

Maciej RAFAŁOWSKI

PROBLEMY PRZETWARZANIA SYGNAŁU FOTOMETRYCZNEGO NA ELEKTRYCZNY W MATRYCACH CCD

STRESZCZENIE *Wzmocnienie kamery CCD jest to przekształcenie pomiędzy liczbą elektronów („e⁻”) zarejestrowanych przez element CCD oraz liczbą jednostek numerycznych zawartych w obrazie z matrycy. Znajomość tego przekształcenia jest użyteczna dla oceny jakości kamery CCD. W artykule przedstawiono zależności matematyczne do obliczania wzmocnienia, oraz sugestie nt. jego dokładnego pomiaru. Przedstawiono tzw. prostą metodę wyznaczania wzmocnienia jako przykład nadmiernego uproszczenia problemu – z nieprostoliniową relacją ze względu na występowanie efektów nierównomierności czułości powierzchniowej układu kamery z obiektywem i matrycą. Następnie opisano dwie dokładne metody pomiarowe, korygujące skutki wpływu tych efektów na relację sygnał – wariancja dla uzyskania pożądanej, liniowej charakterystyki, co pozwala na dokładne określenie wzmocnienia.*

Słowa kluczowe: *wzmocnienie matrycy CCD, wariancja, czułość powierzchniowa, nierównomierność czułości powierzchniowej, kalibracja, niejednorodność odpowiedzi optycznej – PRNU*

prof. dr inż. hab. Maciej RAFAŁOWSKI
kpomraf@pb.edu.pl:

Politechnika Białostocka
Katedra Promieniowania Optycznego
Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45D

1. WSTĘP

Wzmocnienie kamery CCD jest to przekształcenie pomiędzy liczbą elektronów („e⁻”) zarejestrowanych przez element CCD oraz liczbą jednostek numerycznych zawartych w obrazie z matrycy. Znajomość tego przekształcenia jest użyteczna dla oceny jakości kamery CCD [2]. Ponieważ wielkości ładunku w obrazie CCD mogą być oceniane ilościowo tylko na podstawie jednostek zliczeń („digital counts”), znajomość wzmocnienia pozwala na obliczenia wielkości takich jak szum odczytu oraz pojemność studni potencjału w podstawowych jednostkach liczby elektronów.

Wartość wzmocnienia potrzebna jest przy analizie pewnych typów splotów obrazu takich jak np. wyznaczanie maksimum entropii, ponieważ przetwarzanie danych z matrycy wymaga przekształcenia informacji o stopniach szarości obrazu w jednostki ładunku elektronu. Kalibracja wzmocnienia jest również użyteczna do wykrywania zmian wzmocnienia przy słabych lub mocnych sygnałach, lub też wykrywania nieoczekiwanych źródeł szumu. Poniżej przedstawiono zależności matematyczne do obliczania wzmocnienia, oraz sugestie odnośnie jego dokładnego pomiaru. Uzyskane zależności zawierają wpływy nierównomierności czułości powierzchniowej. O ile nie zostaną one skompensowane co, jak później wykazano, obniża wiarygodność obliczonej wartości wzmocnienia. Rozdział 4 opisuje, zazwyczaj stosowaną, prostą metodę wyznaczania wzmocnienia kamery CCD. Nie kompensuje ona skutków nierównomierności czułości powierzchniowej i może prowadzić do dużych błędów w obliczeniach wzmocnienia. Wady tej metody są uzasadnione matematycznie w rozdz. 5. W rozdziale 6 zaproponowano dwie metody do wyeliminowania problemu wpływów nierównomierności czułości powierzchniowej. Metoda A, usuwająca ww. wpływy poprzez odejmowanie dwóch obrazów na każdym poziomie sygnału wymaga znacznie mniej wysiłku w przetwarzaniu obrazu i jest wyborem preferowanym.

2. PRZEGLĄD PROBLEMÓW, ZWIĄZANYCH ZE WZMOCNIENIEM SYGNAŁU W UKŁADACH CCD

Wartość wzmocnienia ustalona jest przez parametry elektronicznego układu odczytu z płytki chipu CCD. Jest ona wyrażona w jednostkach elektronów na jednostkę numeryczną zliczania.

Np. wzmocnienie $1,8 e^-$ /jednostkę zliczoną (ADU) oznacza, że kamera wytwarza 1 jednostkę numeryczną zliczenia na każde 1,8 zarejestrowanych elektronów. Taka wartość oznacza, że 4/5 czasu pojedynczego zliczenia jest wytwarzana przez 2 elektrony, zaś 1/5 czasu pojedynczego zliczenia jest wytwarzana przez 1 elektron. Liczba ta jest uśrednionym współczynnikiem konwersji, bazującym na zamianie dużej liczby elektronów na dużą liczbę zliczeń. Należy zauważyć, że takie zdefiniowanie "wzmocnienia" ma sens odwrotny, niż w normalnym języku projektantów obwodów, którzy używają tego pojęcia w obliczeniach elektronicznych jako wzrostu liczby jednostek wyjściowych w stosunku do liczby jednostek wejściowych.

Istotne jest podkreślenie faktu, że każdy pomiar wykonany na obrazie z CCD wykorzystuje jednostki liczby zliczeń. Ponieważ jedna kamera może wykorzystywać inne wzmocnienie niż inna kamera, jednostki zliczeń nie umożliwiają bezpośredniego porównywania pomiarów z dwóch kamer. Załóżmy na przykład, że każda z dwóch kamer zarejestrowała 24 elektrony w pewnym pikselu. Jeżeli wzmocnienie pierwszej z nich wynosi 2,0 zaś wzmocnienie drugiej 8,0, ten sam piksel zmierzy 12 zliczeń w obrazie z pierwszej kamery, oraz 3 zliczenia w obrazie z drugiej. Bez znajomości wzmocnienia, porównanie 12 zliczeń z 3 zliczeniami jest bezsensowne.

Przed montażem kamery wzmocnienie jest oszacowane z pewną niepewnością. Jednak, ponieważ rzeczywiste rezystancje zależą od tolerancji elementów składowych, wzmocnienie kamery po montażu może wyraźnie odbiegać od pierwotnie zakładanego. Należy liczyć się z dużym prawdopodobieństwem, że badana kamera wykazuje wzmocnienie wyraźnie inne od deklarowanego przez producenta. Rzeczywiste wzmocnienie może być wyznaczone tylko poprzez wykonanie aktualnego pomiaru w testach kalibracyjnych. Jest to konieczne do przetwarzania obrazów na standardowe dane fotometryczne.

3. PODSTAWY MATEMATYCZNE

Sygnał zarejestrowany przez matrycę CCD oraz jego konwersja z jednostek ładunku elektronu na liczbę zliczeń numerycznych (ADU) może być opisany matematycznie. Wyprowadzenie to wykorzystuje pojęcia sygnału oraz szumu. Sygnał jest zdefiniowany jako ilość informacji, którą można zmierzyć w obrazie – innymi słowy jest to liczba elektronów zarejestrowanych przez CCD lub liczba zliczeń wykazana w obrazie z matrycy CCD.

Szum jest niepewnością sygnału. Ponieważ fotony rejestrowane przez CCD przybywają w pakietach losowo (dzięki statystycznej naturze emisji źródła promieniowania), obserwacja tego samego źródła zapisuje inną liczbę elektronów za każdym razem. Ta zmiana jest błędem przypadkowym lub „szumem”, który dodaje się do sygnału rzeczywistego. Wzmocnienie CCD jest mierzone poprzez porównanie poziomu sygnału do sumy wariancji w sygnale. Jest to możliwe i skuteczne, ponieważ zależność pomiędzy zliczeniami a elektronami jest różna dla sygnału i jego wariancji.

Istnieją dwie metody wyznaczania wzmocnienia (bazujące na tych samych podstawach matematycznych):

1. Pomiar sygnału i jego zmian (wariancji) w tym samym obszarze pikseli przy wielu poziomach natężenia oświetlenia.
2. Pomiar sygnału i jego zmian (wariancji) w pojedynczym pikselu przy wielu poziomach natężenia oświetlenia.

Dla wyprowadzenia zależności pomiędzy sygnałem oraz wariancją w obrazie CCD należy zdefiniować następujące wielkości:

S_C - Sygnał zmierzony w jednostkach zliczenia w obrazie CCD.

S_E - Sygnał w jednostkach elektronów w matrycy CCD (wartość niewiadoma).

N_C - Szum całkowity zmierzony w jednostkach zliczenia w obrazie CCD.

N_E - Szum całkowity w jednostkach zarejestrowanych elektronów. (wartość niewiadoma).

g - Wzmocnienie w jednostkach elektronów na jednostkę zliczaną (e^-/ADU).

Wyznaczenie tej wielkości jest celem obliczeń

R_E - Szum odczytu chipu CCD w jednostkach elektronów (wartość niewiadoma).

E - Szum fotonowy w sygnale N_E .

σ_o - Dodatkowe źródło szumu w obrazie. Będzie on opisany poniżej.

Potrzebne jest równanie wiążące nieznaną liczbę elektronów z wielkościami zmierzonymi w obrazie CCD w jednostkach zliczonych (ADU). Sygnał i szum są powiązane w prosty sposób poprzez współczynnik wzmocnienia jako:

$$S_E = g S_C \text{ oraz } N_E = g N_C \quad (1)$$

Wyżej wymieniona zależność można odwrócić i wtedy

$$S_C = 1/g S_E \text{ oraz } N_C = 1/g N_E \quad (2)$$

Do szumu całkowitego wnoszą swój wkład różne źródła: szum odczytu R_E , szum fotonowy przypisany do natury światła σE , oraz pewne dodatkowe szумы σ_o , których znaczenie i waga zostaną objaśnione bliżej w rozdz. 5. Ponieważ różne źródła szumu są niezależne od siebie, można przyjąć, że sumują się one w formie kwadratowej (jako kwadraty ich wartości szumowych). Jeżeli można zmierzyć całkowity szum w jednostkach elektronu, wtedy różne źródła szumu będą sumowały się w następującej postaci:

$$N_E^2 = R + \sigma_E^2 + \sigma_{o,E}^2 \quad (3)$$

Przypadkowy sposób docierania elektronów do detektora wpływa na szum fotonowy. Szum ten podlega prawom statystycznym Poissona, co powoduje, że kwadrat szumu jest równy sygnałowi, lub $\sigma_E^2 = S_E$. Tak więc można dokonać następującego podstawienia:

$$N_E^2 = R + S_E + \sigma_{o,E}^2 \quad (4)$$

Wiedząc, jak wzmocnienie wiąże jednostki elektronu z jednostkami zliczania, można zmodyfikować to równanie do postaci

$$g^2 N_C^2 = g^2 R_C^2 + g^2 S_C + g^2 \sigma_{o,C}^2 \quad (5)$$

a po dalszym przekształceniu:

$$N_C^2 = R_C^2 + \frac{1}{g} S_C + \sigma_{o,C}^2 \quad (6)$$

Można to przepisać w formie końcowej:

$$N_C^2 = \frac{1}{g} S_C + (R_C^2 + \sigma_{o,C}^2) \quad (7)$$

Jest to równanie linii, gdzie N_C^2 jest osią y , S_C jest osią x , zaś kąt jej nachylenia wynosi $1/g$.

Człony dodatkowe $(R_C^2 + \sigma_{o,C}^2)$ są chwilowo zgrupowane razem. Poniżej zostaną one rozdzielone, jako że dodatkowy czynnik szumowy ma głęboki wpływ na metodę stosowaną do pomiaru wzmocnienia.

Lepszym sposobem zastosowania tego równania jest sporządzenie wykresu wyników pomiarów z S_C jako osią y oraz N_C^2 jako osią x , co pokazuje wzmocnienie bezpośrednio jako kąt nachylenia. Teoretycznie można w końcu obliczyć szum odczytu (R_C^2), na podstawie współrzędnych punktu, w którym linia przecina oś y dla $S_C = 0$.

Znajomość wzmocnienia umożliwia zamianę tych współrzędnych na szum odczytu wyrażony w standardowych jednostkach ładunku elektronu. Znajdowanie punktu przecięcia linii z osią nie jest jednak dobrą metodą, ponieważ szum odczytu jest wielkością stosunkowo niedużą i wyznaczanie punktu przecięcia może być niedokładne.

Po uporządkowaniu zależności matematycznych można przystąpić do obliczania wzmocnienia. Jak dotąd zignorowano czynnik "szumu dodatkowego" $\sigma_{o,c}$ ¹.

4. ZGRUBNE OSZACOWANIE WZMOCNIENIA

W poprzednim rozdziale wyprowadzono kompletne równanie wiążące sygnał i szum zmierzone w obrazie CCD. Istnieje również popularna metoda pomiaru wzmocnienia. Jest ona bardzo prosta, lecz nie bazuje ona na ww. pełnym równaniu. Może być ona opisana następująco:

1. Należy uzyskać obrazy przy różnych poziomach sygnału i odjąć od nich napięcie wstępne (bias). Jest to konieczne, ponieważ poziom polaryzacji wstępnej dodaje się do sygnału mierzonego, lecz nie wpływa na szum.
2. Należy zmierzyć sygnał i szum w każdym obrazie na podstawie wartości średniej i odchylenia standardowego z wybranego obszaru pikseli. Kwadrat wartości szumu wyznacza wartość wariancji dla każdego poziomu sygnału.
3. Dla każdego obrazu należy określić wartość sygnału na osi y oraz wariancji na osi x .
4. Następnie należy znaleźć nachylenie linii wyznaczonej przez punkty o ww. współrzędnych. Wzmocnienie jest równe temu nachyleniu.

Wzmocnienie g jest stałą konwersji analogowego sygnału wyjściowego z kamery wyrażonego w jednostkach przeliczenia analogowo/cyfrowego jednostek cyfrowych S (ADU) na aktualną fizyczną liczbę elektronów $N(e^-)$ ge-

¹ Natura tego szumu oraz wpływ, jaki ma on na sposób pomiaru wzmocnienia kamery CCD zostaną przedstawione w pkt. 5.

nerowanych przez fotony (dochodzące do CCD i oddziaływujące z nią). Wyraża się ją w jednostkach liczby elektronów na jednostkę ADU ($e^- \times \text{ADU}^{-1}$) i definiuje jako

$$g = \frac{N(e^-)}{S} \text{ albo } N = g \cdot S \quad (8)$$

Ponieważ N jest bezpośrednio proporcjonalne do S , więc ich błędy są również bezpośrednio proporcjonalne z tą samą stałą proporcjonalności g :

$$\sigma_N = g \cdot \sigma_S \quad (9)$$

Zakładając, że elektrony są wytwarzane w matrycy CCD w prostej proporcjonalności do liczby dochodzących fotonów, N powinno spełniać warunki statystyczne zliczania fotonów, a więc

$$\sigma_N = \sqrt{N} \quad (10)$$

skąd

$$\sqrt{N} = g \cdot \sigma_S \quad (11)$$

Wykorzystując do wyznaczenia N równanie (8),

$$\sqrt{gS} = g \sigma_S \quad (12)$$

uzyskuje się równanie opisujące wariancję:

$$\sigma_S^2 = \frac{1}{g} S \quad (13)$$

które mówi, że wykres wariancji σ jako funkcji S powinien być linią prostą o nachyleniu równym odwrotności wzmocnienia.

Jeżeli faktycznie dokonuje się pomiarów w praktycznie użytecznym zakresie sygnałów, punkty pomiarowe tworzą raczej krzywą a nie prostą. Przy zastosowaniu tej metody zawsze mierzy się nachylenie, które jest zbyt płytkie, a więc zaniża się poziom wzmocnienia. Wykorzystując tylko niskie

poziomy sygnałów, uzyskuje się wzmocnienie, które jest w najlepszym przypadku w przybliżeniu prawidłowe.

Krzywizna jest wtedy mało dostrzegalna lecz obecna. Jednak punkty pomiarowe mają pewną skłonność do rozproszenia i bez dłuższej linii bazowej wykresu sygnału nie można dokładnie określić nachylenia. Zakrzywienie (teoretycznie prostoliniowej) krzywej wykresu sygnał – wariancja jest spowodowane dodatkowymi składnikami szumu, których ta metoda nie bierze pod uwagę.

Krzywizna uzyskanego wykresu jest spowodowana następującymi czynnikami:

- Barwa źródła światła – większe błędy uwidaczniają się przy pomiarach w niebieskim zakresie widm, ponieważ matryca CCD wykazuje większe nieregularności kształtu i wahania czułości powierzchni przy krótszych długościach fali.
- Technologia wytwarzania chipu CCD – ten czynnik decyduje o natężeniu efektów opisanych w poprzednim punkcie.
- Jednorodność oświetlenia chipu CCD – jeżeli oświetlenie nie jest jednorodne, wtedy zmienność poziomu oświetlenia w obszarze badanych pikseli wpływa na zmierzoną wartość odchylenia standardowego.

Należy zmodyfikować pomiary w taki sposób, aby na wykresie uzyskać linię prostą. Należy obmyślić sposób uwzględnienia dodatkowego czynnika szumowego. Jeżeli jego wartość jest stała – można go połączyć ze stałym szumem odczytu. Przyjęto założenie, że szum odczytu łączy razem wszystkie stałe źródła szumu, które nie zmieniają się wraz ze zmianą sygnału.

5. PRZYCZYNY SZUMU DODATKOWEGO W ZALEŻNOŚCI POMIĘDZY SYGNAŁEM I WARIANCJĄ

Podczas eksploatacji dowolnego układu z matrycą CCD zakłada się, że powierzchnia czynna elementu charakteryzuje się stałą czułością powierzchniową reakcji w każdym punkcie powierzchni światłoczułej. Jeżeli jednak czułość powierzchniowa nie jest stała na całym obszarze przetwarzania, odpowiedzi poszczególnych pikseli będą różne (zależne od geometrii padania strumienia), pomimo tego, że strumień pada na całą powierzchnię czynną odbiornika [2]. Prawie zawsze scalony analizator obrazu współpracuje z układem optycznym obiektywu, którego zadaniem jest odwzorowanie analizowanej sceny na powierzchni detektora.

Charakterystyka transmisyjna tego układu nie może być stała w całym obszarze pola widzenia ze względu na efekty winietowania geometrycznego i naturalnego oraz ew. apodyzacje w źrenicy lub też niejednorodności transmisji w układzie optycznym. Jeżeli strumień promieniowania w układzie kamery wykazuje nierównomierną gęstość przestrzenną, to odpowiedź przetwornika będzie zależała od geometrii padania promieniowania na powierzchnię danego elementu światłoczułego matrycy.

Człon dodatkowego szumu $\sigma_{o,C}$, jest właściwością zmian czułości CCD pomiędzy kolejnymi pikselami, znanym jako efekt nierównomierności powierzchniowej czułości (w literaturze anglojęzycznej często określane terminem „*Flat Field Effect*”). Efekt ten powoduje wzór pozornie „przypadkowego” rozproszenia w obrazie CCD. Jest on widoczny nawet przy rejestracji obrazu o nieskończonym stosunku sygnału do szumu (SNR). Nie ma on charakteru przypadkowego, lecz powtarza się w każdym kolejnym obrazie. Zmiana barwy źródła światła oświetlającego scenę powoduje zmianę szczegółów tego wzoru, lecz pozostaje on niezmienny dla wszystkich rejestracji obrazów oświetlonych światłem o tym samym rozkładzie spektralnym. Ważność tego efektu (pomimo, że nierównomierność czułości nie jest w rzeczywistości składnikiem szumowym – jest to błąd systematyczny) wynika z faktu, że – jeżeli nie zostanie on usunięty z obrazu – będzie sumował się z aktualnie mierzonym szumem.

Należy przeanalizować charakter szumu z udziałem czynnika nierównomierności czułości powierzchniowej, aby określić jego wpływ na wariancję mierzoną w analizowanym obrazie. Ponieważ wzór powstały z nierównomierności powierzchniowej (Flat Field Pattern) stanowi stały odsetek (procent) sygnału, odchylenie standardowe lub “szum” mierzony na tej podstawie jest zawsze proporcjonalny do wartości sygnału. Np. przyjmując założenie, że pewien piksel jest o 1 % mniej czuły od lewego sąsiada, a o 3 % mniej czuły od prawego sąsiada, można stwierdzić, że w takim przypadku naświetlenia tych pikseli sygnałem o poziomie 100 jednostek wytworzą następujące odpowiedzi: 101, 100, 103. Jednak naświetlenie tych samych pikseli sygnałem o poziomie 10 000 da w rezultacie: 10 100, 10 000, 10 300. Odchylenie standardowe dla tych trzech pikseli wynosi $\sigma_{o,C} = 2,333$ zliczeń dla słabszego sygnału, lecz dla silniejszego sygnału będzie $\sigma_{o,C} = 2333$ zliczeń. tą proporcjonalność pomiędzy “szumem” nierównomierności czułości oraz poziomem sygnału można wyrazić matematycznie w prosty sposób:

$$\sigma_{o,C} = kS_C \quad (14)$$

W przedstawionym tu przypadku $k = 0,02333$. Podstawiając to równanie na zmianę czułości w polu widzenia detektora do równania podstawowego (7) otrzymuje się:

$$N_C^2 = \frac{1}{g} S_C + R_C^2 + k^2 S_C^2 \quad (15)$$

Po prostym przekształceniu ujawnia się forma kwadratowa funkcji sygnału:

$$N_C^2 = R_C^2 + \frac{1}{g} S_C + k^2 S_C^2 \quad (16)$$

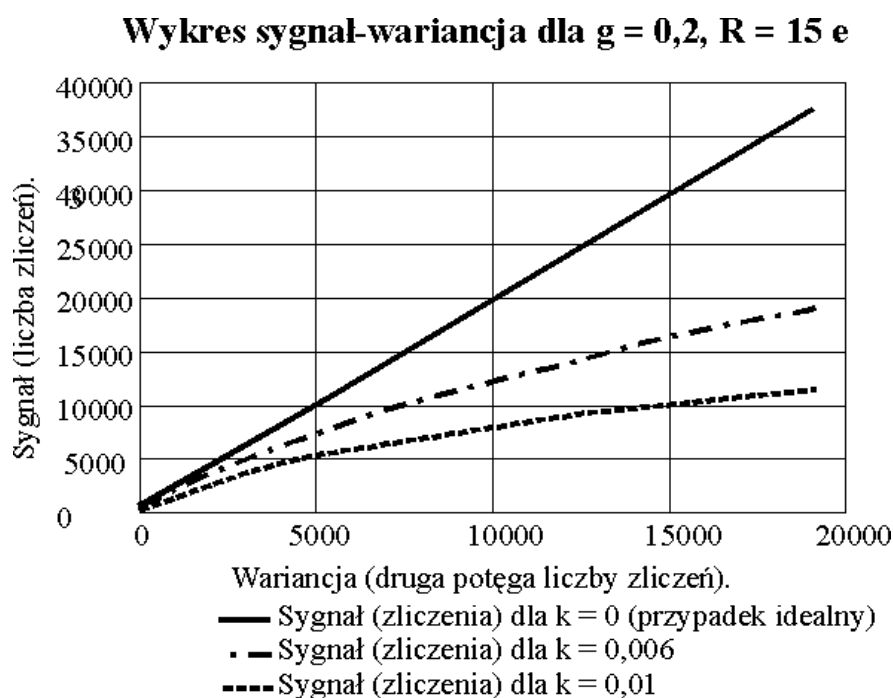
Na wykresie z wartościami sygnału na osi x , równanie to przedstawia parabolę otwartą do góry. Ponieważ zazwyczaj wykres sygnał – wariancja jest przedstawiany z wartościami sygnału na osi y , należy ww. równanie odwrócić i rozwiązać względem S_C . Takie równanie końcowe opisuje zależność pomiędzy sygnałem i wariancją w klasycznej postaci. Jest to rodzina parabol o poziomej osi symetrii, otwartych z prawej strony. Krzywizna tych parabol jest określona poprzez nasilenie zmian powierzchniowej czułości k (Flat Field Variation). Gdy $k = 0$, krzywizna zanika i zależność staje się liniowa, co jest wynikiem pożądanym. Krzywizna na prawo od linii oznacza, że im silniejszy jest wpływ nierównomierności powierzchniowej czułości, tym bardziej wartość wariancji rośnie dla danego poziomu sygnału. Wynik ten oznacza, że nie można wyznaczyć dokładnie wzmocnienia z wykresu sygnał – wariancja, jeżeli nie jest znany jeden z dwóch elementów, albo: 1) znana jest wartość k , lub też 2) stanowisko pomiarowe jest przystosowane do wyeliminowania wpływu efektów nierównomierności powierzchniowej czułości. Wariant drugi jest strategią prawidłową. W zasadzie słabą stroną metody opisaną poprzednio jest to, że zakłada ona zależność prostoliniową, lecz ignoruje efekty nierównomierności czułości.

Dla zilustrowania efektów nierównomierności czułości (Flat Field Effects), zbudowano modele matematyczne z wykorzystaniem ww. równań z parametrami typowymi dla ogólnie dostępnych kamer CCD. Zawierają one na ogół szum odczytu na poziomie $R_C = 15 e^-$ oraz wzmocnienie $g = 2,0 e^-/(ADU)$. Zbudowano trzy modele z parametrami nierównomierności czułości powierzchniowej $k = 0$, $k = 0,005$ oraz $k = 0,01$. Zmiany czułości powierzchniowej tego rzędu nie są niczym niezwykłym. Modele te przedstawiono na rys. 1.

Wzrost wartości k odpowiada stopniowo wzrastającej nierównomierności czułości powierzchniowej na płycie matrycy CCD. Amplituda tych efektów

wzrasta dla krótszych długości fali promieniowania, zwłaszcza dla matryc pocienianych (oświetlanych od strony podłoża). Błędy, wynikające z nierównomierności czułości powierzchniowej występują w każdym naświetlonym obrazie. Na podstawie ww. modeli widać, że po prostym zarejestrowaniu obrazów przy różnych poziomach oświetlenia i pomiarze ich wariancji, - dopasowanie prostej uśrednionej dla punktów pomiarowych na dowolnym odcinku krzywej skutkuje pomiarem nachylenia niższym od jego wartości rzeczywistej. Dlatego też uproszczona metoda z rozdz. 4 zaniża wartość mierzonego wzmocnienia.

Odchylenie od prostoliniowości jest całkowicie niejednoznaczne i łatwe do wykrycia. Najlepszą strategią realizacji metody sygnał – wariancja jest wytworzenie wykresu prostoliniowego poprzez odpowiednie skompensowanie efektów nierównomierności powierzchniowej. Eliminuje to potrzebę oszacowania, jak duża jest krzywizna oraz co ją spowodowało.



Rys. 1. Modele zależności sygnału i jego wariancji z uwzględnieniem efektów nierównomierności powierzchniowej detektora analizującego

Układ elektroniczny kamery jest dość złożony i mogą powstawać problemy takie jak zmiana wzmocnienia na różnych poziomach sygnału oraz trudne do wyjaśnienia dodatkowe szumy na różnych poziomach sygnału (niskich lub wysokich). Przy zastosowaniu „solidnej” metody wyznaczania wzmocnienia, dowolne odchylenie od prostoliniowości ujawnia możliwość istnienia problemów w układzie elektronicznym kamery.

6. KOREKCJA NIERÓWNOMIERNOŚCI CZUŁOŚCI POWIERZCHNIOWEJ ANALIZATORA OBRAZU

Detektor CCD składa się z dwuwymiarowej matrycy elementów światłoczułych (pikseli). Jest ona stabilna mechanicznie, a konfiguracja geometryczna pikseli może być traktowana jako niezmienna. Jednak każdy piksel w matrycy ma własną i niepowtarzalną charakterystykę czułości na światło. Jeżeli charakterystyka ta wpływa na jakość obrazu uzyskiwanego z kamery, musi to być wyeliminowane poprzez kalibrację. Dlatego też dla profesjonalnych zastosowań pomiarowych, zwłaszcza przy niskich poziomach światła, należy korzystać z ramek kalibracyjnych. Ramka określająca zmiany czułości na powierzchni określana jest jako *ramka równomierności*. Ramka określająca szum – jako *ramka bazowa*. Ramka bazowa jest odejmowana od obrazu jak i od ramki równomierności, a następnie ramka obrazu jest dzielona przez ramkę równomierności. Otrzymane wówczas liczby są normalizowane. Ten proces kalibracji jest znany jako „flat fielding”.

Może on być zilustrowany następującym równaniem:

$$I_C = [(I_R - I_B) * M] / (I_F - I_B) \quad (17)$$

gdzie:

- I_C – jest wykalibrowanym obrazem;
- I_R – jest nie wykalibrowanym obrazem zarejestrowanym przez kamerę;
- I_B – jest napięciem wstępnym albo ramką ciemną;
- M – jest uśrednioną wartością piksela skorygowanej ramki korekcyjnej (Corrected Flat Field Frame) oraz
- I_F – jest ramką korekcyjną (Flat Field Frame).

Składniki wzoru 17 mogą być skomentowane następująco:

I_B – Proces kalibracji (Flat Fielding) wymaga zarejestrowania dwóch ramek. Po pierwsze należy zarejestrować ramkę z napięciem wstępnym (Bias Frame) lub ramkę ciemną (Dark Frame). Napięcie wstępne usuwa z kamery cały zakumulowany ładunek i odczytuje „pustą” matrycę CCD. Wynikowy obraz zawiera bardzo słaby obraz. W takim obrazie wszystkie piksele mają w przybliżeniu tą samą wartość, która składa się z elektronicznej kompensacji systemu, wynikającej z wrodzonej struktury CCD. Ramka ciemna opróżnia matrycę CCD z ładunku, pozwala na akumulację ładunku przez określony przedział czasu przy zamkniętej migawce i odczytuje zgromadzony ładunek (prąd ciemny). Ramka

ciemna zawiera więc standardowe składowe polaryzacji wstępnej oraz sygnał ciemny. Jest to szczególnie pożyteczne przy wykonywaniu długotrwałych naświetleń przy niskim poziomie oświetlenia.

I_F – Drugi obraz wykorzystywany przy kalibracji, tzw. obraz korekcji nierównomierności czułości powierzchniowej (Flat Field Frame), mierzy odpowiedź każdego piksela matrycy CCD i jest wykorzystywany do korekcji jakichkolwiek zmiany w rozkładzie oświetlenia w obszarze matrycy CCD. Proces korekcji koryguje skutki nierównomiernego oświetlenia powierzchni matrycy, jeżeli oświetlenie to ma stabilną charakterystykę przy każdym naświetleniu obrazu. Tak więc konieczne jest oświetlenie CCD takim rozkładem natężenia oświetlenia, które jest możliwie adekwatne dla tła rejestrowanej później sceny rzeczywistej. Musi ono być wystarczająco mocne, aby sygnały z pikseli matrycy były na poziomie co najmniej 25 % pełnej skali zakresu dynamicznego lub powyżej. Np. dla kamer wyposażonych w 12 bitową kartę przetwarzania analogowego poziom ten powinien wynosić co najmniej 1000 ADU.

I_R – Zapisane jest naświetlenie badanego obiektu (sceny).

$(I_R - I_B)$ – Ramka obrazu musi zostać skorygowana względem napięcia wstępnego poprzez odjęcie od niej ramki napięcia wstępnego/ramki ciemnej.

$(I_F - I_B)$ – Ramka korekcyjna czułości musi również być skorygowana względem napięcia wstępnego poprzez odjęcie od niej ramki napięcia wstępnego/ramki ciemnej. Średnia wartość piksela skorygowanej ramki korekcyjnej (Flat Field Frame) musi następnie zostać wyznaczona (M).

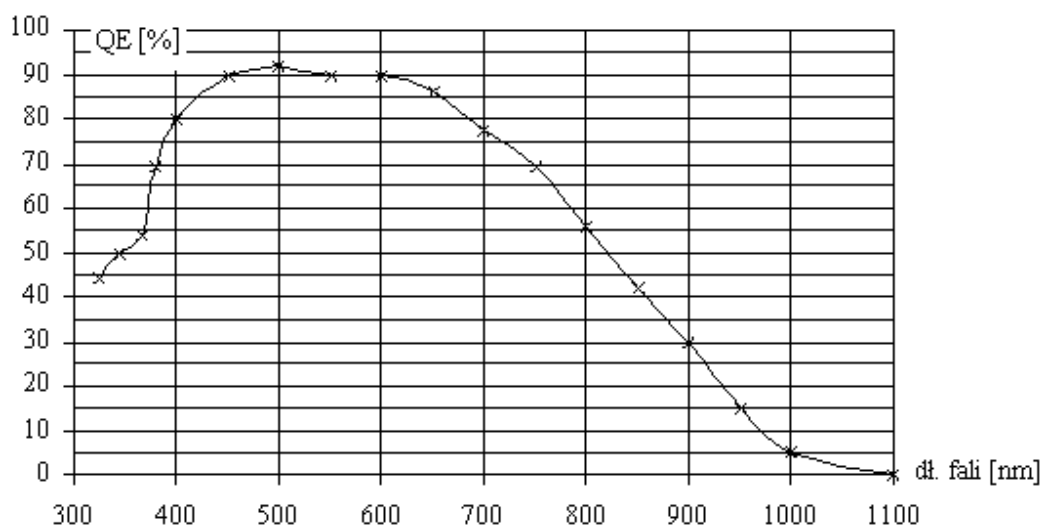
7. PRZEGLĄD WYNIKÓW BADAŃ CHARAKTERYSTYK POWIERZCHNIOWYCH MATRYC

Poniżej omówiono badania dwóch typów detektorów, przeprowadzone w European Southern Observatory (ESO) i National Astronomical Observatory of Japan, opublikowana na stronach internetowych [2].

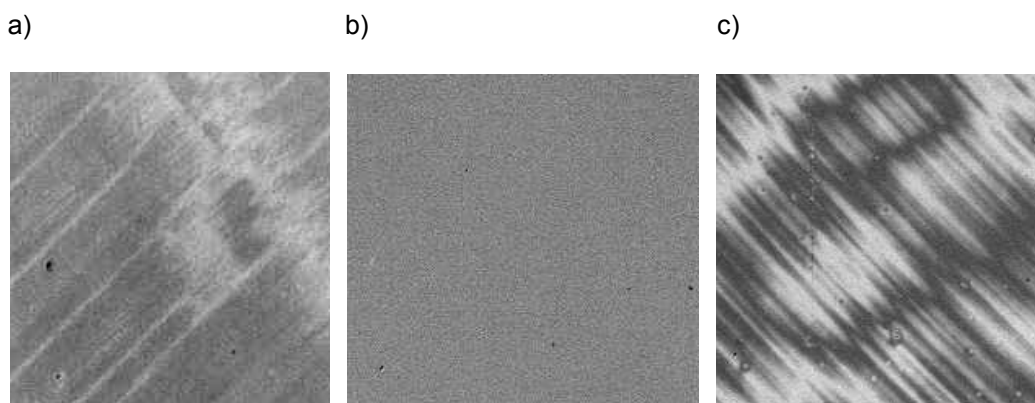
EEV CCD 82 – 44

Scalone przetworniki obrazu EEV (zbadane w ESO) o wysokiej rozdzielczości obrazu są stosowane w wielu systemach pomiarowych. Powierzchnia światłoczuła badanej matrycy zawiera 2048 linii, z których każda zawiera 4102 pikseli. Każdy piksel jest kwadratem o wymiarach $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$. Wielkość powierzchni całej matrycy $A = 30,7 \times 61,53 \text{ mm}^2$. Zostały one zaprojektowane pod kątem osiągnięcia dobrej skuteczności kwantowej w zakresie widzialnym. Jednak dla każdego elementu skuteczność kwantowa lekko się

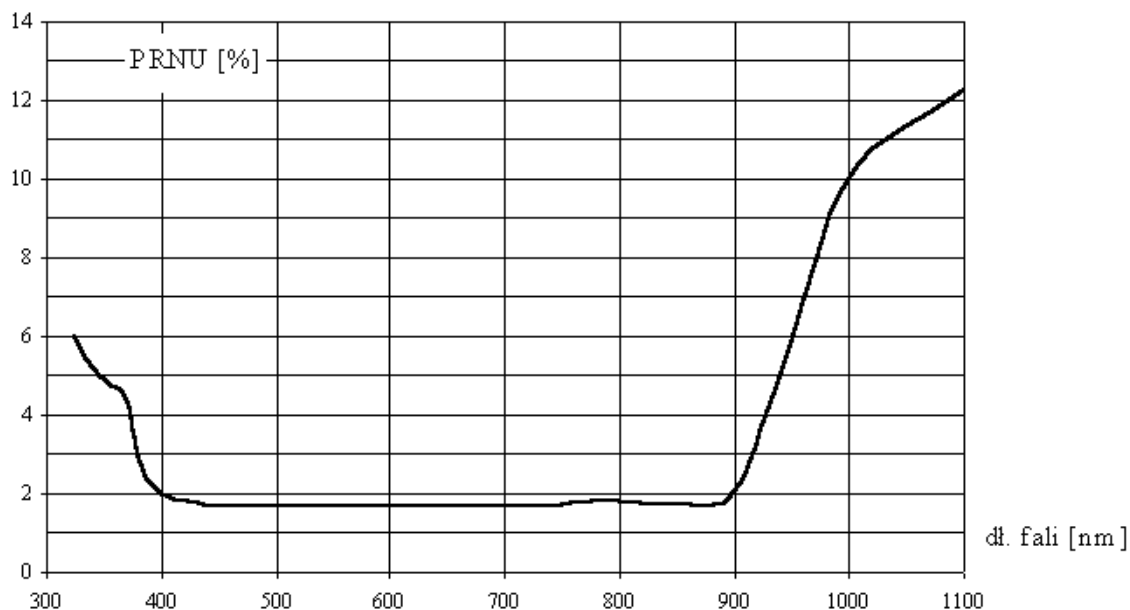
zmienia. Jest ona silnie zależna od grubości powłoki rozjaśniającej, która dla każdego przyrządu może mieć inną wartość. ESO dokonało pomiarów 12 takich elementów. Na wykresie na rysunku 2 pokazany jest wynik otrzymany drogą statystyczną, określony na podstawie pomiarów tych 12 elementów. Zmiana sygnału wyjściowego elementu CCD przy oświetleniu jednorodnym promieniowaniem, rejestrowana metodą punkt po punkcie, nazywana jest niejednorodnością odpowiedzi optycznej – PRNU (Photo-Response Non-Uniformity). Parametr ten jest bardzo mały w analizatorach monochromatycznych (bez kolorowych filtrów) i zależy od skuteczności kwantowej i prądu ciemnego. Te parametry są na ogół stałe na całej powierzchni światłoczułej CCD.



Rys. 2. Skuteczność kwantowa EEV CCD 44-82



Rys. 3. Odpowiedź optyczna tej samej części powierzchni światłoczułej elementu EEV CCD 44-82 na promieniowanie: a) 320 nm, b) 650 nm, c) 950 nm

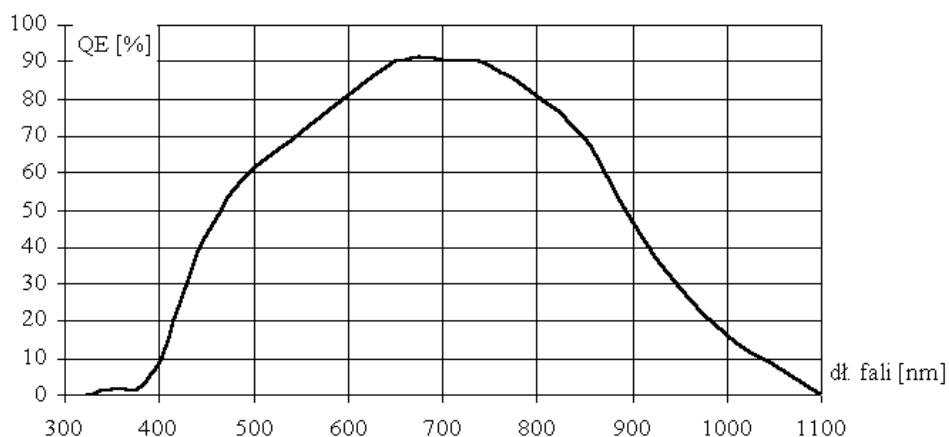


Rys. 4. Rozkład PRNU w zależności od długości fali

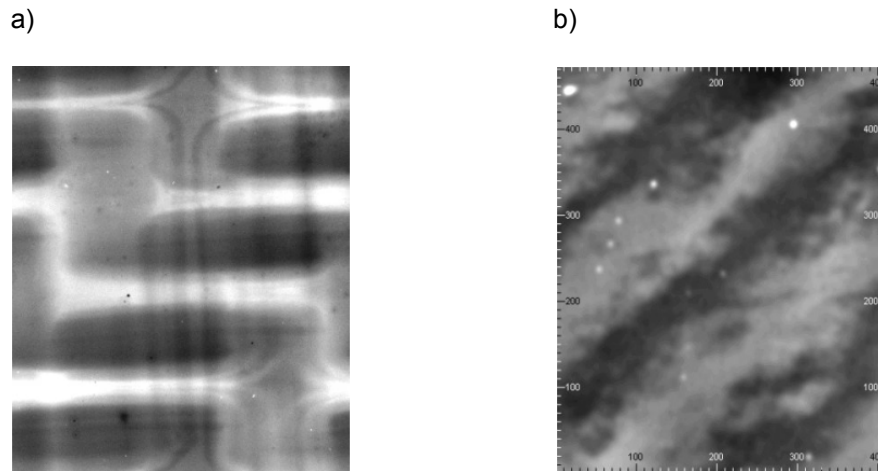
Analizatory z kolorowymi filtrami mają wyższą wartość PRNU ze względu na zmiany grubości filtra, zależne od technologii wytwarzania.

W zakresie spektralnym pomiędzy 400 nm i 800 nm, PRNU badanych matryc jest bardzo dobra. Poniżej 400 nm jest widoczny wpływ drgań sieci krystalicznej. Temperatura podczas pomiarów nie powinna się zmieniać więcej niż o 2 ... 3 stopnie. Pomiar PRNU przeprowadzone przy różnicy temperatur 20 stopni (150 K...170 K) wykazały zmiany tego parametru o 1,25 % przy stałej długości fali.

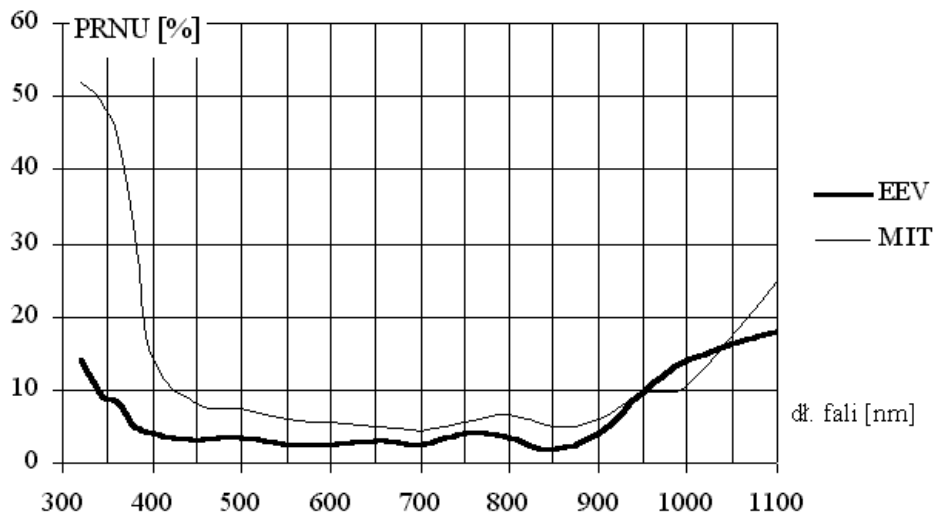
MIT CCID – 20



Rys. 5. Skuteczność kwantowa elementu MIT-CCID [3]



Rys. 6. Odpowiedź optyczna elementu MIT-CCID – 20 dla długości fali;
a) $\lambda=350$ nm; b) $\lambda=850$ nm



Rys. 7. Porównanie niejednorodności odpowiedzi optycznej dwóch rodzajów matryc: CCD EEV i MIT CCID [3]

Matryce MIT CCID wykazują lepszą skuteczność kwantową w zakresie bliskiej podczerwieni, toteż są one stosowane w przyrządach wymagających wysokiej czułości w tym zakresie widmowym (rys. 5). Przyczyny takiego przebiegu charakterystyki PRNU są takie same jak w przypadku matrycy EEV CCD 82-44.

Porównując PRNU dla zmierzonego MIT CCID – 20 i EEV CCD 82 – 44 można zauważyć, że dla niebieskich długości fal MIT CCID – 20 posiada znacznie większą wartość niejednorodności odpowiedzi optycznej (rys. 6. i 7).

8. DOKŁADNA METODA WYZNACZANIA WZMOCNIENIA

W poprzednich rozdziałach przedstawiono tzw. prostą metodę wyznaczania wzmocnienia jako przykład nadmiernego uproszczenia problemu. W szczególności wytwarza ona w rezultacie wykres sygnał – wariancja z nieprostoliniową relacją ze względu na występowanie efektów nierównomierności czułości powierzchniowej układu kamery z obiektywem i matrycą. Obecnie opisane zostaną dwie dokładne metody pomiarowe, korygujące skutki wpływu tych efektów na relację sygnał – wariancja dla uzyskania pożądanej, liniowej charakterystyki. Pozwoli to na dokładne określenie wzmocnienia. Dopasowanie metody do usuwania skutków nierównomierności czułości jest lepszą metodą niż zakładanie stosowania niskich poziomów sygnału lub też od prób pomiaru i kompensacji wpływu parametru k (opisującego wpływ nierównomierności czułości).

Przy wykorzystywaniu metod “dokładnych” opisanych niżej, należy uwzględnić pewne wymogi proceduralne, stosujące się do obydwu metod:

1. Obydwie metody wykorzystują pomiary zestawów dwóch lub więcej obrazów dla każdego poziomu oświetlenia. Zestaw obrazów jest zdefiniowany jako 2 lub więcej sukcesywne zapisy sceny wykonanych w tych samych warunkach oświetleniowych. W celu zmiany warunków oświetleniowych lepiej jest zmieniać natężenie oświetlenia powierzchni matrycy niż czas ekspozycji. Można to zrealizować albo poprzez zmianę światłości promieniowania źródła światła, albo poprzez zmianę ilości światła przechodzącego do kamery. Oświetlenie odbierane przez CCD nie powinno się zbytnio zmieniać dla danego zestawu obrazów, lecz nie musi być faktycznie niezmiennie.

2. Zaleca się chłodzenie kamery do możliwie niskiej temperatury w osiągalnych granicach dla zredukowania prądu ciemnego. Zapobiega to konieczności odejmowania ramek ciemnych od ramek obrazowych (wykonanie tej operacji powoduje zsumowanie szumów, co niekorzystnie wpływa na pomiar szumu w niskich poziomach sygnału). Dodatkowo, jeżeli napięcie wstępne zmienia się pomiędzy rejestracjami kolejnych ramek obrazowych, należy zapewnić odjęcie składnika napięcia wstępnego od każdego obrazu.

3. Matryca CCD powinna być oświetlona w ten sam sposób dla wszystkich obrazów zestawu. Nieregularności oświetlenia w zestawie są automatycznie usuwane podczas przetwarzania obrazu metodami, wykorzystywanymi przy kalibracji.

4. W jednym zestawie obrazów różnice naświetlenia są korygowane poprzez normalizację obrazów tak, aby miały one taki sam poziom sygnału uśred-

nionego w danym obszarze pikseli. W procesie normalizacji obrazy są przemnażane przez wartość stałą odpowiednio dobraną tak, że wartość średnia sygnału w określonym obszarze pikseli odpowiada innym obrazom z tego samego zestawu. To przemnożenie przez stałą nie powinno wpływać na stosunek sygnału do szumu oraz na strukturę nierównomierności czułości w obrazie.

5. Nie należy szacować szumu odczytu kamery poprzez obliczanie wartości szumu przy zerowym sygnale. Jest to pierwiastek kwadratowy z wartości wariancji w miejscu, gdzie linia wzmocnienia przecina oś y . Szczególnie nie należy korzystać z tej wartości, jeżeli napięcie wstępne nie zostało odjęte od każdej ramki obrazowej. W celu obliczenia szumu odczytu, należy zastosować metodę dwóch napięć wstępnych (Two Bias) oraz wykorzystać wartość wzmocnienia uzyskaną w tym teście. W tej metodzie dwie ramki ustawiania są rejestrowane kolejno i następnie odjęte jedna od drugiej. Należy zmierzyć odchylenie standardowe wewnątrz obszaru np. powiedzmy 100×100 pikseli oraz podzielić przez 1,4142. Umożliwia to wyrażenie szumu odczytu w jednostkach zliczeń (ADU). Następnie należy przemnożyć tę wartość przez współczynnik wzmocnienia aby uzyskać wartość szumu odczytu w jednostkach elektronów. Jeżeli nie ma do dyspozycji ramek ustawiania – należy ochłodzić kamerę i zarejestrować dwie ramki ciemne z minimum naświetlenia, a następnie zastosować do nich metodę dwóch ramek (Two Bias Method).

METODA 1: Skorygowanie nierównomierności czułości (Flat Field Effects) dla każdego poziomu sygnału. W tej metodyce efekty te są usunięte poprzez odejmowanie jednego obrazu od drugiego dla każdego poziomu oświetlenia. Dla każdego poziomu oświetlenia należy wykonać następujące czynności:

1. Uzyskać 2 kolejne obrazy przy tym samym poziomie natężenia oświetlenia. Nazwijmy te obrazy A i B .

2. Odjąć poziom napięcia wstępnego (ustawiania) od obydwu obrazów. Należy zastosować możliwie krótki czas naświetlania tak, aby prąd ciemny był pomijalnie mały. Jeżeli szum ten jest nie do pominięcia - należy odjąć go od obydwu obrazów.

3. Zmierzyć średni poziom sygnału S w wybranym obszarze pikseli w obrazach A i B . Nazwijmy te sygnały średnie S_A oraz S_B . Najlepiej jest, gdy granice tych obszarów zmieniają się jak najmniej, na ile to możliwe, pomiędzy obydwoma obrazami. Obszar ten może być tak mały jak 50×50 do 100×100 pikseli, lecz nie może zawierać defektów i uszkodzeń takich jak ślady promieni kosmicznych, nieczynne piksele itp.

4. Obliczyć iloraz poziomów sygnałów średnich jako $r = S_A / S_B$.

5. Przemnożyć obraz B przez wartość r . Koryguje to obraz B do tego samego poziomu sygnału, jaki występuje w obrazie A , bez wpływu na rozkład

szumu oraz na rozkład nierównomierności czułości powierzchniowej reakcji matrycy.

6. Odjąć obraz B od obrazu A . Skutki nierównomierności czułości powierzchniowej obecne w obydwu obrazach powinny być usunięte z dokładnością do błędów przypadkowych.

7. Zmierzyć odchylenie standardowe w tym samym obszarze pikseli, który wybrano w kroku 3. Podnieść tę wartość do kwadratu dla wyznaczenia wariancji. Ponadto należy podzielić wynikową wariancję przez 2, aby skorygować fakt, że wartość wariancji jest zdwojona podczas odejmowania od siebie dwóch podobnych obrazów.

8. Wykorzystać wartości sygnału z pkt. 3 oraz wariancji z pkt. 7 w celu wprowadzenia punktów pomiarowych do wykresu sygnał – wariancja.

9. Zmienić naświetlenie i powtórzyć kroki 1 do 8.

METODA 2: Usuwanie efektów nierównomierności z wykorzystaniem jednego piksela w wielu obrazach.

Metodyka ta unika wpływu zmiany nierównomierności czułości powierzchniowej poprzez rozpatrzenie, jak reakcja pojedynczego piksela zmienia się w wielu obrazach. Ponieważ wariancja jest wyznaczana wielokrotnie z jednego piksela, a nie ze zbioru pikseli, nie występują zmiany czułości powierzchniowej. Aby obliczyć wariancję dla danego poziomu sygnału, należy uzyskać (zarejestrować) wiele ramek obrazowych, zmierzyć reakcję wybranego (tego samego) piksela w każdej ramce i obliczyć wariancję z takiego zbioru wartości. Postępowanie w czasie pomiarów jest następujące:

Wybrać piksel do pomiaru o tym samym położeniu dla każdego obrazu. Zawsze należy mierzyć wartość sygnału z tego samego piksela przy każdym poziomie natężenia oświetlenia.

Przy każdym poziomie natężenia, należy wykonać następujące czynności:

1. Uzyskać co najmniej 100 obrazów kolejno przy takim samym poziomie natężenia oświetlenia. Nazwijmy pierwszy obraz A i pozostałe obrazy i . Ponieważ badany jest pojedynczy piksel rejestrowane obrazy mogą być małe np. rzędu 100×100 pikseli.

2. Odjąć poziom napięcia wstępnego (ustawiania) od każdego obrazów. Czas naświetlania należy utrzymać jako możliwie krótki, tak aby prąd ciemny był do pominięcia. Jeżeli szum ten jest większy, należy odjąć go od każdego z obrazów.

3. Zmierzyć średni poziom sygnału S w prostokątnym obszarze pikseli w obrazie A . Zmierzyć tę samą wielkość w pozostałych obrazach. Obszar ten może być tak mały jak 50×50 do 100×100 pikseli i powinien być wycelowany w najjaśniejszej partii obrazu.

4. Dla każdego obrazu S_i innego niż pierwszy, obliczyć stosunek jego średniego poziomu sygnału do tego z obrazu A. Daje to wartość dla każdego obrazu, $r_i = S_A / S_i$.

5. Przemnożyć każdy obraz i przez wartość r_i . Koryguje to każdy obraz i do tego samego poziomu sygnału średniego, jaki występuje w obrazie A.

6. Zmierzyć liczbę zliczeń (ADU) w wybranym pikselu w każdym z obrazów. Z tego zbioru wyliczyć wartość średnią oraz odchylenie standardowe. Podnieść tą wartość do kwadratu dla wyznaczenia wariancji.

7. Wykorzystać wartości sygnału oraz wariancji z pkt. 6 dla wprowadzenia punktów pomiarowych do wykresu sygnał – wariancja.

8. Zmienić naświetlenie i powtórzyć kroki 1 do 7.

Problemem utrudniającym zastosowanie tej metody jest fakt, że sama wariancja jest obciążona błędami przypadkowymi i jest tylko oszacowaniem rzeczywistej jej wartości. W celu uzyskania rzetelnej wartości wariancji, należy wykonać setki obrazów dla każdego poziomu natężenia oświetlenia. Jest to całkowicie analogiczne do pomiaru wariancji w obszarze pikseli o umiarkowanych rozmiarach, wykorzystywanym w metodzie A; w obydwu metodach wykorzystanie wielu pikseli do obliczenia wariancji dostarcza wartości bardziej wiarygodnej statystycznie. Innym ograniczeniem tej metody jest fakt, że wymaga ona albo doskonale stabilnego źródła światła, albo konieczności kompensacji jego zmian poprzez dopasowanie wszystkich obrazów do tego samego poziomu sygnału uśrednionego, przed pomiarem jego pikseli. W sumie, metoda ta wymaga dużej liczby obrazów i pracochłonnego przetwarzania informacji. Tak więc za preferowaną należy uznać metodę A.

LITERATURA

1. Dybczyński W. „Równomierność czułości przetworników fotoelektrycznych” Technika Świetlna '99 VIII Konferencja Oświetleniowa
2. www.sauron.as.arizona.edu
3. Newberry Michael “Measuring the Gain of a CCD Camera”. Axiom Research, Inc. Tech Note1

PROBLEM OF THE PHOTOELECTRIC-TO-ELECTRICAL
SIGNAL TRANSFORMATION IN THE CCD-MATRIX.

M. RAFAŁOWSKI

ABSTRACT *Amplification of the CCD camera is defined as the conversion between the photon quantity („ e^- ”) registered by the CCD element and the quantity of digital units (“digital counts”), included in the image from the CCD-matrix. The knowledge of the precise value of this conversion factor is useful to valuation of the CCD quality. In this article the mathematical relationships for amplification factor calculation as well as suggestion for its precise measurement technique of it are presented. The simple method is presented as an example of superfluous problem simplification – with nonlinear relation caused by unevenness of surface sensitivity of the camera system composed as the optical system and CCD detector. Consequently two precise measurement method are described, correcting the influence of this negative effects on the signal-variance relation, effecting with the linear characteristic resulting by accurate determination of the amplification of the system.*

Prof. dr hab. inż. Maciej Rafałowski – Pracę naukową i dydaktyczną rozpoczął 1.10.1971 w Instytucie Konstrukcji Przyrządów Precyzyjnych i Optycznych Politechniki Warszawskiej, gdzie pracował do 2000 roku. Prowadził prace analityczne w zakresie teorii odwzorowania i aberracji układów optycznych z zaburzeniami symetrii osiowej oraz oryginalnych optycznych metod kontrolno- -pomiarowych. Od 1.09.1993 podjął pracę w Katedrze Promieniowania Optycznego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej jako profesor nadzwyczajny. Jego aktywność naukowa i dydaktyczna przeorientowała się w kierunku zagadnień z dziedziny elektrotechniki, związanych z problematyką techniki świetlnej a w szczególności z różnymi aspektami pomiarów charakterystyk promieniowania optycznego w zakresie widzialnym. Znalazło to odzwierciedlenie w monografii, wydanej przez Wydawnictwa Politechniki Białostockiej w 2004 roku.

Został wyróżniony 7 nagrodami JM Rektora PW oraz 4 nagrodami JM Rektora PB za osiągnięcia naukowe i dydaktyczne oraz 2 Nagrodami Ministra Szkolnictwa Wyższego i Techniki za prace naukowo badawcze i dydaktyczne.



Jest autorem 2 monografii oraz współautorem 3 skryptów dydaktycznych. Opublikował 37 artykułów w czasopiśmie (w tym 19 w czasopiśmie indeksowanych) oraz 24 referaty (w tym 12 na konferencjach i seminariach międzynarodowych). Brał udział w szeregu prac dla przemysłu (w sumie 31 poz.). Uzyskał 5 patentów (jako współtwórca). W latach 1983...1992 r. był przewodniczącym Branżowej Komisji Normalizacyjnej przy Centralnym Laboratorium Optyki w Warszawie. W czasie trwania XVII...XXVII konkursów projektów badawczych był członkiem Sekcji technologii i automatyzacji maszyn i produkcji (T07D) Komitetu Badań Naukowych. (razem 10 × w latach 1999...2004). W ramach popularyzacji wiedzy w latach 2000...2001 opracował i prowadził wykłady pt. *Technika oświetleniowa* dla słuchaczy Studium Fotografii przy Oddziale Warszawskim Związku Polskich Artystów Fotografików.

W dniu 8.06.2006 otrzymał tytuł naukowy profesora w dziedzinie nauk technicznych.