



## Wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej zobrazowań pozyskiwanych za pomocą kadrowych kamer cyfrowych w ramach Traktatu Open Skies

PIOTR WALCZYKOWSKI, AGATA ORYCH,  
AGNIESZKA JENEROWICZ, KATARZYNA KAWKA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** Terenowa zdolność rozdzielcza jest jednym z podstawowych parametrów określających jakość oraz przydatność pozyskanych zdjęć oraz zobrazowań lotniczych. Określana jest na podstawie zobrazowań pozyskanych z różnych wysokości nad odpowiednio skonstruowanymi celami kalibracyjnymi. W przypadku lotniczej fotografii analogowej, w której obraz rejestrowany jest na filmie, terenowa zdolność rozdzielcza wyznaczana była poprzez oszacowanie widoczności poszczególnych elementów celów. Bardziej precyzyjne wyznaczanie rozdzielczości terenowej sensora zapewnił postęp techniki, a zwłaszcza możliwość cyfrowego zapisu obrazu. W artykule opisano proponowaną metodę wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej w oparciu o zobrazowania cyfrowe. Dodatkowo zamieszczono opis i analizę podstawowych zniekształceń występujących na zobrazowaniach cyfrowych, mających negatywny wpływ na określanie wartości rozdzielczości.

**Słowa kluczowe:** terenowa zdolność rozdzielcza, cyfrowe kamery lotnicze, Open Skies, kamery kadrowe, interpolacja Bayera

**Symbole UKD:** 528.7

### 1. Wstęp

Przedmiotem opracowania jest badanie terenowej zdolności rozdzielczej lotniczych kamer cyfrowych Intergraph DMC oraz Leica RCD-105 na podstawie zobrazowań pozyskanych w trakcie misji Open Skies w dniach 24 maja i 17 lipca 2008 roku, w USA na terenie bazy wojskowej Wright Patterson AFB (39° 46' 36,77" N, 84° 07' 03,16" W).

Terenowa zdolność rozdzielcza została wyznaczona dwiema metodami — jedną wykorzystywaną w ramach Traktatu OS — subiektywną i drugą zaproponowaną przez autorów, bazującą na zobrazeniach w formie cyfrowej — obiektywną.

## 2. Lotnicze kamery cyfrowe

Od kilku lat sukcesywnie lotnicze kamery analogowe są zastępowane przez kamery cyfrowe, wykorzystujące technologię obrazowania barwnego na matrycach (kamery kadrowe) lub liniijkach CCD (skanery elektrooptyczne). W przypadku skanerów elektrooptycznych obraz znacząco różni się od zdjęć analogowych. Zobrażenia te mają różną geometrię obrazu oraz cechują się różnymi zniekształceniami wywołanymi niestabilnością ruchu samolotu. Obraz z kadrowych kamer cyfrowych jest geometrycznie zbliżony do uzyskanego z analogowej kamery fotograficznej, jednak ograniczenie stanowi brak możliwości technicznych w produkcji dużych matryc CCD, co wpływa na rozdzielczość zobrażeń. W celu polepszenia jakości zdjęć, stosowana jest konstrukcja wielomodułowa — zamontowanie kilku sprzężonych ze sobą głowic, każda z własnym obiektywem i matrycą CCD. Przykładem takiej kamery jest Zeiss/Intergraph DMC.

### Z/I DMC

Z/I DMC to wielkoformatowa (wysokorozdzielcza), cyfrowa kamera lotnicza, w której wykorzystywana jest prostokątna matryca detektorów CCD, zbudowana z elementów światłoczułych (pikseli) o wymiarach  $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ , umieszczona w płaszczyźnie tłowej kamery. W celu zwiększenia wynikowej zdolności rozdzielczej kamery, zdjęcia zarówno w zakresie panchromatycznym (450-740 nm), jak i wielospektralnym, wykonywane są za pomocą czterech sprzężonych ze sobą kamer — optycznych głowic, zorientowanych wobec siebie tak, że dają one obrazy z minimalnym pokryciem. Moduły wielospektralne, których pole widzenia pokrywa się z polem widzenia zespołu panchromatycznego, rejestrują w zakresach czerwonym (590-675 nm), zielonym (500-650 nm), niebieskim (400-580 nm) i podczerwonym (740-850 nm), pozwalając na uzyskanie zobrażeń RGB oraz CIR. Kadr kamery DMC ma kształt prostokątny, zwrócony krótszym bokiem w kierunku lotu. Oznacza to zwiększony poprzeczny zasięg zdjęć oraz mniejszy stosunek bazowy w porównaniu z tradycyjnymi kamerami. Kamera DMC wyposażona jest w system kompensacji rozmazania obrazu oparty na integracji elektronicznej obrazu z opóźnieniem czasowym TDI — *Time Delayed Integration*, tzn. ładunek każdego z pikseli transportowany jest liniijka po linijsce do rejestrów odczytowych.

TABELA 1

## Parametry techniczne kamery Z/I DMC

Parametr	Wartość
Ogniskowa	120 mm
Wymiar piksela	12 $\mu\text{m}$
Rozdzielczość radiometryczna	12 bit
Rozmiar zdjęcia w pikselach	7680 $\times$ 13 824
Kąt widzenia (wzdłuż/w poprzek lotu)	42°/69,3°



Rys. 1. Kamera cyfrowa Z/I DMC [3]



Rys. 2. Głowice optyczne kamery cyfrowej Z/I DMC [3]

## Leica RDC-105

Leica RCD-105 jest cyfrową, średnioformatową kadrową kamerą lotniczą, zaprojektowaną głównie jako element wspomagający dla lotniczego skaningu laserowego (LiDAR). Działa w trybie urządzenia bezobsługowego dla skanera. Leica RCD-105 to urządzenie zintegrowane z systemami skanerów lotniczych typu ALS (*Airborne Laser Scanning*).

TABELA 2

Dane techniczne kamery Leica RCD-105

Ogniskowa [mm]	Wartości dla wysokości lotu 1000 m		Wartości dla różnej wysokości lotu	
	GSD [m]	Pokrycie [m]	FOV [stopnie]	b/h (pokrycie podłużne 60%)
35	0,194	1391 × 1047	69,7 × 55,3	0,43
60	0,113	812 × 611	44,2 × 34,0	0,25
100	0,068	487 × 366	27,4 × 20,8	0,15

Kamera Leica RCD-105 charakteryzuje się ogniskową 60 mm, obrazuje w trzech zakresach spektralnych: BLUE (niebieskim: 422-518  $\mu\text{m}$ ), GREEN (zielonym: 518-590  $\mu\text{m}$ ) i RED (czerwonym: 600-718  $\mu\text{m}$ ). W kamerze tej wykorzystana jest matryca CCD o wymiarze 7162 × 5389 pikseli (wielkość piksela 6,8 × 6,8  $\mu\text{m}$ ), z filtrem mozaikowym Bayera.



Rys. 3. Zestaw cyfrowej kamery lotniczej Leica RCD-105 [4]

## 3. Open Skies

Traktat Open Skies został sygnowany w Helsinkach 24 marca 1992 roku. Głównym założeniem traktatu jest umożliwienie jego uczestnikom dokonywania lotów obserwacyjnych nad terytorium innych państw-stron. Każdy z sygnatariuszy ma możliwość

wykonania określonej liczby lotów obserwacyjnych oraz ma obowiązek przyjęcia lotów obserwacyjnych od innych państw. Wszystkie dane pozyskane podczas takich misji, zarówno zdjęcia, zobrazowania, jak i parametry nawigacyjne samolotu, mogą służyć interesom polityki bezpieczeństwa państw–stron. Jest to system pozwalający na budowanie oraz weryfikację wzajemnego zaufania wśród państw–stron.

Loty obserwacyjne wykonywane są na samolocie państwa obserwującego, państwa obserwowanego (istnieje bowiem możliwość zażądania wyłączności użycia własnego samolotu) lub na samolocie strony trzeciej.

Państwa uczestniczące w Traktacie Open Skies wyznaczają własne samoloty dla potrzeb misji, zobowiązane są jednak do przekazania wszelkich informacji technicznych o wykorzystanym sprzęcie. Każdy samolot oraz sprzęt obserwacyjny przeznaczony do wykonywania nalotów podczas misji Otwartych Przystworzy poddawany jest szczegółowym testom. Pod nadzorem międzynarodowej komisji dokonywana jest atestacja (homologacja) wykorzystywanych technologii. Celem takiego działania jest zabezpieczenie się przed stosowaniem instrumentów obserwacyjnych o większej rozdzielczości niż dopuszczalna oraz sprzętu niedozwolonego, który swoją funkcją mógłby naruszać postanowienia traktatu. Loty w ramach misji Open Skies wykonywane są za zgodą państwa, na terenie którego ma odbywać się nalot, oraz w obecności jego przedstawicieli.

Czas i długość lotów obserwacyjnych są zależne od powierzchni państwa obserwowanego, nad którym ma odbywać się nalot oraz od ilości lotnisk, które zostały udostępnione w ramach systemu Otwartych Przystworzy.

W trakcie nalotu interesy państwa są reprezentowane przez specjalistów prowadzących kontrolę przebiegu lotu i funkcjonowania aparatury obserwacyjnej, konsultują się też z załogą odnośnie wszystkich kwestii związanych z nalotem oraz pośredniczą w wymianie radiowej pomiędzy załogą samolotu a organami kontroli ruchu powietrznego. Liczba przedstawicieli oraz kontrolerów znajdujących się na pokładzie samolotu jest szczegółowo określana w postanowieniach traktatu.

Minimalna terenowa zdolność rozdzielcza jest określana przez traktat dla poszczególnych typów sensorów. Niezbędne jest wyznaczenie minimalnej wysokości lotu obserwacyjnego dla danej grupy sensorów, dla której zdolność rozdzielcza nie zostanie przekroczona [2].

#### **4. Badanie rozdzielczości lotniczych kamer cyfrowych**

Zdolność rozdzielcza zdjęć i obrazów cyfrowych jest podstawowym parametrem charakteryzującym ich właściwości. W lotniczej fotografii tradycyjnej, bazującej na wykorzystaniu filmów lotniczych, pojęcie to odnosi się do zdolności rozróżniania ilości kontrastowych par linii na milimetr (rozpoznawanie najwyższej częstotliwości przestrzennej w płaszczyźnie tłowej kamery mierzone w cyklach na

milimetr). Wielkość takiego cyklu, czyli szerokość kontrastowej pary linii (linia jasna i ciemna), określona została mianem *terenowej zdolności rozdzielczej* — GRD (ang. *Ground Resolved Distance*).

Rozdzielczość obrazu pozyskanego z wykorzystaniem cyfrowych kamer lotniczych ściśle związana jest z wymiarami pikseli, z których złożony jest dany obraz, oraz ich rozmieszczeniem w matrycy. Jest to zależność odwrotnie proporcjonalna: im mniejszy piksel, tym większa zdolność rozdzielcza obrazu (większa detaliczność obrazu). Zdolność rozdzielcza lotniczego obrazu cyfrowego charakteryzowana jest przez kąt IFOV (ang. *Instantaneous Field Of View*) lub tzw. *piksel terenowy* — GSD (ang. *Ground Sampled Distance*).

Pomiaru terenowej zdolności rozdzielczej obrazów dokonuje się poprzez sfotografowanie testów paskowych o stopniowo zmieniającej się częstotliwości przestrzennej (szerokość kontrastowych pasów). Zwykle określa się dwa rodzaje terenowej zdolności rozdzielczej (w dwóch kierunkach): zgodna z kierunkiem lotu (*along*) i poprzeczna do kierunku lotu (*across*). Terenowa zdolność rozdzielcza określana jest poprzez odnalezienie grupy pasków w teście, dla której rozróżnialne są oddzielne, kontrastowe pasy (wyróżnimy pasy jasne i pasy ciemne) zarówno wzdłuż jak i w poprzek kierunku nalotu.

Szerokość białych i czarnych pasów jest stała w obrębie jednej grupy. Szerokość pasów w grupach składających się na cel kalibracyjny zmienia się stopniowo — o wartość  $\sqrt[3]{2}$  tak, aby umożliwić pomiar rozdzielczości terenowej. Długość pasów jest jednakowa w obrębie każdej grupy. Stosunek kontrastu czarnych i białych pasów jest niezmienny w całym celu kalibracyjnym i wynosi co najmniej 5:1.

Ustalono jest, że dla misji Open Skies, w przypadku kamer optycznych, rozdzielczość terenowa nie może przekraczać 30 cm, przy najmniejszej wysokości nad poziomem terenu, która jest określana zgodnie z postanowieniami Open Skies.

## **Badanie rozdzielczości na podstawie testu paskowego**

Badanie terenowej zdolności rozdzielczej (TZR) zostało przeprowadzone na podstawie zdjęć pozyskanych z kilkunastu przelotów nad celem kalibracyjnym. Wykorzystano dwie metody badawcze: analizę wizualną oraz opracowaną w Wojskowej Akademii Technicznej specjalnie dla tego eksperymentu metodę analizy numerycznej.

Analiza wizualna polegała na wskazaniu grupy pasków celu kalibracyjnego zdecydowanie rozróżnialnej na całej swojej powierzchni (zgodnie z metodyką przyjętą w Traktacie Open Skies) przez każdego z niezależnych obserwatorów. Zgodnie z charakterystyką testu kalibracyjnego (dla 9 grupy pasków TZR wynosi 30 cm, a współczynnik zmiany wielkości poszczególnych grup pasków to  $\sqrt[3]{2}$  — rys. 4), przy wykorzystaniu metod statystycznych, wykonano wyznaczenia terenowej zdolności rozdzielczej dla całej próby badawczej. Na podstawie subiektywnych

odczytów geometrii testu kalibracyjnego w kierunku podłużnym i poprzecznym została wyznaczona empiryczna terenowa zdolność rozdzielcza —  $L_i$ .

TABELA 3A

Wyniki testów wizualnych dla kamery Z/I DMC

Nazwa cyfrowej kamery lotniczej	Wysokość fotografowania $H$ [m]	Typ zdjęcia		
		PAN	Pan — Sharpened RGB	Pan — Sharpened CIR
		Terenowa zdolność rozdzielcza [cm]		
Z/I DMC	2500	33,67	33,67	30,00
	3000	33,67	30,00	30,00
	3500	42,42	42,42	42,42

TABELA 3B

Wyniki testów wizualnych dla kamery Leica RCD-105

Nazwa cyfrowej kamery lotniczej	Wysokość fotografowania $H$ [m]	Typ zdjęcia
		RGB
		Terenowa zdolność rozdzielcza [cm]
Leica RCD-105	2500	60,00
	3000	67,35
	3500	75,60

Na podstawie zobrazowań pozyskanych z wysokości lotu — 3000 m została obliczona wartość minimalnej wysokości —  $H_{\min}$ , dla której terenowa zdolność rozdzielcza nie jest lepsza niż 30 cm, według następującego wzoru:

$$H_{\min} = H_L \frac{L}{L_i}, \quad (1)$$

gdzie:  $H_L$  — wysokość lotu, z której zostały pozyskane zobrazowania celu kalibracyjnego;  
 $L$  — wzorcowa terenowa zdolność rozdzielcza [cm];  
 $L_i$  — empiryczna terenowa zdolność rozdzielcza [cm].

W trakcie realizacji algorytmu wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej otrzymujemy  $n$  wartości minimalnej wysokości lotu obserwacyjnego (gdzie  $n$  to

ilość nalołów nad celem kalibracyjnym). Minimalna wysokość lotu obliczana jest na podstawie średniej arytmetycznej:

$$H_{\min} = \frac{1}{n} \sum_1^n H_{\min}. \quad (2)$$

TABELA 4A

Obliczona minimalna wysokość dla kamery Z/I DMC

Nazwa cyfrowej kamery lotniczej	Wysokość fotografowania [m]	Typ zdjęcia					
		PAN		Pan — Sharpened RGB		Pan — Sharpened CIR	
		$H_{\min}$ [m]	Tolerancja [%]	$H_{\min}$ [m]	Tolerancja [%]	$H_{\min}$ [m]	Tolerancja [%]
DMC	2500	2186	-19	2186	-19	2628	-3
	3000	2590	-5	2649	-2	2885	6
	3500	2378	-12	2431	-10	2490	-8

TABELA 4B

Obliczona minimalna wysokość dla kamery Leica RCD-105

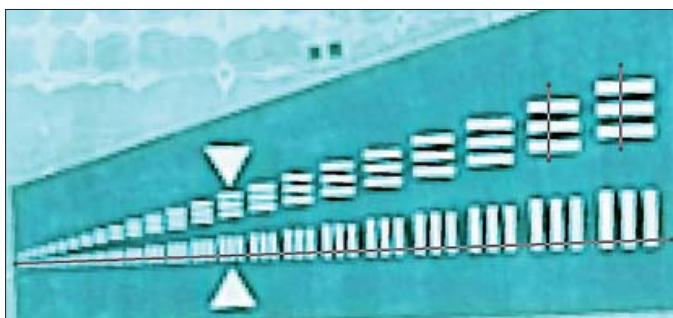
Nazwa cyfrowej kamery Lotniczej	Wysokość fotografowania [m]	Typ zdjęcia	
		RGB	
		$H_{\min}$ [m]	Tolerancja [%]
Leica RCD-105	2500	1314	-35
	3000	1383	-31
	3500	1453	-28

Kolejnym etapem wyznaczenia terenowej zdolności rozdzielczej była analiza numeryczna wykonana przy pomocy programu Erdas Imagine. Analiza numeryczna obejmowała wykreślanie profili liniowych wzdłuż testu kalibracyjnego prostopadle do jego pasków. Na podstawie analizy profili i wyników analizy wizualnej wyznaczono amplitudę DN, której osiągnięcie pozwalało na wyznaczenie terenowej zdolności rozdzielczej.

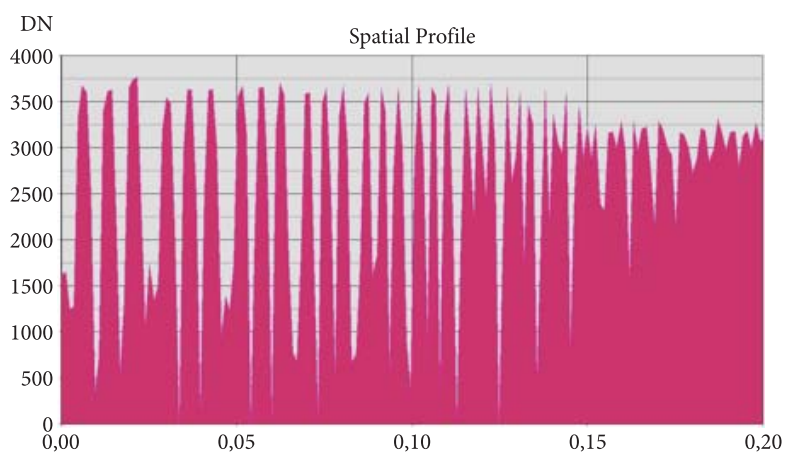
Wartości amplitud DN oraz ich błędy dla poszczególnych grup pasków celu kalibracyjnego zostały wyznaczone na podstawie odczytu wartości DN zgodnie z przedstawionym schematem (rys. 7).

Na podstawie uzyskanych wartości stwierdzono, że o terenowej zdolności rozdzielczej decyduje grupa pasków testu kalibracyjnego, dla której wartość amplitudy DN<sub>i</sub> nie jest mniejsza niż ½ DN dla danej grupy pasków.

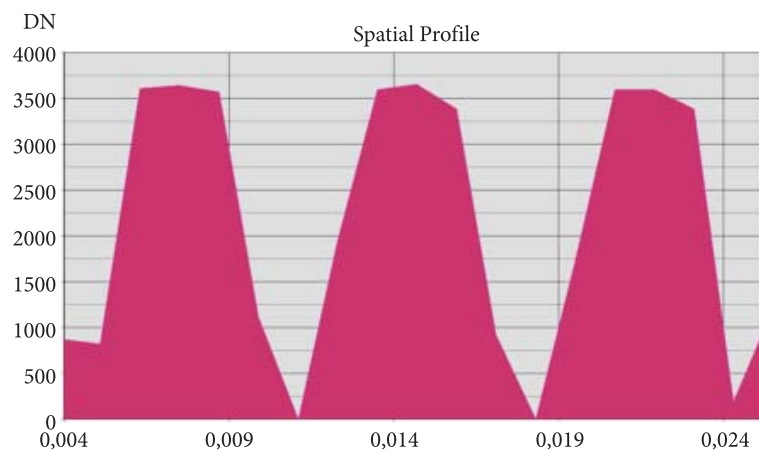




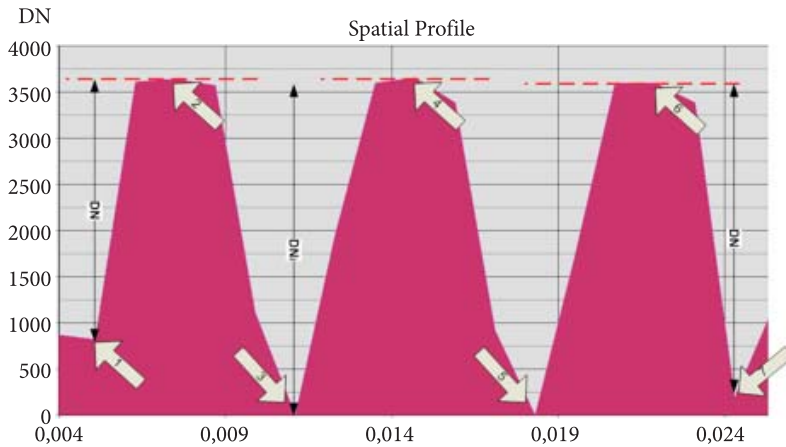
Rys. 4. Sposób wykreślenia profilu spektralnego wzdłuż i w poprzek kierunku lotu (*across*)



Rys. 5. Profil spektralny dla grup pasków położonych wzdłuż kierunku lotu (*along*)



Rys. 6. Profil spektralny dla grup pasków położonych w poprzek kierunku lotu (*across*)



Rys. 7. Schemat odczytywania wartości DN dla poszczególnych grup pasków

Wyniki uzyskane podczas analizy numerycznej, wykorzystane do wyznaczenia terenowej zdolności rozdzielczej, zostały potwierdzone przez niezależną analizę wizualną.

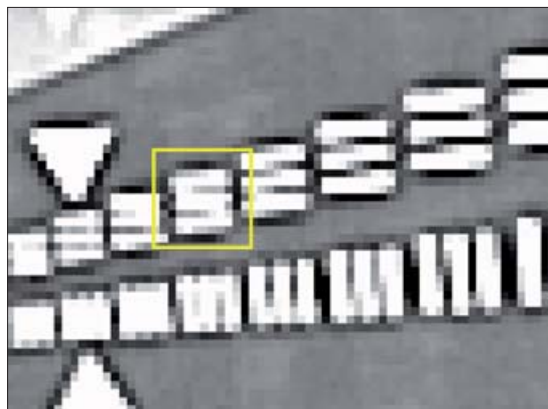
### Błędy występujące przy badaniu rozdzielczości

Po analizie otrzymanych zobrazowań, można zauważyć następujące błędy na zdjęciach celu kalibracyjnego:

1. Lokalne przesunięcie koloru, powodujące niejednorodną gęstość wzdłuż jednej grupy pasków. W wyniku tego przesunięcia zlewają się paski o tym samym kolorze, w danej grupie powstają plamy niepozwalające na rozróżnienie kontrastujących pasów (rys. 8).
2. Aliasing obrazu przejawiający się występowaniem grupy pasków o wysokim kontraście po grupie, której niski kontrast powoduje brak możliwości rozróżnienia poszczególnych pasów. Patrząc na powiększenie, można by powiedzieć, że 10 grupa pasków jest rozróżnialna, jednak w grupie 9 widać jedynie 2 białe paski, tak więc odczyt 10 grupy byłby błędny (rys. 9).
3. Aberracja chromatyczna spowodowana jest zastosowaniem filtra Bayera dla zobrazowań barwnych RGB w kamerze Leica RCD-105. Objawia się barwnymi obwódkami wokół kontrastowych obiektów (rys. 10).

## 5. Interpolacja Bayera w badaniu rozdzielczości

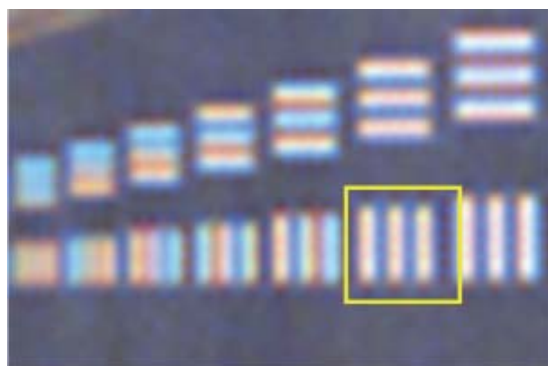
Kamera Leica RCD-105 z matrycą CCD wykorzystującą filtr Bayera pozwala na pozyskanie zobrazowań barwnych (RGB) celu kalibracyjnego.



Rys. 8. Fragment zobrażenia celu kalibracyjnego w Wright Patterson AFB

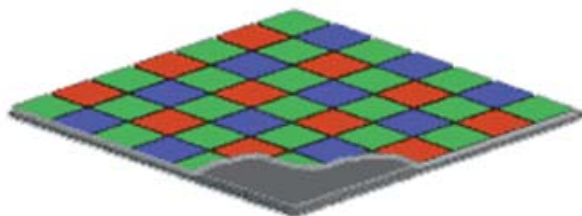


Rys. 9. Fragment zobrażenia celu kalibracyjnego w Wright Patterson AFB z zaznaczonymi numerami poszczególnych grup pasów

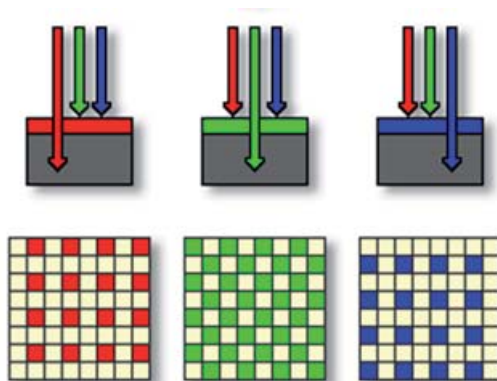


Rys. 10. Fragment zobrażenia celu kalibracyjnego w Wright Patterson AFB

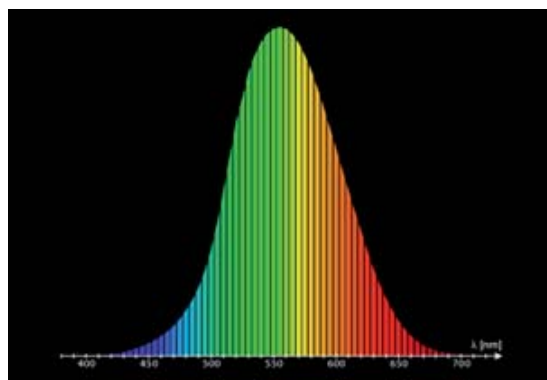
Co drugi element filtru Bayera jest zielony — tylko po 25% elementów filtru jest barwy niebieskiej i czerwonej (rys. 11). Takie ułożenie elementów filtru wynika z faktu, że ludzkie oko jest dwukrotnie bardziej czułe na światło z zakresu zieleni (ok. 550 nm) (rys. 12).



Rys. 11. Filtr mozaikowy Bayera



Rys. 12. Działanie filtru mozaikowego Bayera



Rys. 13. Uczulenie spektralne ludzkiego oka

Stosując maskę barwnych filtrów, możemy rejestrować różne barwy. Jednak dla danego piksela mamy informację tylko o jednej ze składowych koloru, dlatego też, by określić jego prawdziwy kolor, trzeba uwzględnić informację z sąsiednich pikseli. Proces interpolacji barwy realizowany jest przez kamerę cyfrową, jego dokładność zależy od zastosowanych algorytmów.

Jeden element światłoczuły matrycy (zespół sensorów rejestrujący kolorowy fragment obrazu na potrzeby jednego nieinterpolowanego piksela RGB) naświetlany jest przez rzeczywisty obszar, który zależy od kąta widzenia obiektywu, rozmiaru i rozdzielczości matrycy oraz odległości obiektu od kamery. Nigdy nie jest to teoretyczny, idealny punkt, a kwadrat bądź inna figura, jednak na zdjęciu będzie odbierany jako kwadrat o rozmiarach jednego piksela RGB, który można odnieść do fotografowanego obiektu.

Pojedynczy sensor w matrycy z interpolacją Bayera nie rejestruje koloru, tylko poziom jasności. Aby zarejestrować kolor, trzeba użyć co najmniej trzech sensorów, które będą rejestrowały kolory dla potrzeb pojedynczego piksela RGB.

W matrycach z filtrem mozaikowym Bayera znajdują się obok siebie cztery sensory tworzące kwadrat 2 na 2, które rejestrują składowe koloru RGBG — jest to element światłoczuły.

Każdy fizyczny sensor matrycy ma wpływ na kolor aż czterech sąsiednich pikseli. Powoduje to rozmycie obrazu, powstanie nowych barw i spadek rozdzielczości terenowej.

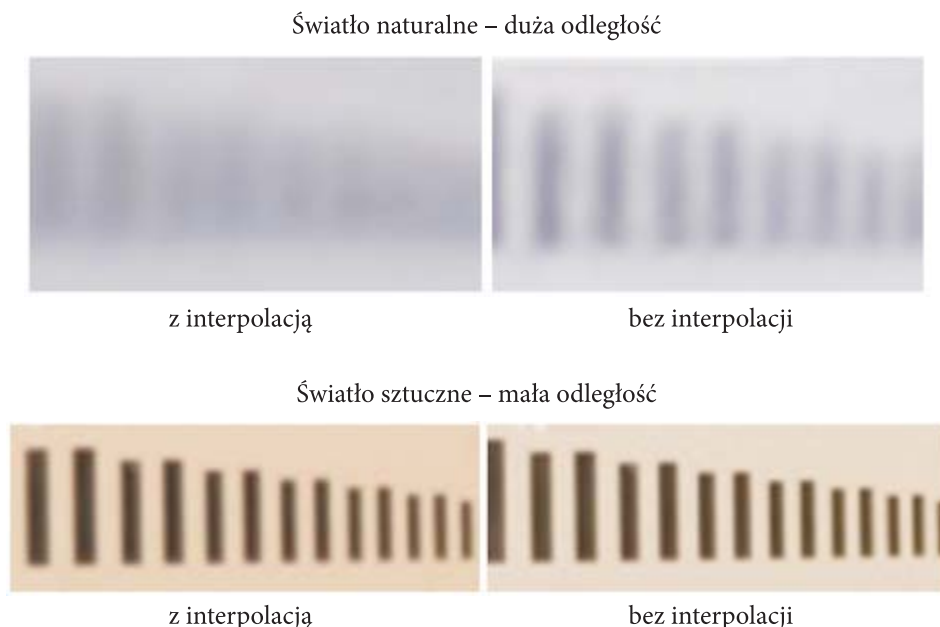
Zobrazowania pozyskane kamerą Leica RCD-105 zostały poddane procesowi interpolacyjnemu. W rezultacie otrzymano obrazy RGB o zmniejszonej terenowej rozdzielczości oraz z zafałszowanymi kolorami celu kalibracyjnego.

W celu sprawdzenia działania filtra mozaikowego Bayera oraz jego wpływu na wykonywane zobrazowania RGB zostały przeprowadzone testy przy użyciu cyfrowej lustrzanki Canon EOS 400D, w której również wykorzystywana jest matryca z filtrem mozaikowym Bayera.

Wykonano dwa rodzaje zdjęć — bez interpolacji oraz z interpolacją, w różnych warunkach (w laboratorium i przy świetle naturalnym), przy różnych odległościach oraz różnych kątach obrotu pola testowego.

W zmiennych warunkach zostały zarejestrowane pionowe i poziome czarne linie o różnych grubościach (najcieńsza zbliżona grubością do pojedynczego piksela obrazu), narysowanych na białym tle.

W przypadku zarejestrowania bardzo cienkiej linii oczekujemy, że na zdjęciu zobaczymy bardzo ostrą linię pionową o grubości jednego piksela. Nic bardziej mylnego. Ta ostra pionowa linia, ze względu na interpolację, rozmyje się i da obraz pionowego pasa o grubości aż trzech sąsiednich pikseli — pikseli przekształconych przez algorytm interpolacji. Przy czym kolor środka tego pasa o grubości trzech pikseli będzie czarny, a kolor dwóch zewnętrznych pikseli będzie szary (50% bieli tła i 50% czerni linii). W efekcie coś, co chcieliśmy zarejestrować w sposób idealnie



Rys. 14. Zdjęcia paskowego celu kalibracyjnego wykonane za pomocą cyfrowej lustrzanki Canon EOS 400D z dużej i małej odległości

ostry, wydzie rozmyte, a obszar rozmycia wyrażony w pikselach RGB będzie trzy razy większy niż linia wzorcowa.

Otrzymujemy informację, że jeden zestaw RGBG ma wpływ na kolor około trzech sąsiednich pikseli RGB w poziomie (bądź w pionie, w zależności od ułożenia celu kalibracyjnego w stosunku do matrycy). W efekcie rzeczywista rozdzielczość matrycy jest około trzy razy mniejsza.

By otrzymać linię o właściwym odwzorowaniu koloru, w założonych warunkach, linia musi mieć grubość co najmniej pięciu interpolowanych pikseli RGB. Każda linia ostra w oryginale, stanie się nieostra na zdjęciu i będzie miała łagodne przejście od koloru linii do koloru tła, wymagające co najmniej dwóch pikseli po każdej stronie.

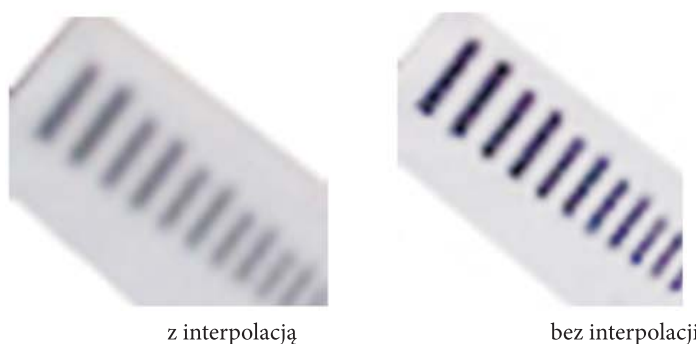
Komplikacje następują, jeśli linia lub granica obszaru nie jest ani równoległa, ani prostopadła do poziomego układu sensorów matrycy. Najgorszym przypadkiem jest położenie tej linii pod kątem  $45^\circ$  do poziomu — minimalny obszar rozmycia zwiększa się wówczas  $\sqrt{2}$ , czyli z dwóch do około trzech pikseli RGB. Przejście od koloru zbliżonego do koloru oryginalnej linii do koloru tła wymaga więc aż trzech pikseli po obu stronach tej linii.

Trzeba pamiętać również o tym, że matryca rejestruje odcienie pośrednie. Odcienie szarości z testów przeprowadzonych przy użyciu lustrzanki cyfrowej Canon EOS 400D to jedynie idealny model.

W rzeczywistości kolor każdego piksela RGB jest wyznaczany na drodze interpolacji koloru kilkunastu sąsiednich pikseli, a otrzymywany w ten sposób kolor wynikowy takiego piksela niejednokrotnie potrafi zadziwić, jak ma to miejsce w przypadku obrazowań pozyskanych przy użyciu cyfrowej kamery Leica RCD-105.

Metoda interpolacji koloru poszczególnych pikseli RGB jest więc bezpośrednią i istotną przyczyną powstawania aberracji chromatycznych w fotografii cyfrowej.

Interpolacja koloru pikseli RGB powoduje istotny spadek ostrości rejestrowanego obrazu związany z celowym rozmywaniem informacji docierających do obiektywu z zewnątrz.



Rys. 15. Zdjęcia paskowego celu kalibracyjnego wykonane za pomocą cyfrowej lustrzanki Canon EOS 400D pod kątem  $45^\circ$

## 6. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz otrzymanych materiałów można stwierdzić, że:

1. Wysokość, z której wykonywane są obrazowania, ma istotny wpływ na terenową zdolność rozdzielczą. Im większa odległość kamery od celu kalibracyjnego, tym gorsza rozdzielczość.
2. Terenowa zdolność rozdzielcza jest dużo gorsza w niebieskim i zielonym zakresie spektralnym w porównaniu do czerwonego (lub podczerwonego). Wynika to ze zmniejszenia kontrastu spowodowanego wpływem atmosfery. Jest to wynikiem rozpraszania Rayleigha, czyli rozpraszania promieniowania słonecznego na cząsteczkach o rozmiarach mniejszych od długości rozpraszanej fali.
3. Interpolacja Bayera wpływa na zmniejszenie się efektywnej liczby pikseli, co w konsekwencji powoduje zmianę barwy poszczególnych pikseli, zmniejszenie kontrastu oraz znaczne pogorszenie rozdzielczości.



4. Opracowana metoda numerycznej analizy obrazu testu paskowego pozwala na szybkie wyznaczenie TZR niezależnie od predyspozycji obserwatora. Wyniki uzyskane przy jej zastosowaniu zostały potwierdzone praktycznie.

*Artykuł wpłynął do redakcji 1.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2009 r.*

#### LITERATURA

- [1] Z. KURCZYŃSKI, *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.
- [2] *Traktat o Otwartych Przestworzach*, Helsinki, 24 marca 1992 r.
- [3] A. HINZ, C. DÖRSTEL, H. HEIER, *DMC — the digital sensor technology of Z/I imaging*, Photogrammetric week, 2001.
- [4] <http://www.leica-geosystems.com>

P. WALCZYKOWSKI, A. ORYCH, A. JENEROWICZ, K. KAWKA

#### **Determination of ground resolving power of Open Skies imagery acquired by means of digital frame cameras**

**Abstract.** When implementing the Open Skies Treaty, the precise determining of the flight altitude, at which the sensor can acquire imagery with a specific ground resolution, is crucial. The process of establishing the ground resolution is based on measurements on imagery depicting an especially designed calibration target. The object of this article is a proposed objective method of determining the resolving power of sensors based on digital imagery. Additionally, a number of image deformations have been described. These deformations can have a negative effect on the precise determining of the ground resolution

**Keywords:** ground resolving power, digital aerial sensors, Open Skies, frame camera, Bayer interpolation

**Universal Decimal Classification:** 528.7