest kilka sposobów na jego zmierzenie. Jeśli nie ma offsetu strukturalnego, wtedy każdy piksel w klatce offsetowej ma ta samą wartość plus/minus jakaś wartość szumów. Dobrą metodą pomiaru jest uśrednianie bloków (np. 33×33 piksele). Jeżeli średnia B_o zmienia się znacząco gdziekolwiek na chipie, wtedy offset strukturalny jest obecny. W niektórych kamerach do wyznaczenia offsetu przeznaczona jest funkcja over-scan. W tej technice czytane są fikcyjne piksele zwane „empty phases” jako część zdjęcia. Użytkownicy kamer, które nie mają lub nie używają tej funkcji powinni po każdym zdjęciu, lub przynajmniej okresowo w ciągu nocy robić klatki offsetowe. Jeśli wartość poziomu offsetu zmienia się podczas sesji, można odejmować wartości stosownie do czasu naświetlania każdego zdjęcia. Jeśli nie — można uśrednić indywidualne wartości i odjąć taką średnią od każdego piksela z każdego zdjęcia.

Usuwanie offsetu strukturalnego

W idealnej sytuacji, (wyjąwszy losowe szumy odczytu) wartość offsetu powinna być ta sama dla wszystkich pikseli. Jednak często klatka offsetowa posiada strukturę, w której piksele w jednej części zdjęcia mają odmienne średnie wartości niż w innej (rys. 3.4). Niektóre ze struktur tworzą jednolicie pochyłe powierzchnie, najczęściej pojawiające się w niewystarczająco oziębionych detektorach lub kamerach CCD odczytujących zdjęcia zbyt wolno. Inne z kolei są po prostu błędami elektroniki. Można określić czy struktura offsetu jest powtarzalna przez odejmowanie jednej klatki offsetowej od innej. Nie ma znaczenia, jeśli średnia różnica nie jest zerem. Ta różnica jest losowa a średnia różnica w małych obszarach gdziekolwiek na zdjęciu ma w przybliżeniu tą samą wartość. Szum oznaczony przez odchylenie standardowe wartości pikseli, daje ścisłe wskazania równe nie reprodukcyjnej strukturze offsetu. W idealnej sytuacji odchylenie standardowe pomiędzy klatkami powinno być $\sqrt{2}$ razy większe niż odchylenie standardowe mierzone nad tym samym obszarem w indywidualnych klatkach. Wszystko co jest większe reprezentuje dodatkowy szum. Offset strukturalny można przechowywać w tzw. klatce uśrednionej [9]. Zaczyna się od prostego mierzenia i odejmowania poziomu offsetu od dużej liczby klatek offsetowych. Potem uśrednia się je, mierzy każdy poziom offsetu i odejmuje go. Ponieważ taka klatka jest średnią z wielu, losowy szum jest

[9] klatka uśredniona — master frame

niwelowany a stosunek S/N rośnie. Do uśredniania najlepiej używać mediany a nie średniej arytmetycznej, gdyż otrzymuje się wówczas lepsze wyniki.

3.2.2 Klatki ciemne

Prąd ciemny

Nawet podczas braku światła, piksele w kamerze CCD zbierają sygnał, który jest proporcjonalny do czasu ekspozycji. Powstaje on w wyniku termicznej generacji:

- w naturalnej masie krzemowej (pewną rolę odgrywa tu także dyfuzja),
- w studni potencjału,
- w obszarach „powierzchniowych" na granicach pomiędzy warstwą krzemu i izolatora.

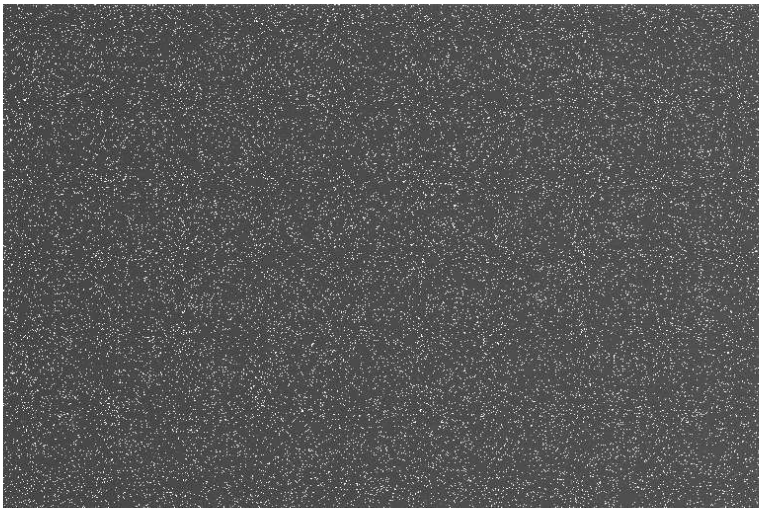
Z takich nieuniknionych i losowych ruchów elektronów w obrębie detektora powstaje prąd ciemny. Współczynnik prądu ciemnego R_d dla danego piksela zależy od temperatury ale jest niezależny od ilości padającego na sensor światła. Współczynnik ten zmienia się w sposób wykładniczy wraz z temperaturą tzn. podwaja się lub zmniejsza o połowę wraz z określonym wzrostem lub spadkiem temperatury. Jeżeli jako ΔT oznaczy się stałą dla danej kamery ilość stopni, przy których następuje podwojenie prądu ciemnego a przez R_{d0} współczynnik prądu ciemnego dla temperatury T_0, to można przewidzieć R_d dla T:

$$R_d = R_{d0} 2^{\frac{T-T_0}{\Delta T}}, \tag{3.3}$$

Oznaczając prąd ciemny przez S_d a czas ekspozycji przez t otrzymuje się:

$$S_d = R_d t_d. \tag{3.4}$$

Prąd ciemny w danym pikselu zależy od czasu ekspozycji, temperatury sensora i wewnętrznego współczynnika prądu ciemnego danego piksela w określonej temperaturze. Ponieważ prąd ciemny jest zbędną wadą, powinno się go usuwać z określonych pikseli przez odejmowanie go od danego piksela. Najczęściej robi się to przy użyciu klatki ciemnej czyli ekspozycji podobnej do normalnej, tylko wykonanej przy braku wszelkiego światła (rys. 3.2). Ponieważ prąd ciemny gromadzi się podczas ekspozycji, to aby go usunąć trzeba wiedzieć jak długo się zbierał. W tym celu powinno się robić klatkę ciemną o tym samym czasie ekspozycji co zdjęcie i odejmować. Są jednak lepsze metody. Aby zwiększyć stosunek sygnału do szumu, należy połączyć wiele klatek w jedną tworząc tzw. uśrednioną klatkę ciemną. Ta klatka nie musi mieć tak samo długiej ekspozycji jak zdjęcie ponieważ można ją skalować (mnożyć wszystkie piksele przez jakąś stałą) aby uzyskać zgodność czasową ze zdjęciem.



Rysunek 3.2: Typowa klatka ciemna wykonana w temperaturze $-10°$ C i czasie ekspozycji 300 s. Charakterystyczną cechą takich klatek jest ich ziarnistość. Najciemniejsze piksele należą do populacji I, jaśniejsze do II, a najjaśniejsze to gorące piksele.

Szum w prądzie ciemnym

Kiedy robi się klatkę ciemną, ciągle nie zna się dokładnie prądu ciemnego w każdym pikselu (ze względu na losowość elektronów zebranych w pikselu). Szum w prądzie ciemnym dla każdego piksela nie może być mniejszy niż pierwiastek jego wartości. Np. gorący piksel z prądem ciemnym zawierającym 10 tys. elektronów może się zmieniać o 100 elektronów pomiędzy kolejnymi klatkami. W nieobrobionym zdjęciu nie wiadomo czy prąd ciemny w konkretnym pikselu jest powyżej, poniżej czy też blisko średniej. Kiedy odejmuje się klatkę ciemną w najlepszym wypadku można mieć nadzieję na pozostałość losowego szumu. To oznacza, że na zdjęciu stale będą się znajdować jasne lub ciemne plamki. Cechą MPP (multi-pinned-phase) jest to, że nie ma znaczenia średni współczynnik prądu ciemnego dla wszystkich pikseli. Statystyczna średnia jest znacząca, wtedy gdy jest dokładnie jedna badana populacja. Ale kiedy robi się histogram z klatki ciemnej techniką MPP widać dwie wyraźne populacje pikseli, każda z dobrze zdefiniowaną średnią wartością i losowymi fluktuacjami tej średniej (rys. 3.5 i 3.6). Większość pikseli jest normalna, część ma wysoki prąd ciemny a kilka można zakwalifikować do tzw. gorących (wyróżniających się nadzwyczaj wysokim prądem w stosunku do otoczenia). Należy zauważyć, że piksele o większym prądzie ciemnym mają większe szumy i nie można ich poprawić z taką precyzją jak piksele tzw. normalne. To wyjaśnia, dlaczego kamery CCD operujące w wyższych temperaturach (a więc mające większy prąd ciemny) pozostawiają więcej plamek i skaz na zdjęciach z odjętą klatką ciemną.

Używanie uśrednionych klatek ciemnych

Ponieważ pojedyncze klatki ciemne odejmowane od zdjęć (nawet przy dobrze chłodzonych kamerach) nie mają zbyt dużego współczynnika S/N nie jest to najlepsza metoda pracy. Aby ją polepszyć używa się uśrednionych klatek ciemnych. Jest to pojedyncza klatka zsumowana i uśredniona z wielu innych, umiarkowanie długich czasowo z usuniętym offsetem. Ma ona wysoki współczynnik S/N i można ją odejmować od wszystkich zdjęć. Aby tą metodę zastosować, wszystkie zdjęcia i klatki ciemne muszą być wykonane przy tej samej temperaturze CCD. Dodając klatki ciemne dostajemy współczynnik S/N odpowiedni do długiej ekspozycji. Ale długie ekspozycje mogą ujawnić nietypowe pojedyncze piksele w indywidualnych ekspozycjach. Mogą one być wynikiem promieniowania kosmicznego. Dlatego przy uśrednianiu klatek stosuje się medianę, która jest niewrażliwa na pojedyncze wartości, znacznie odstające od średniej.

Uśrednianie prądu ciemnego

Dla ekspozycji wykonywanych przy słabej ilości docierającego światła, które z tego względu są bardzo długie (a prąd ciemny ekstremalnie jednolity) pewien obszar klatki ciemnej może być uśredniony i użyty w roli klatki uśrednionej.

3.2.3 Pole wyrównujące

Pole wyrównujące jest to prosta mapa względnej czułości każdego piksela w detektorze. Jest ono potrzebne do korygowania wewnętrznych nieregularności czułości układu CCD. Pole takie tworzy się przez zrobienie zdjęcia jednolicie oświetlonej powierzchni (rys. 3.3). Zanim zacznie się wykonywać korekcję pola wyrównującego należy zwrócić uwagę, aby offset i klatki ciemne były już usunięte ze zdjęcia i pola wyrównującego. W przeciwnym wypadku rezultat może być gorszy niż bez robienia tej poprawki. Jeżeli od równań (3.2) odejmie się S_d (prąd ciemny) i B (offset), to otrzyma się:

$$\begin{aligned} S_1 &= R_{o1} t_{o1} V_1 s_1 q_1, \\ S_2 &= R_{o2} t_{o2} V_2 s_2 q_2. \end{aligned} \tag{3.5}$$

Aby dla każdego piksela dostać właściwy sygnał $R_o t_o$, musimy podzielić S przez Vsq:

$$\begin{aligned} R_{o1} t_{o1} &= \frac{S_1}{V_1 s_1 q_1}, \\ R_{o2} t_{o2} &= \frac{S_2}{V_2 s_2 q_2}. \end{aligned} \tag{3.6}$$

Zdjęcie zawierające efekty Vsq dla każdego piksela jest zwane klatką pola wyrównującego[10].

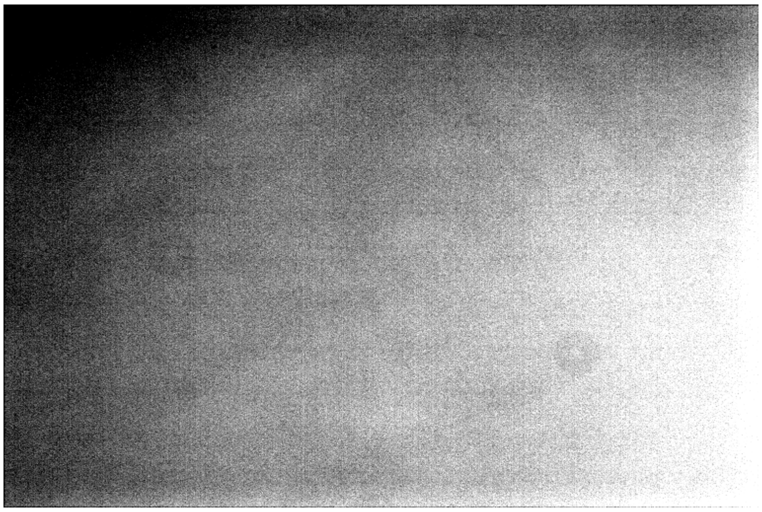
Tworzenie klatek wyrównujących

W ekspozycji pola wyrównującego należy unikać wprowadzania niepowtarzalnych wzorów, zależnych od mechanicznych i optycznych efektów. Ustawienia pomiędzy kamerą CCD a systemem optycznym muszą pozostawać przez cały czas niezmienione. Należy przestrzegać następujących zasad:

- Ustawienie kamera-teleskop nie może się zmieniać podczas nakierowywania systemu na inną część nieba.
- Filtry muszą być umieszczane dokładnie w tych samych miejscach aby cienie od kurzu na filtrach były umiejscowione na tych samych pikselach. Przy przesuwaniu filtra dalej od CCD, cień od kurzu powiększa się i rozmazuje. Jednocześnie staje się trudniejsze dokładne powtórzenie pozycji filtra.
- Ponieważ nie jest możliwe usunięcie kamery lub filtra z teleskopu i ponowne umieszczenie go dokładnie w tej samej pozycji, po każdej regulacji sprzętu trzeba wykonać nową ekspozycję pola wyrównującego.

Warto także zwrócić uwagę na to, że:

[10]klatka pola wyrównującego — flat field frame



Rysunek 3.3: Typowa klatka pola wyrównującego wykonana w temperaturze -5° C i czasie ekspozycji 5 s. Widoczne są obszary o różnej jasności, co wiąże sie z różną czułością pikseli, rozkładem padającego światła i zabrudzeniem. Cząstki kurzu znajdujące się na szkłach dają efekt krążków dyfrakcyjnych, widocznych w prawym dolnym narożniku.

- Optyka teleskopu i czułość CCD mogą się zmieniać w zależności od długości fali światła. Istotne jest więc aby pola wyrównujące były wykonywane w tym samym filtrze co zdjęcia nieba.
- Kwantowa wydajność (QE) zmienia się wraz z temperaturą.

Tworzenie uśrednionych klatek pola wyrównującego

Korekcja zdjęcia przy pomocy pola wyrównującego obniża współczynnik S/N. Aby zminimalizować tą degradację musimy użyć pola wyrównującego mającego bardzo duży S/N, zazwyczaj większy niż 100. Najlepiej zrobić to łącząc wiele klatek w jedną: uśrednioną. Jeśli np. pole wyrównujące ma średnio 2,5 tys. ADU[11] na piksel, a CCD ma zysk równy 4 e^-/ADU, wtedy w pojedynczym pikselu gromadzi się średnio 10 tys. elektronów. Ponieważ najlepszym S/N jaki możemy otrzymać jest pierwiastek z ogólnej liczby elektronów, w tym przypadku będzie on wynosił ok. 100. Łącząc 9 takich klatek S/N wzra-

[11] ADU — analog to digital units

sta do 300 ($100 \times \sqrt{9}$). To pomaga także usuwać pewne losowe cechy takie jak np. promieniowanie kosmiczne. Połączenie indywidualnych klatek nie stanowi większego problemu. Najpierw od każdej „surowej” klatki musi być odjęty prąd ciemny i offset. Potem liczy się wartość mediany dla każdego piksela w rzędzie i przeznacza do końcowego pola wyrównującego.

Wybieranie równomiernie oświetlonej powierzchni dla pola wyrównującego

Powierzchnia dla pola wyrównującego musi oświetlać CCD tak samo jak nocne niebo. Jeśli np. obserwujemy przez filtr, to pole wyrównujące również powinno być zrobione przez ten filtr.

- Zmierzchowe pole wyrównujące: [12]
  Pozwala osiągnąć wysoki współczynnik S/N. Aby wyeliminować gwiazdy z uśrednionej klatki wyrównującej, należy zrobić 5-9 ekspozycji na ubogim w gwiazdy obszarze nieba. Pomiędzy ekspozycjami teleskop powinien być przesuwany w celu uniknięcia położenia gwiazd w tym samym miejscu. Potem zdjęcia należy połączyć z uwzględnieniem mediany.

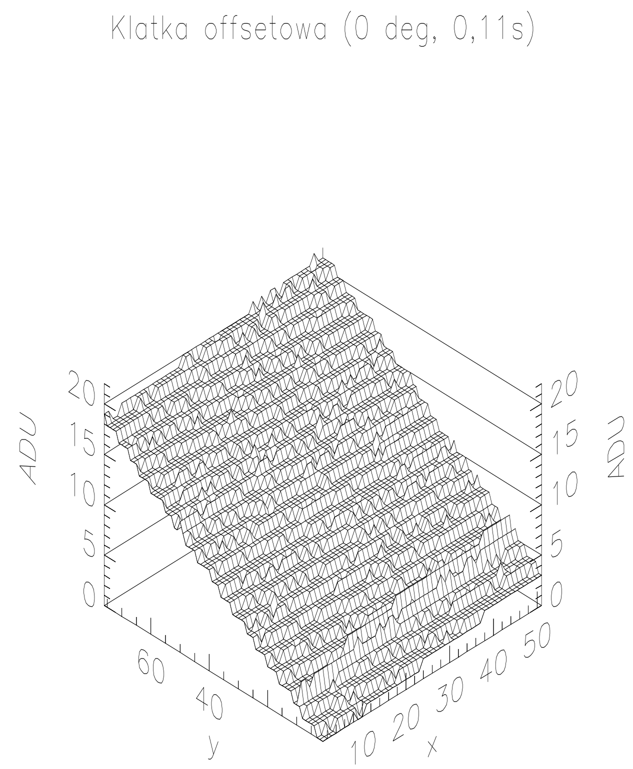
- Nocne pole wyrównujące: [13]
  Łączy wiele aktualnych zdjęć nieba. Te pola wyrównujące są bardziej efektywne, kiedy niebo jest względnie jasne (należy więc dysponować dużą liczbą zdjęć aby otrzymać dobry współczynnik S/N). Aby dostać S/N równy ok. 300, to przy zysku CCD: 1 elektron na 1 zliczenie, potrzeba 300 zdjęć, każde z tłem 300 ADU. Jest to więc procedura bardzo czasochłonna, ale można nią uzyskać prawidłowo oświetlone pole.

- Ekranowe pole wyrównujące: [14]
  Jest wykonywane poprzez zrobienie zdjęcia ekranu umieszczonego przed teleskopem. Ekran musi całkowicie wypełniać otwór teleskopu, a CCD musi być oświetlona tak samo jak nocne niebo. Ta metoda ma dwie zalety: można kontrolować poziom oświetlenia i dopasować kolor do nocnego nieba. Jeśli czas ekspozycji przekracza 10 s, ekranowe pole wyrównujące powinno być złożone z połączonych klatek z użyciem mediany, w celu usunięcia ewentualnych śladów promieniowania kosmicznego. Tą metodą można osiągnąć wysoki współczynnik S/N. Wadą jest trudność w uzyskaniu idealnie i równomiernie oświetlonej powierzchni ekranu.

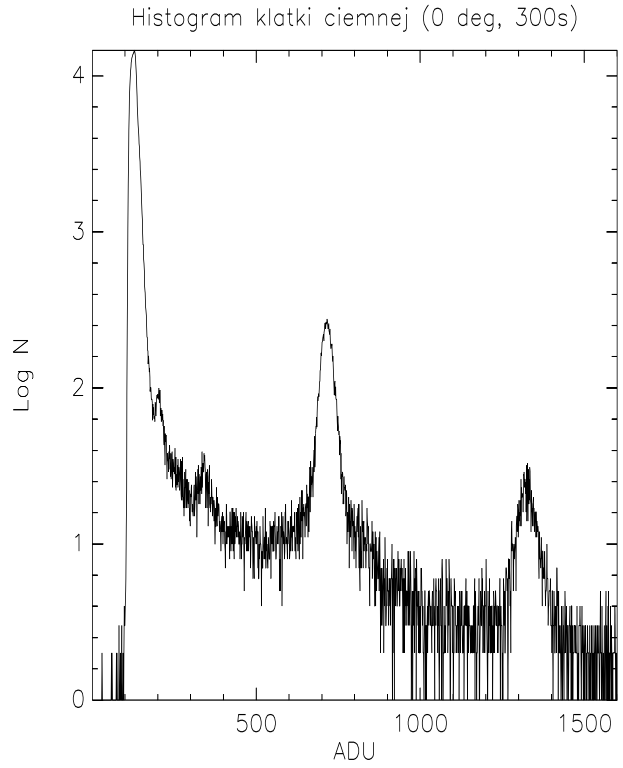
[12] zmierzchowe pole wyrównujące — twilight flat field
[13] nocne pole wyrównujące — sky flat field
[14] ekranowe pole wyrównujące — dome flat field

3.3 Testowanie kamery CCD ST-7

Kamera CCD ST-7 została poddana testom, wykonanym w Stacji Obserwacyjnej UAM znajdującej się na terenie Obserwatorium Astrogeodynamicznego CBK PAN w Borówcu oraz częściowo w warunkach laboratoryjnych. Zasadniczym celem było ustalenie optymalnych metod redukcji klatek CCD oraz dobranie jak najlepszych parametrów ich wykonywania. Testy miały także na celu porównanie, jak parametry kamery podane przez producenta odnoszą się do testowanego egzemplarza.



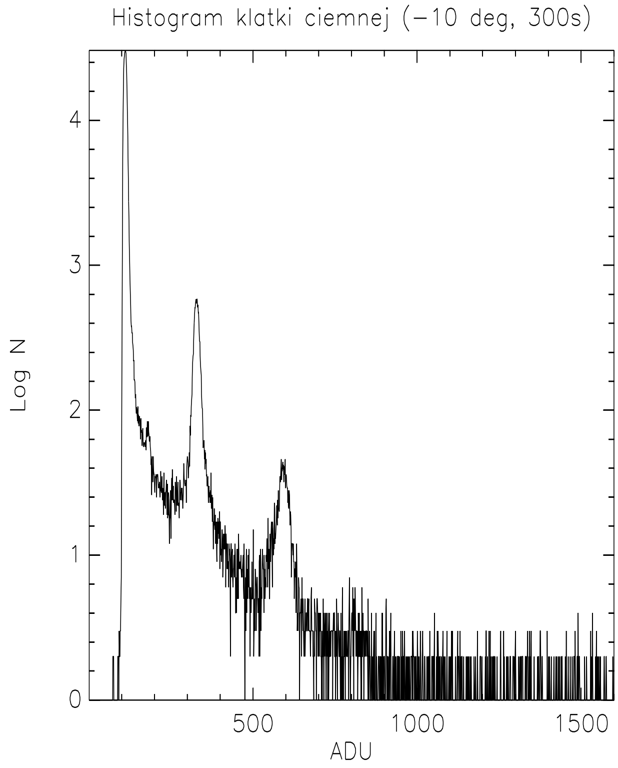
Rysunek 3.4: Trójwymiarowe przedstawienie struktury offsetu. Klatka uśredniona z 10 ekspozycji wykonanych w temperaturze $T = 0°$ C i czasie ekspozycji $t = 0,11$ s. Pochyła płaszczyzna ilustruje rozkład struktury offsetu. Widać, że dla dwóch krańcowych części klatki ma on różną wysokość. Widoczne nierówności powierzchni to wahania offsetu oscylujące wokół pewnej średniej oraz szumy elektroniki.



Rysunek 3.5: Histogram klatki ciemnej, wykonanej w temperaturze 0° C i czasie ekspozycji 300 s bez odejmowania offsetu. Wykres przedstawia zależność ilości pikseli od ich wartości w ADU. Oś Y jest w skali logarytmicznej. Na wykresie widać trzy wzniesienia, z których pierwsze reprezentuje piksele populacji I (stanowiące ok. 94% całości), środkowe populacji II (ok. $3,3\%$) a ostatnie to tzw. gorące piksele. Po lewej stronie wykresu zaznaczyły swoją obecność nieliczne zimne piksele (o wartościach poniżej 100 ADU). Za widoczne poszarpania odpowiadają szumy.

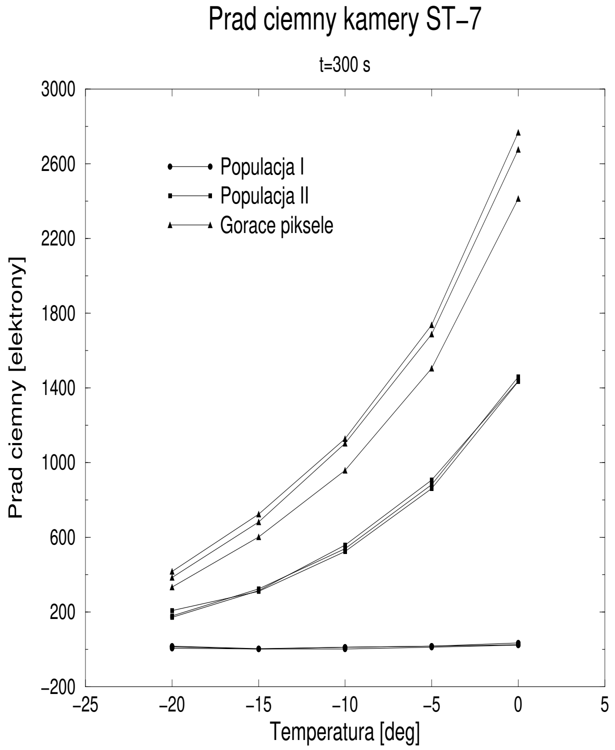
3.3.1 Analiza klatek offsetowych

Rysunek 3.4 to trójwymiarowe, graficzne przedstawienie struktury offsetu, tworzącego jednolicie pochyłą powierzchnię, opadającą od jednej krawędzi klatki do drugiej. Średni poziom offsetu dla tej klatki ($T = 0°$ C, czas ekspozycji $t = 0,11$ s) wynosi $11,29 \pm 5,73$ ADU, natomiast struktura offsetu zmienia się od $0,8 \pm 1,4$ ADU do $22,1 \pm 1,7$ ADU. W przypadku klatki offsetowej wykonanej w temperaturze detektora $T = -15°$ C i takim samym czasie ekspozycji, średni poziom offsetu wynosi już tylko $4,86 \pm 2,67$ ADU a struktura offsetu na dwóch skrajnych krawędziach wynosi $0,4 \pm 1,1$ ADU i $9,2 \pm 1,4$ ADU. W celu zmniejszenia błędów przypadkowych, warto-



Rysunek 3.6: Histogram klatki ciemnej, wykonanej w temperaturze $-10°$ C i czasie ekspozycji 300 s bez odejmowania offsetu. Zmniejszenie temperatury spowodowało zmniejszenie się wartości wszystkich populacji pikseli i przesunięcie ich w lewą stronę w stosunku do rysunku 3.5.

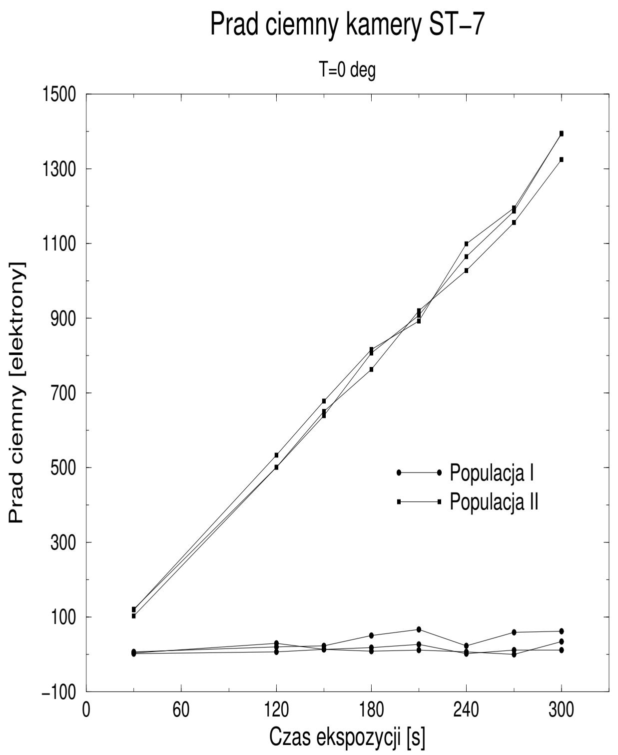
ści pikseli na wykresie zostały uśrednione w kwadratach o wielkości 10×10 pikseli (dlatego też rzeczywiste rozmiary klatki — 510×765 — zostały zredukowane do rozmiaru 51×76). Widoczna pochyłość płaszczyzny wynika ze sposobu odczytu ładunku poszczególnych pikseli przez elektronikę kamery. Rząd rejestru odczytującego kolumny klatki jest równoległy do osi Y (na rysunku 3.4 znajdowałby się on między punktem $X = -1$, $Y = 0$, i punktem $X = -1$, $Y = 76$). Poszczególne wiersze równoległe do osi Y są odczytywane przez wiersz rejestru, a następnie przesyłane na wzmacniacz wyjściowy, w kierunku malejących wartości Y. Zatem ładunki, które trafiły na lewy koniec rzędu rejestru muszą przebyć całą długość rejestru, co powoduje nagromadzenie dodatkowego ładunku i tłumaczy wyraźną różnicę nachylenia płaszczyzny offsetu na rysunku, między lewą a prawą krawędzią (równoległą do osi X). Rysunek ukazuje także istnienie dużej niejednorodności offsetu (poszarpanie powierzchni).



Rysunek 3.7: Zależność prądu ciemnego od temperatury. Na osi X zaznaczono temperaturę w °C a na osi Y wartość prądu ciemnego w elektronach. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie prąd ciemny (co ok. 7° C wartość prądu ciemnego podwaja się). Na wykresie dokonano podziału na populacje. Jak widać najszybciej rośnie prąd ciemny w gorących pikselach.

3.3.2 Podział pikseli na określone wartości ADU

Analizy dokonano w oparciu o histogramy klatek ciemnych, wykonane na podstawie zdjęć zrobionych w Obserwatorium Astronomicznym w Borówcu (przykład na rys. 3.5 i 3.6). Histogramy przedstawiają zależność ilości pikseli od ich wartości wyrażonych w jednostkach ADU. Widać na nich wyraźnie, że można je podzielić na trzy populacje. Populacja I (pierwsze od lewej wzniesienie) ma niewielkie ADU i dotyczy ok. 94% wszystkich pikseli, natomiast II ma prawie dwukrotnie większe ADU ale obejmuje tylko ok. 3,3% pikseli. Na trzecie wzniesienie składają się tzw. gorące piksele (obdarzone nadzwyczaj dużym ładunkiem w stosunku do pozostałych). Stosunek odległości pomiędzy tymi populacjami jest zachowany także dla histogramów wykonanych w innych temperaturach, przy czym w miarę jej spadku, populacje mają tendencje do przesuwania się w stronę mniejszego ADU (rys. 3.6). Histogramy



Rysunek 3.8: Zależność prądu ciemnego (w elektronach — oś Y) od czasu ekspozycji (w sekundach — oś X) dla populacji I (dolna prosta) i II (górna prosta). Pomiary wykonane w temperaturze $T = 0°$ C i czasie ekspozycji od 30 do 300 s. Widoczny jest wzrost prądu ciemnego przy wydłużaniu czasu naświetlania. W przypadku przedłużenia prostych ich przecięcie z osią Y wypadłoby na poziomie 0 e^{-}.

wykonano przy użyciu specjalnie do tego celu napisanego programu w języku „C".

3.3.3 Zależność prądu ciemnego kamery od temperatury

Badanie zrobiono w oparciu o klatki ciemne wykonane przy stałym czasie ekspozycji wynoszącym 300 s, dla temperatur od $-20°$ C do $0°$ C. Ze wszystkich klatek usunięto offset aby jedynym pozostałym sygnałem był prąd ciemny. Dla populacji I, II i gorących pikseli wybrano po trzy reprezentatywne piksele (o ściśle określonych współrzędnych), których wartości dla różnych temperatur zaznaczono na wykresie, otrzymując kilka krzywych (rys. 3.7). Na wykresie widać, że prąd ciemny w pikselach populacji II i gorących wykazuje wykładniczy wzrost wraz z podwyższaniem temperatury, przy czym wzrost ten jest znacznie szybszy dla gorących pikseli. Najsłabiej zależność tą widać dla populacji I, ponieważ w każdym przypadku jej wartość była bardzo mała, trudno mierzalna i zaszumiona.

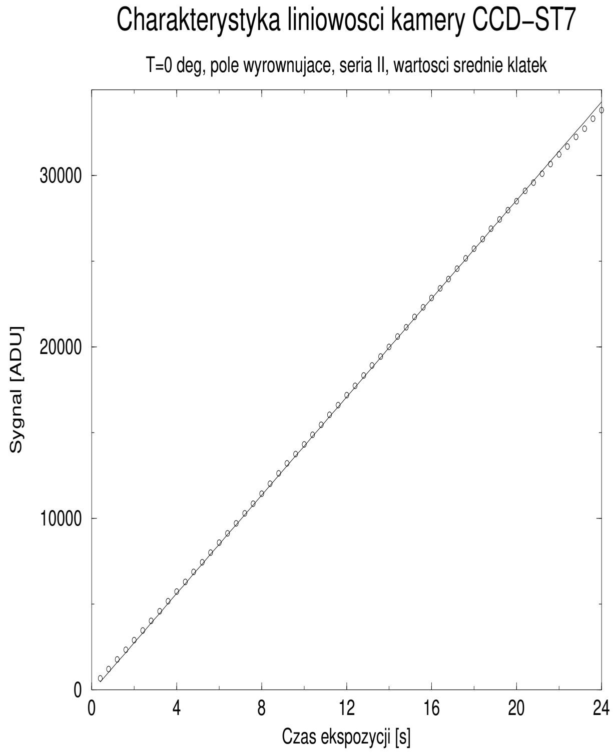
Ostatecznie oszacowano, że w przypadku badanej kamery prąd ciemny rośnie dwukrotnie co ok. 7° C. Z powyższego badania wynika także, że aby zminimalizować ten negatywny czynnik powinno się robić ekspozycje w możliwie najniższej temperaturze.

3.3.4 Zależność prądu ciemnego kamery od czasu ekspozycji

Do testu wykorzystano osiem klatek ciemnych wykonanych w temperaturze chipa wynoszącej 0° C, o czasie ekspozycji od 30 do 300 s. Z każdej z nich usunięto offset. Dla populacji I i II wybrano po trzy reprezentatywne piksele (o ściśle określonych współrzędnych), dla których zmierzono wartość prądu ciemnego w zależności od czasu ekspozycji. Wyniki zamieszczono na wykresie 3.8. Punkty pomiarowe połączono liniami w celu lepszej wizualizacji. Wykres przedstawia wzrost prądu ciemnego wraz ze wzrostem czasu ekspozycji. Dla populacji II wzrost ten jest prawie liniowy, natomiast dla populacji I jest on słabo widoczny z takich samych powodów co w poprzednim badaniu. Należy zwrócić uwagę, że gdyby przedłużono wszystkie proste, to zbiegły by się one na osi Y na wysokości $0e^-$.

3.3.5 Charakterystyka liniowości kamery

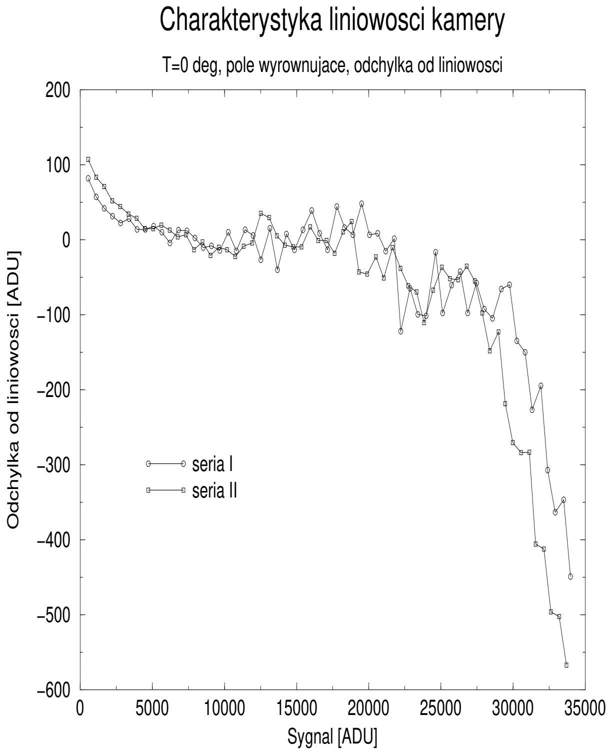
Celem badania było sprawdzenie czy wraz ze wzrostem czasu naświetlania sygnał rejestrowany przez kamerę rośnie w sposób liniowy. Pomiarów dokonano w Stacji Obserwacyjnej w Borówcu 25 stycznia 1999. Kamera została zamontowana na teleskopie skierowanym na czerwoną diodę LCD, zasilaną stabilizowanym prądem o natężeniu 20 mA. Ekspozycje, którymi były pola wyrównujące wykonywano utrzymując stałą temperaturę detektora wynoszącą $T = 0°$ C. Ogółem wykonano 120 pól wyrównujących w dwóch seriach, każda po 60 sztuk. Czas ekspozycji wynosił od $0,4$ s do $24,0$ s, z krokiem co $0,4$ s. Serie wykonano w 1 godzinnym odstępie. Do badania wykorzystano wartości średnie klatek, od których odjęto 100 ADU dodawane przez oprogramowanie. Zebrane wartości przedstawiono na wykresie jako zależność sygnału od czasu ekspozycji (rys. 3.9). Do otrzymanych punktów dopasowano idealną prostą wyznaczoną na podstawie parametrów 21 punktów pomiarowych z przedziału od 4 s do 12 s przyjętych za rosnące liniowo (rys. 3.9).



Rysunek 3.9: Charakterystyka liniowości kamery. Do punktów pomiarowych dopasowano prostą wyznaczającą idealną, liniową zależność pomiędzy sygnałem a czasem ekspozycji. Jak widać większość punktów leży na prostej. Znacząca odchyłka jest widoczna powyżej wartości 30 tys. ADU.

Zdecydowana większość punktów leży na prostej, choć nie zawsze centralnie. Widoczna odchyłka od liniowości występuje powyżej wartości 30 tys. ADU i w miarę jej wzrostu coraz bardziej się zwiększa. Jest to związane z faktem, iż każdy piksel ma określoną pojemność i może zgromadzić tylko pewną liczbę elektronów; w przypadku ich nadmiaru część ładunku „rozlewa" się na sąsiednie piksele.

Na rysunku 3.10 umieszczono dwie krzywe ukazujące odchyłkę od wyliczonej wcześniej prostej. W idealnym przypadku liniowego wzrostu wartości średniej klatki i czasu, krzywe byłyby liniami prostymi biegnącymi wzdłuż poziomej linii o wartości $Y = 0$. Pierwsze odchylenie z przedziału 0 a 2 s wynika z czasu działania przesłony w kamerze, która nie zamyka się natychmiast ale potrzebuje na to czasu. Przy tak krótkiej ekspozycji może to stanowić duży procent całkowitej ekspozycji, wpływając na ilość zebranego ładunku. Natomiast końcowy, coraz bardziej raptowny spadek związany jest z

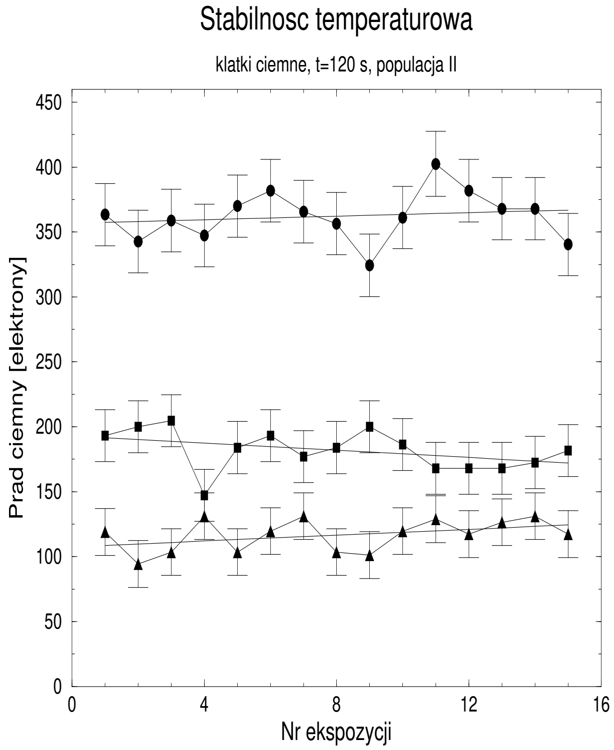


Rysunek 3.10: Odchyłka od liniowości dla dwóch serii pomiarowych. Na osi poziomej zaznaczono wartości poszczególnych klatek a na osi pionowej wartość odchylenia od idealnego liniowego wzrostu. Zależność jest najbardziej liniowa pomiędzy 5 tys. a 28 tys. ADU. Później następuje widoczne odchylenie od poziomu.

przepełnieniem studni potencjału. Można także zauważyć, że pomimo ogólnie takiego samego przebiegu obu krzywych, każda z nich ma własne wahania. Odchyłka od liniowości w skrajnym przypadku dla ok. 33000 ADU wynosi: dla serii I=1,32%; dla serii II=1,68%. W obszarach gdzie zależność jest wyraźnie liniowa, odchyłka nie przekracza nigdy 1%.

3.3.6 Maksymalny, bezpieczny stopień schładzania kamery

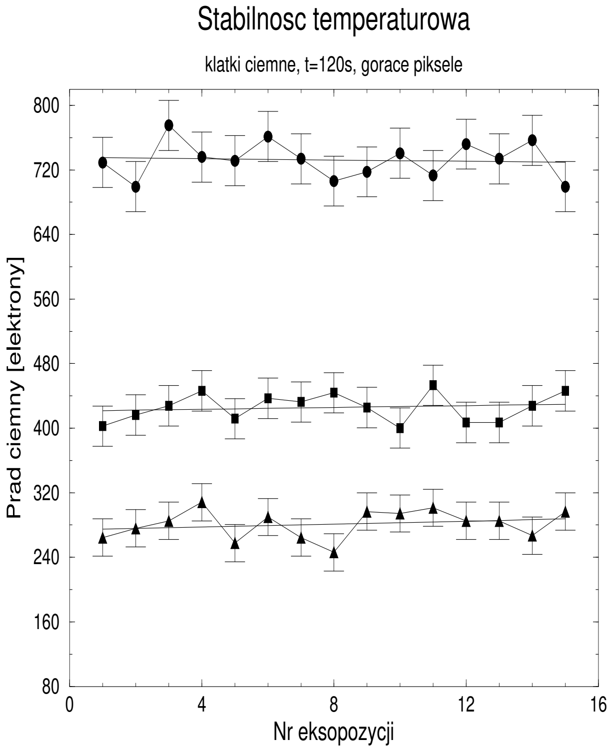
Celem badania było sprawdzenie do jak niskiej temperatury względem otoczenia można schłodzić chip CCD aby kamera nie miała problemu z utrzymaniem zadanej temperatury a ewentualne jej wahania nie wpływały na wykonywane klatki. Ponieważ z temperaturą związany jest prąd ciemny, który



Rysunek 3.11: Wykres przedstawia wahania prądu ciemnego (oś Y) występujące pomiędzy kolejnymi, wykonanymi tuż po sobie klatkami ciemnymi (oś X) o czasie 120 s każda. Każdy punkt odpowiada wartości prądu ciemnego w pojedynczym pikselu populacji II. Pionowe słupki oznaczają niepewności pomiarowe. Poziome proste wyznaczają wartości średnie. Krzywe dotyczą klatek wykonanych w temperaturze (od góry): 20°C, 25°C, 30°C poniżej temperatury otoczenia.

jest zbędną wadą (podrozdz. 3.0.2), obniżając ją zmniejsza się jednocześnie prąd ciemny i polepsza jakość ekspozycji.

Badania wykonano w temperaturze otoczenia $T_{ot_1} \approx +10°C$ oraz $T_{ot_2} \approx +16,5°C$. Chip CCD był schładzany o 20°C, 25°C i 30°C poniżej aktualnej temperatury otoczenia. Średnia moc chłodzenia kamery wynosiła odpowiednio: 50%, 66%, 84% (w pierwszym przypadku) oraz 54%, 74%, 96% (w drugim). W każdej z powyższych temperatur wykonano jednym ciągiem po 15 klatek ciemnych, każda o czasie ekspozycji $t = 120$ s, co dawało ok. 33 minuty pracy kamery w danej temperaturze. Każdą serię klatek rozpoczynano po ustabilizowaniu się zadanej temperatury, co trwało ok. 10 minut. W czasie



Rysunek 3.12: Wykres przedstawia wahania prądu ciemnego (oś Y) występujące pomiędzy kolejnymi, wykonanymi tuż po sobie klatkami ciemnymi (oś X) o czasie 120 s każda. Każdy punkt odpowiada wartości prądu ciemnego w pojedynczym gorącym pikselu (populacja III). Pionowe słupki oznaczają niepewności pomiarowe. Poziome proste wyznaczają wartości średnie. Krzywe dotyczą klatek wykonanych w temperaturze (od góry): 20°C, 25°C, 30°C poniżej temperatury otoczenia.

wykonywania ekspozycji występowały drobne wahania temperatury, których maksymalna amplituda wynosiła $0,44$°C.

Aby stwierdzić czy klatki różnią się między sobą, usunięto z nich offset a następnie zbadano wartość prądu ciemnego w wybranym, pojedynczym pikselu na każdej klatce. Pomiarami objęto piksele populacji II oraz gorące piksele. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów (rys. 3.11 i 3.12). W idealnym przypadku wartość prądu ciemnego nie powinna się zmieniać. W rzeczywistości obserwuje się jego nieznaczne wahania wokół pewnej średniej wartości, które związane są z niewielką niestabilnością temperaturową ($0,44$°C) i występowaniem szumów. Na wyznaczone niepewności pomiarowe składają się wyliczone teoretycznie: szum odczytu ($15e^{-}$) oraz szum prądu ciemnego. Niepewności pomiarowe oznaczono na wykresach pionowymi kreskami. Jak widać tylko pojedyncze punkty odbiegają od średniej w sposób znaczący. Biorąc pod uwagę powyższe fakty można wnioskować, że odchyłki punktów od prostej mieszczą się w ramach przyjętych niepewności pomiarowych. To oznacza, że kamera CCD-ST7 potrafi utrzymać zadaną temperaturę z dokładnością, która zapewnia wykonywanie klatek w temperaturze 20°C, 25°C i 30°C poniżej temperatury otoczenia. Prawdopodobnie osiągnięcie jeszcze niższych temperatur mogłoby być kłopotliwe, ponieważ badanie przy $T_{otocz.} = +15°\mathrm{C}$ i $T_{chipa} = -15°\mathrm{C}$, wymagało od kamery 96% mocy chłodzenia. Interesujące jest, że przy tej samej różnicy temperatur ale $T_{otocz.} = +10°C$ kamera potrzebowała tylko 84% mocy chłodzenia. Może to oznaczać, że chłodzenie chipa jest znacznie prostsze w zimniejszym otoczeniu.

Wniosek końcowy: kamerę CCD-ST7 można schładzać do 30°C poniżej temperatury otoczenia.

3.3.7 Wpływ migawki na ekspozycje

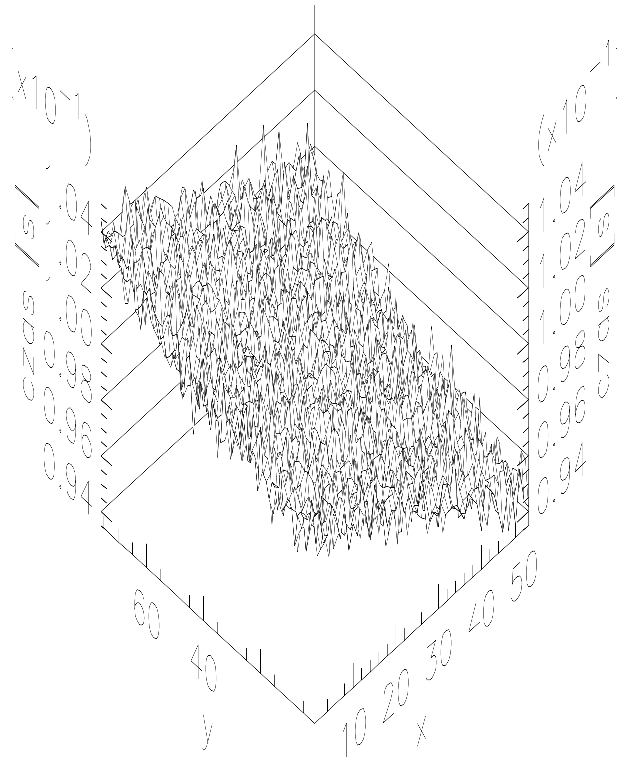
Celem doświadczenia było sprawdzenie czy czas potrzebny na otwarcie i zamknięcie się migawki w kamerze CCD ma istotny wpływ na bardzo krótkie ekspozycje (producent nie podaje jaki to jest czas). To czy migawka będzie miała duży lub mały wpływ na ekspozycje, zależy od czasu ich trwania. Dlatego najlepszym testem jest wykonanie klatek o różnych czasach ekspozycji.

Do badania użyto uśrednionych klatek pól wyrównujących (z których usunięto offset i prąd ciemny) o czasach ekspozycji $0,11$ s i $1,1$ s. Zamieniono je następnie na macierze liczb i przeprowadzono obliczenia pozwalające znaleźć $\delta(x,y)$, która jest dodatkowym czasem, potrzebnym na zakrycie obszaru detektora o współrzędnych (x,y) przez migawkę (jest on zawsze taki sam, niezależnie od czasu ekspozycji):

$$\begin{aligned} r(x,y) &= \frac{10 \times [t_1 + \delta(x,y)]}{t_2 + \delta(x,y)}, \\ \delta(x,y) &= \frac{10 \times [r(x,y) - 1]}{10 - r(x,y)}. \end{aligned} \tag{3.7}$$

Gdzie t_1 i t_2 odpowiada ekzpozycjom różniącym się 10-cio krotnie czasem a $r(x,y)$ jest współczynnikiem naświetlenia każdego piksela.

Rezultatem powyższych operacji matematycznych jest macierz przedstawiona na rysunku 3.13. Osie x, y oznaczają współrzędne punktów na klatce, oś pionowa oznacza czas, przez jaki dany obszar jest naświetlany dłużej niż wynikałoby to z zadanego czasu ekspozycji. Widoczne są wahania wszystkich



Rysunek 3.13: Wpływ migawki na ekspozycje. Osie x, y określają współrzędne punktów na klatce (1 punkt na wykresie to obszar 10×10 pikseli w rzeczywistości). Oś pionowa oznacza czas przez jaki dany obszar jest naświetlany dłużej, niż wynikałoby to z zadanego czasu ekspozycji. Widoczny jest szum fotonowy.

punktów wokół ukośnie opadającej płaszczyzny. Jest to tzw. szum fotonowy, którym rządzi statystyka Poissona.

Z wykresu widać, że cała klatka jest eksponowana o ok. $0,094$ s dłużej (od zadanego czasu) a dodatkowo prawy narożnik jest naświetlany o ok. $0,01$ s dłużej niż przeciwległy. Jeżeli powyższe pomiary są prawdziwe, oznacza to, że mamy do czynienia z dwoma negatywnymi czynnikami: wydłużeniem całej ekspozycji o ok. $0,094$ s oraz niewielkim, nierównomiernym naświetleniem powierzchni chipa. Przykładowo dla 1 s ekspozycji oznacza to, że cała klatka jest naświetlana o $\approx 9,4\%$ dłużej na jednej krawędzi do $\approx 10,4\%$ na drugiej (czyli skrajna różnica wynosi 1%). Przy krótszych ekspozycjach efekt ten będzie się nasilał, wzrastając 10-cio krotnie przy $0,11$ s (jest to najkrótsza możliwa ekspozycja w kamerze ST-7).

3.4 Badanie klatek korekcyjnych

Niniejszy rozdział zawiera wyniki badań, których celem było sprawdzenie czy klatki offsetowe, ciemne i wyrównujące zachowują się stabilnie w różnych przedziałach czasowych, tzn. czy i w jakiej skali zmieniają się ich parametry oraz przez jaki okres czasu od chwili wykonania można używać danej klatki. Praktycznym zastosowaniem byłoby używanie np. klatki korekcyjnej przez kilka nocy z rzędu, co pozwoliłoby na znaczną oszczędność czasu.

Uwagi ogólne dotyczące badań stabilności:

Rozmiar wszystkich badanych klatek to 765×510 pikseli. Współrzędne badanych obszarów (x,y): $A = 100, 100$; $B = 665, 100$; $C = 100, 410$; $D = 665, 410$. Od każdej wartości sygnału odjęto 100 ADU dodawane przez oprogramowanie kamery i traktowane przez nie jako próg zerowy.

3.4.1 Stabilność klatek offsetowych

Rezultaty przedstawiono w postaci tabel, w których drugi i trzeci wiersz zawiera wyniki pomiarów z klatek offsetowych a ostatni jest rezultatem odjęcia jednej klatki od drugiej. Gdyby badane klatki były dokładnie takie same to wartość średnia sygnału w ostatnim wierszu powinna być równa 0 ADU lub najwyżej nieznacznie od niej odbiegać. Im większe jest odchylenie od tej wartości, tym większe są rzeczywiste różnice pomiędzy klatkami.

Z przeprowadzonych porównań wynika, że im dłuższy jest odstęp czasowy pomiędzy klatkami z danej serii tym bardziej różnią się one między sobą. Ukazuje to zwiększająca się wartość średnia całej klatki (będąca rezultatem odjęcia od siebie dwóch klatek). Należy jednak zwrócić uwagę, że wartość ta jest zawsze znacznie mniejsza od szumu a więc w rzeczywistości może się trochę różnić od podanej w tabeli. Na tej podstawie można sądzić, że klatki odjęły się od siebie dokładnie, ponieważ były do siebie bardzo podobne.

Z obserwacji innych klatek wynika, że różnice w wartościach pomiędzy klatkami offsetowymi wykonywanymi tuż po sobie (np. w odstępach kilku sekund) są czasami nieco większe od powyższych.

Podsumowując: klatki offsetowe zachowują się stabilnie w powyższych przedziałach czasowych.

3.4.2 Stabilność klatek ciemnych

Poza przyjętą wyżej procedurą badań, dodatkowo dla wszystkich klatek będących rezultatem odjęcia jednej klatki od drugiej wykonano histogramy. Na każdym wykresie największą liczbę stanowią piksele o wartości 100 ADU oraz bliskie tej wartości (należy pamiętać, że 100 ADU jest wartością sztucznie

Tablica 3.1: Stabilność klatek offsetowych. Seria 1.

Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
$-5°$C $0,11$ s 98.09.22 18:31	A= 2,5 (1,6) B=12,0 (1,5) C= 3,4 (1,5) D=13,0 (1,7)	7,70 (4,11)	Klatka uśredniona z 9 ekspozycji
$-5°$C $0,11$ s 98.09.23 2:59	A= 3,0 (1,5) B=12,7 (1,6) C= 3,9 (1,6) D=13,8 (1,8)	8,34 (4,21)	Klatka uśredniona z 9 ekspozycji
Różnica: 9 godzin	A= 0,4 (2,0) B= 0,7 (2,1) C= 0,5 (2,1) D= 0,7 (2,2)	0,65 (2,13)	Rezultat odjęcia pierwszej klatki od drugiej

Tablica 3.2: Stabilność klatek offsetowych. Seria 2.

Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
0°C $0,11$ s 98.09.26 00:20	A= 2,2 (2,1) B=15,6 (2,2) C= 3,7 (2,2) D=17,4 (2,4)	9,73 (5,80)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
0°C $0,11$ s 98.09.27 3:38	A= 3,3 (2,1) B=16,7 (2,2) C= 4,8 (2,2) D=18,3 (2,4)	10,85 (5,80)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
Różnica: 27 godzin	A= 1,1 (2,6) B= 1,1 (3,0) C= 1,2 (2,8) D= 1,0 (2,9)	1,12 (2,88)	Rezultat odjęcia pierwszej klatki od drugiej

dodawaną przez oprogramowanie kamery i traktowaną przez nie jako punkt zerowy). Oznacza to, że po odjęciu od siebie klatek uzyskano piksele o prawie

Tablica 3.3: Stabilność klatek offsetowych. Seria 3.

Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
$-5°$C $0,11$ s 98.09.23 2:59	A= 2,6 (1,9) B=12,3 (2,0) C= 3,4 (2,0) D=13,4 (2,2)	7,96 (4,38)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
$-5°$C $0,11$ s 98.09.25 4:42	A= 1,3 (1,8) B=10,8 (2,0) C= 2,0 (2,0) D=11,8 (2,2)	6,38 (4,33)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
Różnica: 49 godzin	A= 1,3 (2,5) B= 1,5 (2,8) C= 1,5 (2,7) D= 1,6 (2,8)	1,58 (2,74)	Rezultat odjęcia drugiej klatki od pierwszej

zerowej wartości. Liczba pikseli o wartości znacznie większej niż 100 ADU nigdy nie przekracza kilku sztuk na daną wartość. Na histogramach ujawniają się także gorące piksele, które nie zredukowały się w wyniku odejmowania. Wskazują one na niepowtarzalność każdej klatki. Istotne jest, że ich liczba w najgorszym przypadku nie przekracza kilkudziesięciu o wartości powyżej 300 ADU (rys.3.14) a w najlepszym są tylko dwa (rys.3.15).

Podobnie jak w przypadku klatek offsetowych, można zauważyć, że w miarę zwiększania odstępu czasowego pomiędzy wykonanymi klatkami, zaczynają się one coraz bardziej od siebie różnić. Zwiększa się wartość średnia całej klatki będąca rezultatem odjęcia od siebie dwóch klatek. Istotne jest, że w każdym przypadku szum znacznie przekracza wartość sygnału. Fakty te sugerują, że w powyższych przedziałach czasowych klatki są stabilne tym bardziej, im mniejszy jest odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi ekspozycjami.

Analiza histogramów (rys. 3.14 i 3.15) pokazała, że rozkład i wartości pikseli populacji pierwszej i drugiej na porównywanych klatkach jest taki sam, a wartości pozostałe w wyniku odejmowania oscylują wokół wartości zerowej (100 ADU). Jedyny kłopot stanowią gorące piksele, których od kilku do kilkudziesięciu zawsze pozostaje dając dowód na to, że występują one w różnych nie powtarzających się miejscach. Jest to jedyny powód, dla którego klatek ciemnych nie można traktować jako całkowicie stabilnych. Jeżeli w trakcie poprawiania zdjęć istnieje potrzeba usunięcia gorących pikseli, należy

Tablica 3.4: Stabilność klatek ciemnych. Seria 1.

Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
-5°C 300 s 98.09.22 18:41	A=33,6 (124,4) B=50,2 (161,2) C=39,9 (131,2) D=59,7 (395,8)	41,75 (140,43)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
-5°C 300 s 98.09.24 4:44	A=33,7 (124,1) B=50,3 (161,2) C=40,3 (131,3) D=59,8 (396,4)	41,95 (141,41)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
Różnica: 34 godziny	A= 0,2 (3,4) B= 0,1 (3,6) C= 0,4 (3,4) D= 0,3 (4,8)	0,26 (11,58)	Rezultat odjęcia pierwszej klatki od drugiej

Tablica 3.5: Stabilność klatek ciemnych. Seria 2.

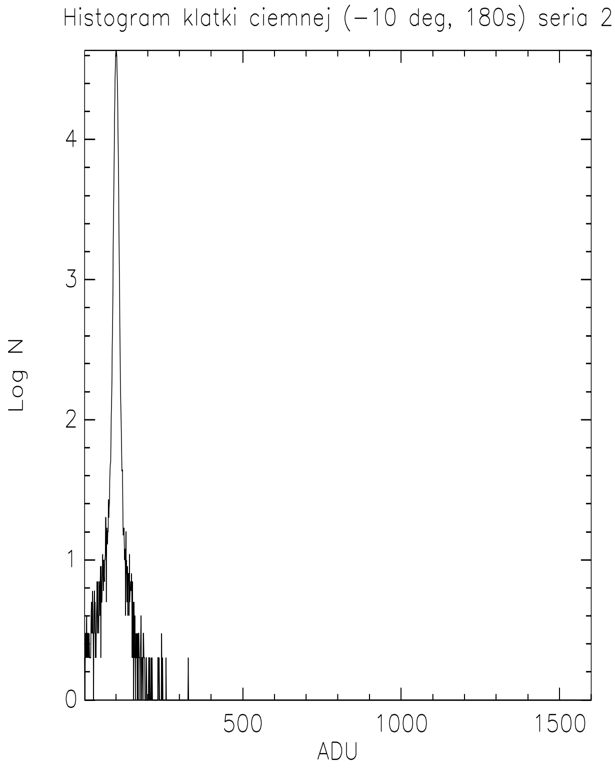
Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
-10°C 180 s 98.10.19 22:51	A=13,4 (46,9) B=23,5 (65,2) C=15,8 (49,2) D=28,5 (187,7)	18,37 (66,41)	Klatka uśredniona z 3 ekspozycji
-10°C 180 s 98.10.27 1:29	A=12,9 (47,4) B=22,8 (64,4) C=15,6 (49,3) D=28,1 (187,0)	17,95 (66,53)	Klatka uśredniona z 3 ekspozycji
Różnica: 7 dni	A= 0,5 (4,1) B= 0,7 (3,8) C= 0,2 (3,8) D= 0,4 (4,2)	0,43 (8,82)	Rezultat odjęcia drugiej klatki od pierwszej

Tablica 3.6: Stabilność klatek ciemnych. Seria 3.

Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
$-10°$C 180 s 98.10.27 1:29	A=12,9 (47,4) B=22,8 (64,4) C=15,5 (49,2) D=28,2 (187,1)	17,98 (67,71)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
$-10°$C 180 s 98.11.04 20:16	A=12,4 (47,0) B=22,3 (64,8) C=15,0 (48,9) D=27,6 (187,3)	17,45 (66,41)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
Różnica: 9 dni	A= 0,5 (3,6) B= 0,5 (3,8) C= 0,5 (3,7) D= 0,5 (3,2)	0,56 (11,21)	Rezultat odjęcia drugiej klatki od pierwszej

Tablica 3.7: Stabilność klatek ciemnych. Seria 4.

Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
$-10°$C 180 s 98.11.04 20:16	A=12,4 (47,0) B=22,3 (64,8) C=15,0 (48,9) D=27,6 (187,3)	17,45 (66,41)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
$-10°$C 180 s 98.12.29 18:28	A=12,8 (47,5) B=23,4 (65,4) C=15,3 (49,5) D=28,2 (187,1)	18,02 (67,29)	Klatka uśredniona z 5 ekspozycji
Różnica: 55 dni	A= 0,4 (4,4) B= 1,1 (3,6) C= 0,3 (4,1) D= 0,5 (3,2)	0,61 (8,19)	Rezultat odjęcia pierwszej klatki od drugiej



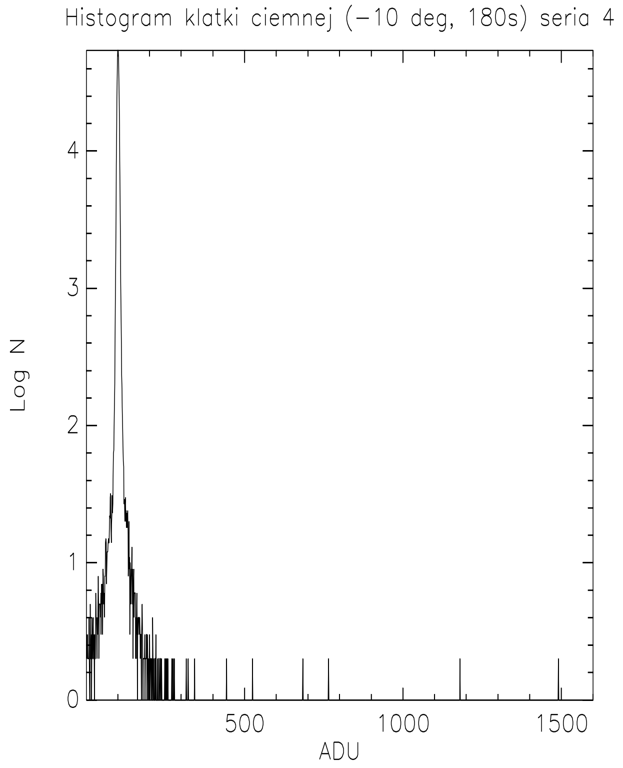
Rysunek 3.14: Histogram będący rezultatem odjęcia jednej klatki ciemnej od drugiej. Przypadek najlepszy: niewielka ilość gorących pikseli, wartości oscylują wokół 100 ADU. Klatki odjęły się bardzo dobrze co oznacza, że były do siebie bardzo podobne.

użyć klatek ciemnych wykonanych możliwie najkrócej po lub przed zdjęciem właściwym. W pozostałych przypadkach można je traktować jako stabilne.

3.4.3 Stabilność klatek wyrównujących

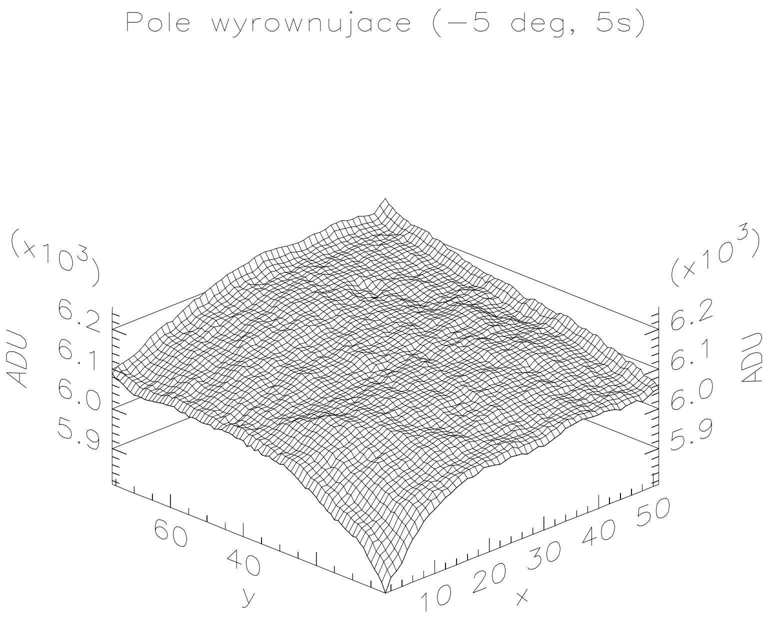
Do badań użyto klatek od których wcześniej odjęto klatkę ciemną. Pomiarów dokonano dla następujących klatek wyrównujących:

- seria 1: wykonanych w odstępie czasowym 11 godzin; uśrednionych z 5 ekspozycji każda; temperatura chipa $T = -5°\mathrm{C}$; czas $t = 2$ s
- seria 2: wykonanych w odstępie czasowym 24 godzin; uśrednionych z 10 ekspozycji każda; temperatura chipa $T = -5°\mathrm{C}$; czas $t = 5$ s



Rysunek 3.15: Histogram będący rezultatem odjęcia jednej klatki ciemnej od drugiej. Przypadek gorszy: kilka gorących pikseli o dużych wartościach, reszta gromadzi się przy 100 ADU. Większość pikseli odjęła się od siebie bardzo dobrze ale zostało kilka „niepowtarzalnych" gorących pikseli.

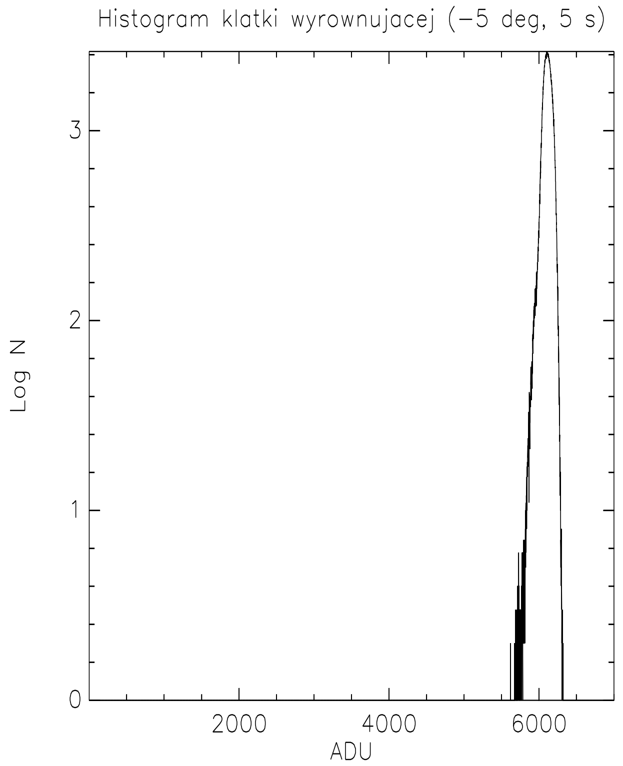
Badania stabilności przeprowadzono wykonując operację dzielenia jednej klatki wyrównującej przez drugą (przy użyciu programu „CCDOPS 3.66" . Ponieważ klatka wyrównująca jast przedstawieniem względnej czułości każdego piksela w detektorze, tworzy ona strukturę zawierającą wzniesienia i doły, będące odzwierciedleniem ilości zebranego przez poszczególne piksele sygnału (rys. 3.16). Takie nieregularności są spowodowane różną czułością pikseli, zabrudzeniami na szkłach i filtrach oraz efektem winietowania. Ponieważ korekcja przy użyciu pola wyrównującego służy właśnie zlikwidowaniu owych nieregularności, to jeśli wykona się ją na samej klatce wyrównującej, powinno się otrzymać (w idealnym przypadku) jednolitą, płaską powierzchnię. Taka metoda została zastosowana w niniejszym badaniu. Ponieważ tego typu korekcja od strony matematycznej polega na dzieleniu, jedną klatkę wyrównującą podzielono przez drugą, wykonaną w określonym odstępie czasowym (11 i 24 godzin). Dla wszystkich klatek przed i po korekcji wykonano



Rysunek 3.16: Trójwymiarowa prezentacja typowej, uśrednionej klatki wyrównującej użytej do badań (czas ekspozycji $t = 5$ s, temperatura detektora $T = -5°$C). Osie X, Y definiują współrzędne punktów na klatce (jeden punkt na wykresie to 10×10 pikseli w rzeczywistości). Oś pionowa oznacza wartość sygnału. Widać, że sygnał zebrany przez poszczególne piksele jest różny. Oprócz zasadniczej pochyłości widoczne są także lokalne wzniesienia i „doły".

histogramy (rys. 3.17 i 3.18). Na rysunku 3.17 wartości pikseli gromadzą się wokół 6000 ADU, a ich rozrzut wynosi około 560 ADU (co stanowi niecałe 10% ich średniej wartości). Rysunek 3.18 dotyczy klatki na której przeprowadzono już operację dzielenia. Tym razem wartości pikseli są mniejsze niż 6000 ADU a ich rozrzut zmniejszył się do około 200 ADU co oznacza, że mają one prawie tą samą wartość a więc powierzchnia którą tworzą będzie bardzo pozioma i równomierna. Fakt, że jakikolwiek rozrzut w ogóle pozostał, związany jest z szumem fotonowym istniejącym w każdym sygnale (wysyłane przez źródło światła fotony mają rozkład Poissona). Oznacza to, że wszelkie nieregularności na dwóch różnych klatkach w większości pokrywały się ze sobą i w rezultacie wzajemnie się zredukowały. Potwierdzają to również pomiary numeryczne w wybranych punktach.

Wypływa stąd wniosek, że badane klatki zachowują się stabilnie w przedziałach czasowych 11 i 24 godzin, pod warunkiem, że nie wykonuje się żadnych zmian pomiędzy kamerą CCD a systemem optycznym. Jeżeli w międzyczasie dokona się wymiany filtrów lub jakichkolwiek regulacji sprzętu będzie to miało wpływ na rozkład ilości światła docierającego do poszczególnych pikseli detektora a więc zmusi do wykonania nowej klatki wyrównującej (rozdział 3.2.3).

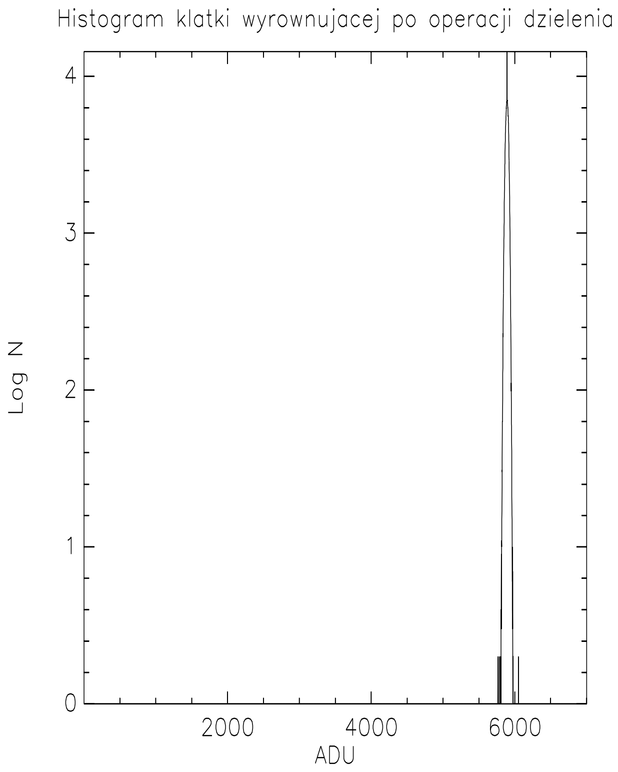


Rysunek 3.17: Histogram klatki wyrównującej z rysunku 3.16. Piksele gromadzą się wokół wartości 6000 ADU, ale ich rozrzut wynosi ok. 560 ADU. Na lewym zboczu wykresu będą się znajdowały punkty, które zarejestrowały mniejszy sygnał niż punkty z prawego zbocza. Może to być spowodowane np. mniejszą czułością pikseli w tych miejscach lub lokalnymi zabrudzeniami.

3.4.4 Klatki ciemne w charakterze klatek offsetowych

Ponieważ nie wszystkie kamery potrafią robić klatki offsetowe w sposób bezpośredni, przeprowadzono badanie, które miało na celu sprawdzenie i porównanie innych metod otrzymywania takich klatek.

Pierwsza metoda polega na wykonaniu możliwie najkrótszej ekspozycji przy zamkniętej migawce (w przypadku kamery ST-7 jest to $0,11$ s) a druga na użyciu klatek ciemnych i przeprowadzeniu na nich określonych operacji



Rysunek 3.18: Histogram klatki wyrównującej po wykonaniu operacji dzielenia przy użyciu klatki wykonanej 24 godziny później. Porównując go z rys. 3.17 widać, że rozrzut wartości pikseli znacznie się zmniejszył. Oznacza to, że korekcja przyniosła pozytywny rezultat, redukując w znacznym stopniu wcześniejsze nieregularności.

matematycznych. Sposób wykonania takich klatek opisano w podrozdziale 3.2.1.

W tabeli 3.8 i 3.9 przedstawiono porównania klatek offsetowych wykonanych obydwoma sposobami. Porównywane klatki wykonano w ciągu jednej nocy. Obliczono różnice procentowe pomiędzy wartościami średnimi klatek i otrzymano: dla serii 1 — klatka druga ma wartość o $32,54\%$ większą, a dla serii 2 — o $0,70\%$ większą.

Sygnał porównywanych klatek różni się między sobą w niewielkim stopniu. Klatki wykonane z klatek ciemnych mają zawsze trochę większą wartość sygnału i aż dwukrotnie większe szumy. Źródło tak wysokich szumów pochodzi z klatek ciemnych (szczególnie tych o długich ekspozycjach – por. ostatni wiersz tabeli 3.9) oraz dodatkowo z przeprowadzonych operacji matematycznych. Wynika stąd, że w metodzie tej lepiej stosować krótkie czasy

Tablica 3.8: Porównanie klatek offsetowych. Seria 1.

Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
$-5°$C 0,11 s 98.09.25	A= 1,3 (1,8) B=10,4 (2,0) C= 1,9 (2,0) D=11,7 (2,0)	6,33 (4,30)	Klatka offsetowa uśredniona z 5 ekspozycji 0,11 s, przy zamkniętej migawce
$-5°$C 98.09.25	A= 3,2 (4,1) B=12,4 (4,2) C= 4,3 (4,1) D=13,7 (4,5)	8,39 (5,63)	Klatka offsetowa wykonana z 2 klatek ciemnych, (1 s i 2 s), z których każda była uśredniona z 5 ekspozycji

Tablica 3.9: Porównanie klatek offsetowych. Seria 2.

Podstawowe dane o klatce	Wartości średnie sygnału i szumu z obszaru 31x31 pikseli dla 4 narożników [ADU]	Wartość średnia całej klatki i szumu [ADU]	Uwagi
$-10°$C 0,11 s 99.01.18	A= 1,7 (1,8) B= 9,1 (1,7) C= 2,4 (1,7) D= 9,9 (1,8)	5,73 (3,44)	Klatka offsetowa uśredniona z 6 ekspozycji 0,11 s, przy zamkniętej migawce
$-10°$C 99.01.18	A= 1,6 (4,6) B= 9,3 (4,8) C= 2,0 (4,7) D=10,8 (32,3)	5,77 (11,32)	Klatka offsetowa wykonana z 2 klatek ciemnych (150 s i 300 s), z których każda była uśredniona z 6 ekspozycji

naświetlania.

Z badania wynika, że zarówno metoda pierwsza jak i druga daje prawidłowe klatki offsetowe, jednak ze względu na szum znacznie lepsza wydaje się metoda pierwsza.

Rozdział 4

Podsumowanie

Wszystkie badania przedstawione w pracy wykonane były wyłącznie na kamerze CCD ST-7 firmy SBIG. Miały się one przyczynić do ułatwienia i przyspieszenia pracy osób korzystających z tego urządzenia a także polepszenia ich wyników.

W trakcie badań starano się określić:

- charakterystykę kamery ST-7,
- optymalny sposób redukcji klatek CCD uzyskiwanych z kamery ST-7,
- optymalne warunki wykonywania obserwacji kamerą ST-7.

W większości przypadków wyniki były zgodne z oczekiwanymi, choć zdarzały się wyjątki. Dzięki przeprowadzonym badaniom udało się ustalić:

- Zależność prądu ciemnego kamery od temperatury (prąd ciemny rośnie dwukrotnie co ok. 7° C) i od czasu ekspozycji (zależność liniowa).
- Zakres liniowości kamery: do ok. 30 tys. ADU.
- Możliwość chłodzenia kamery do temperatury 30°C poniżej temperatury otoczenia i wykonywania w niej prawidłowych klatek.
- Stabilność klatek offsetowych, ciemnych i pól wyrównujących wynosi co najmniej 24 godz. (należy uważać na gorące piksele).
- Najlepsza metoda wykonywania klatek offsetowych to ekspozycje $0,11$ s przy zamkniętej migawce.

Należy zaznaczyć, że choć część wymienionych wyżej badań była już wcześniej publikowana przez innych (Apogee Instruments Inc), nie oznacza to, że każda kamera ma takie same parametry i możliwości. W związku z tym wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy mają największą wartość dla osób korzystających z omawianego modelu kamery (ST-7), a w szczególności dla tych, którzy używają badanego egzemplarza — czyli dla obserwatorów i studentów Obserwatorium Astronomicznego UAM w Poznaniu.

Bibliografia

Cicco, D. 1996. SBIG's ST-7 CCD Camera. *Sky & Telescope* July 1996, 54–57.

Janesick, J. 1997. CCDS: The Inside Story. *CCD Astronomy* Tom 4, Nr 1, 10–15.

McLean, I. 1997. Electronic Imaging In Astronomy. str. 14-20, 127-156. John Wiley & Sons Ltd in association with Praxis Publishing Ltd

Newberry, M.V. 1995. Recovernig The Signal. *CCD Astronomy* Tom 2, Nr 1, 18–21.

Newberry, M.V. 1995. Dark Frames. *CCD Astronomy* Tom 2, Nr 3, 12–14.

Newberry, M.V. 1996. Pursuing The Ideal Flat Field. *CCD Astronomy* Tom 3, Nr 1, 18–21.

Santa Barbara Instrument Group. Dokumentacja kamery CCD ST-7.

CCD test methods. Dokumentacja techniczna firmy Apogee Instruments Inc, dostępna pod adresem http://www.apogee-ccd.com/ccdu.html