



## Metodyka prowadzenia analizy wizualnej zobrażeń cyfrowych w celu wyznaczenia dopuszczalnej wysokości lotu dla misji Open Skies

AGATA ORYCH

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2  
aorych@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Traktat Open Skies jest międzynarodowym porozumieniem umożliwiającym jego sygnatariuszom wykonywanie nieuzbrojonych lotów obserwacyjnych nad terytorium innych państw–stron. Traktat dokładnie określa, jakie samoloty, sensory oraz filmy mogą być wykorzystywane podczas lotów obserwacyjnych. Każda konfiguracja kamery musi przejść proces certyfikacji zanim będzie mogła być wykorzystana podczas misji. Ma to na celu zapewnienie, że za pomocą konfiguracji kamery nie będzie możliwe uzyskanie zobrażeń o rozdzielczości lepszej niż ta określona przez traktat. Ponieważ terenowa zdolność rozdzielcza zależy od wysokości lotu, podczas certyfikacji należy określić minimalną dopuszczalną wysokość lotu, przy której nie zostanie przekroczona minimalna dopuszczalna terenowa zdolność rozdzielcza ( $H_{\min}$ ) dla każdej konfiguracji kamery. Proces ten wykonywany jest poprzez analizę zobrażeń specjalnie skonstruowanych celów kalibracyjnych.

Dotychczas traktat zezwalał jedynie na wykorzystywanie sensorów analogowych podczas misji obserwacyjnych. Wraz z pojawieniem się na rynku nowoczesnych rozwiązań cyfrowych rozpoczęto prace nad umożliwieniem wykorzystania tych nowych sensorów podczas misji Open Skies. Zobrazowania cyfrowe nie mogą być jednak rozpatrywane w ten sam sposób co tradycyjne zobrazowania analogowe. Sensory cyfrowe mogą spowodować występowanie pewnych artefaktów na zobrazowaniach. Te artefakty mogą spowodować niezgodne i niejednoznaczne odczyty i analizy, a co za tym idzie, niepoprawne wyznaczenie wartości  $H_{\min}$ . Dodatkowo, wpływ na wyznaczenie tej wartości może mieć sposób, w jaki obraz jest przetwarzany i wyświetlany. Zespół badawczy Wojskowej Akademii Technicznej wykonał serię testów w celu zbadania wpływu tych czynników.

**Słowa kluczowe:** Open Skies, terenowa zdolność rozdzielcza, algorytmy próbkowania, sensory cyfrowe

## 1. Wstęp

XXI wiek to niezwykle dynamiczny czas dla rozwoju wszelkiego rodzaju technologii. Używane dotychczas standardowe sposoby pozyskiwania zobrazowań oraz wykonywania klasycznych pomiarów geodezyjnych zostają wypierane przez nowoczesne technologie przyspieszające i ułatwiające pracę. Pojawienie się w 2001 roku na rynku komercyjnym pierwszej cyfrowej kamery DMC 2001 firmy Z/I Inetrgraph otworzyło nowe możliwości pozyskiwania zobrazowań Ziemi. Coraz lepsza dokładność, kartometryczność oraz szybkość pozyskiwania danych przez kamery cyfrowe zachęciła państwa–strony do ich wprowadzenia w misjach Traktatu Open Skies.

## 2. Traktat Open Skies

Traktat Open Skies (Traktat o Otwartych Przestworzach) jest międzynarodowym porozumieniem umożliwiającym jego sygnatariuszom wykonywanie nieuzbrojonych lotów obserwacyjnych nad terytorium pozostałych jego członków.

Po raz pierwszy pomysł stworzenia traktatu wysunął prezydent Dwight D. Eisenhower w 1955 roku w celu umożliwienia Stanom Zjednoczonym oraz Związkowi Radzieckiemu wzajemnego swobodnego przelotu nad swoimi terytoriami. Niestety negocjacje te nie zostały sfinalizowane. W 1989 roku prezydent George W. Bush wrócił do pomysłu, rozszerzając go o wszystkich członków NATO i Układu Warszawskiego. Po trzech latach negocjacji i zmianie stosunków politycznych po rozwiązaniu Układu Warszawskiego traktat podpisały 24 państwa–strony. 15 marca 2001 roku rząd polski ratyfikował Traktat o Otwartych Przestworzach, sporządzony w Helsinkach dnia 24 marca 1992 r. Traktat wszedł w życie 01.01.2002, czyli 60 dni po ratyfikowaniu go przez ostatnie państwa–sygnatariuszy — Białoruś i Rosję.

Celem podpisania traktatu jest umocnienie, głównie z militarne punktu widzenia, wzajemnego zrozumienia i zaufania poprzez umożliwienie jego uczestnikom samodzielnego pozyskiwania informacji o siłach zbrojnych i działaniach innych państw. Pozwala na stworzenie dodatkowych możliwości przy zapobieganiu konfliktom i opanowywaniu kryzysów. Funkcjonowanie traktatu polega głównie na przyjmowaniu pewnej liczby lotów obserwacyjnych innych państw nad własnym terytorium (kwota pasywna), jak również wykonywaniu lotów nad ich obszarami (kwota aktywna). Liczba lotów pasywnych dla każdego państwa–strony zapisana jest w aneksie A traktatu. Podział kwot aktywnych podlega corocznemu przeglądowi w ramach Komisji Konsultacyjnej Otwartych Przestworzy (OSCC — *Open Skies Consultative Commission*).

## 2.1. Loty obserwacyjne

W traktacie, jego aneksach, oraz dodatkowych decyzjach określono bardzo rygorystycznie zasady prowadzenia lotów obserwacyjnych. Traktat szczegółowo określa zasady wyboru samolotu, który ma zostać użyty podczas misji (Artykuł VI rozdz. I) oraz sposób jej planowania (Artykuł VI rozdz. II). Opisuje, kto może brać udział w misji obserwacyjnej, wyszczególnia, jakie zasady muszą być przestrzegane przez załogę znajdującą się na pokładzie oraz jak i przez kogo wykonywana jest obróbka pozyskanych obrazów (Artykuł IX).

## 2.2. Dopuszczalne sensory

Utworzone zostały 24 Decyzje, które określają wszelkie parametry, jakie powinny spełniać sensory, aby mogły być użyte w trakcie misji Open Skies. Najważniejsze wytyczne związane z parametrami sensorów zawarte są w następujących Decyzjach:

- Decyzja 3 „Optical Decision”,
- Decyzja dotycząca sensorów analogowych,
- Decyzja 7 „SAR Decision”,
- Decyzja dotycząca sensorów radarowych,
- Decyzja 16 „Calibration of ground processing equipment”,
- Decyzja opisująca metodykę kalibracji sprzętu niezbędnego do obróbki naziemnej pozyskanych zobrazowań,
- Decyzja 15 „Infrared Decision”,
- Decyzja dotycząca liniowych sensorów termalnych,
- Decyzja 14 „Video Decision”,
- Decyzja dotycząca sensorów cyfrowych,
- Decyzja 17 „Exchange Media Decision”,
- Decyzja dotycząca sposobu zapisu oraz wymiany danych obrazowych,
- „OSDDEF Decision”,
- Decyzja dotycząca formatu wymiany danych,
- „Certification Decision”,
- Decyzja dotycząca procesu certyfikacji,
- „Digital Decision”,
- Decyzja dotycząca procedur wykonywania wizualnej analizy zobrazowań cyfrowych.

Traktat jednoznacznie określa rodzaj aparatury, która może zostać użyta podczas wykonywanego lotu. Są to:

- aparaty fotograficzne, panoramiczne i kadrowe — o minimalnej dopuszczalnej terenowej zdolności rozdzielczej TZR 30 cm,
- kamery telewizyjne z monitorem, zobrazowaniem w czasie rzeczywistym — o TZR > 30 cm,

- termalne skanery liniowe — o TZR > 50 cm,
- radar obserwacji bocznej z syntetyczną aperturą — o TZR > 3 m.

Terenowa zdolność rozdzielcza definiowana jest jako najmniejsza rozróżnialna wielkość widoczna na zobrazowaniu. Terenową zdolność rozdzielczą na zobrazowaniach wykonanych z pułapu lotniczego lub satelitarnego wyznaczana się na podstawie testów paskowych o znanych wymiarach terenowych. Zdolność rozdzielczą wyznacza pole na wykorzystanym teście, w którym odróżnialne są jego poszczególne elementy.

Konfiguracja kamery, czyli każde połączenie aparatu, obiektywu, rejestratora wideo, typu taśmy magnetycznej, typu i formatu zapisu, musi zostać certyfikowana przed wykonaniem lotów w ramach misji Open Skies. Podczas certyfikacji wyznacza się wartość  $H_{\min}$ , czyli najniższą dopuszczalną wysokość lotu, przy której minimalna dopuszczalna terenowa zdolność rozdzielcza nie zostanie przekroczona. W celu wyznaczenia  $H_{\min}$  wykonuje się serię lotów testowych i certyfikacyjnych na różnych wysokościach nad specjalnie skonstruowanymi celami kalibracyjnymi.

Po wykonaniu serii lotów i po obróbce fotochemicznej filmów, wywołane materiały światłoczułe poddawane są analizie wizualnej przez grupę międzynarodowych ekspertów, którzy oceniają widoczność elementów wchodzących w skład celu kalibracyjnego na każdym zobrazowaniu. Wartość  $H_{\min}$  jest to pułap, z którego wykonano zobrazowania, na których najmniejszą rozróżnialną grupą pasków jest grupa o szerokości 30 cm.

Na dzień dzisiejszy, traktat zezwala jedynie na pozyskiwanie zobrazowań za pomocą sensorów analogowych, rejestrujących obraz na materiale światłoczułym.

## 2.1. Przyszłość misji Open Skies

Prowadzone są prace nad umożliwieniem wykorzystania sensorów cyfrowych podczas misji obserwacyjnych Open Skies. Wymaga to jednak odpowiedniego uściślenia zapisów w Decyzjach Traktatu, tak aby Strona Obserwująca nie mogła pozyskać zobrazowań cyfrowych o lepszej rozdzielczości (terenowej lub spektralnej), od tych, które byłyby zarejestrowane za pomocą sensorów analogowych.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe zobrazowanie celu kalibracyjnego wykonane za pomocą cyfrowego sensora lotniczego, spełniającego wszystkie wymogi traktatu. Na zobrazowaniu widoczne są liczne artefakty, czyli zniekształcenia na obrazie, charakterystyczne dla zobrazowań cyfrowych. Artefakty te zostały szczegółowo opisane w artykule *Wybrane problemy z wyznaczaniem zdolności rozdzielczej sensorów wykorzystywanych w ramach misji Open Skies* (P. Walczykowski, A. Orych). Zniekształcenia te są znacznym problemem, gdyż określenie terenowej zdolności rozdzielczej takiego zniekształconego zobrazowania nie jest już tak jednoznaczne i proste jak to było w przypadku sensorów analogowych.



Rys. 1. Zobrazowanie celu kalibracyjnego w *Wright Patterson Airforce Base* wykonane za pomocą cyfrowego sensora lotniczego RCD105

Specyficzny charakter zobrazowań cyfrowych wymusił wprowadzenie zmian do Decyzji Traktatu Open Skies, aby zapewnić, że każdy obserwator w taki sam sposób określi wartość  $H_{\min}$ . Badania oraz dyskusje na temat tych zmian prowadzone są przez IWGS (grupa robocza do spraw sensorów działająca przy OSCC), które pracuje nad poprawkami do Decyzji mających określić warunki wykorzystania nowoczesnych rozwiązań cyfrowych. W skład grupy wchodzi naukowcy i eksperci z dziedziny sensorów ze wszystkich 34 państw–stron.

### 3. Badania prowadzone przez IWGS

Obecnie najważniejszym zadaniem Grupy IWGS jest wprowadzenie poprawek do wybranych decyzji traktatu (Decyzja 14 oraz Decyzja 17), które umożliwią wykorzystanie sensorów cyfrowych w misjach Open Skies. Podczas spotkania roboczego w październiku 2009 r. członkowie IWGS dokonali analizy wizualnej szerokiej gamy zobrazowań celu kalibracyjnego wykonanych za pomocą różnych konfiguracji sensorów  $i$ . Do analizy wykorzystano komputery o różnych parametrach. Otrzymywane wyniki charakteryzowały się dużym rozrzutem. Strona amerykańska zaproponowała następującą listę czynników, które mogą mieć wpływ na rozdzielczość zobrazowań i mogą być one odpowiedzialne za duże rozbieżności w odczytach dokonanych przez poszczególnych obserwatorów:

- monitor i karta graficzna komputera, na którym wykonywana jest analiza,
- różnica pomiędzy celami dwupaskowymi a trójpaskowymi,
- algorytm interpolacyjny w przypadku kamer z filtrem Bayera,
- cele ustawiane pod kątem  $45^\circ$  mogą dać lepsze wyniki,
- różnice w oprogramowaniu — m.in. algorytmy powiększania obrazu,
- odległość pomiędzy poszczególnymi grupami pasków,
- wartości otrzymywane z lotów wykonanych 15% powyżej i poniżej  $H_{\min}$  teoretycznego,

h) umiejscowienie celu w obszarze łączenia obrazów (*stitching and stacking*) w przypadku kamer typu DMC 2001.

Część problemów została przeanalizowana przez zespół Strony Amerykańskiej. Reprezentacja Wojskowej Akademii Technicznej zadeklarowała, że podejmie się wykonania badań pozostałych czynników:

TABELA 1

Czynniki mające wpływ na dokładność wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej

Czynnik	Pozycja IWGS
Monitor i karta graficzna	Badania przeprowadzone na WAT
Rozdzielczość monitora	Badania przeprowadzone na WAT
Cele dwupaskowe a trójpaskowe	Badania przeprowadzone przez USA
Interpolacja Bayera	Badania przeprowadzone przez USA
Cele pod kątem 45°	Badania przeprowadzone na WAT
Różnice w oprogramowaniu	Badania przeprowadzone na WAT
Odległość pomiędzy poszczególnymi grupami pasków	Badania przeprowadzone przez USA
Loty 15% powyżej i poniżej $H_{\min\_teoretyczna}$	Badania niezbędne
Łączenie obrazów ( <i>stitching and stacking</i> )	Badania przeprowadzone na WAT

Badania wykonane przez zespół WAT podzielono na dwa etapy:

- Etap 1 — badania parametrów komputera na którym wykonywana jest analiza  
Badane parametry:
  - rodzaj monitora,
  - karta graficzna,
  - rozdzielczość monitora,
  - badanie usytuowania celu w kadrze.
  - orientacja celu.
- Etap 2 — badania możliwości oprogramowania, na którym wykonywana jest analiza  
Badany parametr — algorytm przepróbkowania.

### 3.1. Dane wejściowe

Loty testowe wykonane w bazie Wright Patterson AFB w Stanach Zjednoczonych wykonano na czterech różnych wysokościach lotu: 2704 m, 3004 m, 3005 m oraz 3504 m. Dla każdej z tych wysokości wykonano po pięć przelotów, uzyskując pięć zdjęć testów dla jednej wysokości. Wszystkie zdjęcia wykonano przy nadirowym położeniu kamery. Dodatkowo na wysokości 3504 m wykonano zobrazowanie przy wychyleniu 7,5° oraz 15° od nadiru.

Pomiary zostały przeprowadzone na celu kalibracyjnym składającym się z 23 trójpaskowych grup usytuowanych wzdłuż i w poprzek lotu. Szerokość oraz długość białych i czarnych pasów jest stała w obrębie jednej grupy. Szerokość pasów w grupach zmienia się stopniowo — o wartość  $\sqrt[3]{2}$  w zakresie od 5 do 75 cm.

Do analizy wykorzystano zdjęcia panchromatyczne (PAN), w barwach naturalnych (RGB) oraz obrazy spektrostrefowe (CIR).

### 3.2. Wykorzystane sensory

#### 3.2.1. DMC2001

Firma Z/I Imaging, która stworzyła kamerę DMC, zastosowała koncepcję modułowej prostokątnej matrycy. Umieszczona jest w płaszczyźnie tłowej w miejscu, gdzie wcześniej znajdował się materiał światłoczuły. Dla uzyskania zobrażenia o lepszej jakości zastosowano cztery moduły panchromatyczne, które łącznie dają wysokorozdzielczy obraz panchromatyczny. Dodatkowo kamera wyposażona jest w cztery pojedyncze moduły spektralne (czerwony, zielony, niebieski, bliska podczerwień).

#### 3.2.2. ADS-40

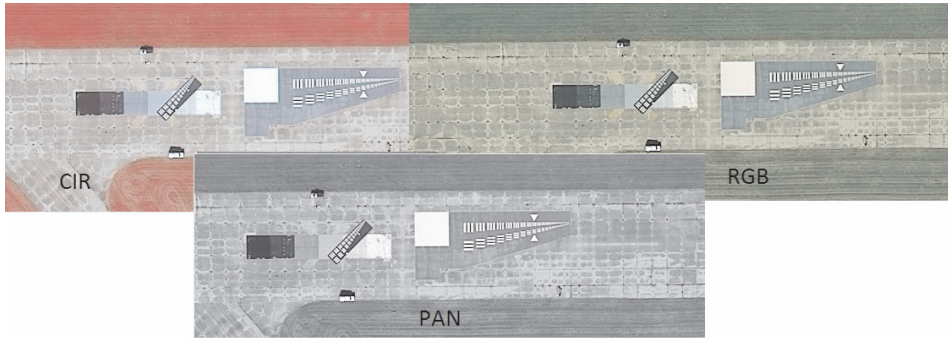
Jedną z ciekawszych konstrukcji proponuje Leica Geosystems, producent kamery ze skanerem liniowym obrazującym powierzchnię Ziemi w zakresie panchromatycznym oraz czterech kanałach spektralnych (niebieski, zielony, czerwony oraz podczerwień) i w trzech kierunkach (wstecz, w nadirze, w przód).

#### 3.2.3. RCD105

Jest to średnioformatowa cyfrowa kamera lotnicza o rozdzielczości 39 megapikseli. Kamera jest w stanie pozyskać zobrażenia PAN, RGB oraz CIR. Zobrażenia barwne pozyskiwane są za pośrednictwem filtra Bayera, w którym co czwarty piksel rejestruje ilość promieniowania niebieskiego padającego na matrycę, co czwarty czerwone promieniowanie i co drugi zielone. Pozostałe wartości natężenia promieniowania są interpolowane (co jest często źródłem błędów i przekłamań na zdjęciach).

### 3.3. Etap 1

Analizy dokonano z pomocą grupy 108 studentów Wojskowej Akademii Technicznej, co umożliwiło uzyskanie prawie 2000 pomiarów wartości  $H_{\min}$ . Obserwatorzy dokonali odczytów terenowej zdolności rozdzielczej (wartość  $L_i$ ) zgodnie z wytycznymi zawartymi w Decyzjach Traktatu Open Skies na sprzęcie komputerowym o zróżnicowanych parametrach. Wykorzystano komputery zarówno z monitorami LCD jak i CRT o różnych rozdzielczościach, kartami graficznymi firm ATI, NVIDIA i INTEL o różnych parametrach. Dokonano analizy zobrażeń na różnych wysokościach, celów o różnych orientacjach i o różnym usytuowaniu celu w kadrze.



Rys. 2. Zobrazowania wykorzystane podczas analizy

Tak duża próbka danych umożliwiła dokonanie szczegółowych i wiarygodnych analiz statystycznych. Dla każdej próbki obliczono wartość  $H_{\min}$  oraz stosunek obliczonej wartości  $H_{\min}$  do  $H_{\min\_teoretyczna}$ . Następnie dla każdego zestawu parametrów obliczono:

- średnią wartość  $H_{\min}$
- średnią wartość ilorazu wartości  $H_{\min}$  do wartości  $H_{\min\_teoretyczna}$ ,
- wartości minimalne i maksymalne wartości  $H_{\min}$ ,
- rozpiętość pomiędzy wartością maksymalną i minimalną wartości  $H_{\min}$ ,
- odchylenie standardowe dla danej próbki,

Odchylenie standardowe dla wszystkich badanych próbek wynosiło poniżej 0,1, tak więc uznano wyniki za poprawne.

### 3.3.1. Rodzaj monitora

Aby wyznaczyć różnice w odczytach wykonanych przy użyciu różnych monitorów z każdego pasa, wyznaczono maksymalną i minimalną odczytaną grupę rozdzielczą, policzono średnią arytmetyczną oraz odchylenie standardowe dla tych pomiarów. Na ich podstawie policzono wartość  $L_p$ , czyli średnią arytmetyczną z pięciu pasów zobrazowania,  $H_{\min}$  oraz stosunek  $H_{\min}$  do  $H_{\min\_teoret}$ .

Testy przeprowadzone podczas określania rozdzielczości zdjęć lotniczych wykazały, że mimo znacznej różnicy w budowie i dokładności odwzorowania barw dla obu typów monitorów nie stwierdzono znacznych różnic w wynikach. Ze względu na bardzo dużą powszechność występowania monitorów LCD liczba próbek badawczych wyniosła 261, przy tylko 11 dla monitorów starszej generacji — CRT. Jednak nawet ta liczba daje podstawę do wnioskowania, że rodzaj monitora użytego do interpretacji zdjęć nie wpływa na prawidłowość pomiarów. Różnica pomiędzy obliczonymi średnimi wysokościami minimalnymi dla obu typów monitorów sięga jedynie 47 m. W związku z tym można uznać, że typ monitora nie wpływa na poprawność określenia rozdzielczości.



TABELA 2

Średnie pomiary wartości  $L_i$  oraz obliczone wartości  $H_{\min}$ 

11 obserwacji na monitorach CRT		$L(i)$	$H_{\min}$	% $H_{\min}$ calc
	śr.	<b>29,82</b>	<b>3043,08</b>	<b>101</b>
max.	36,24	3325,41	111	
min.	24,39	2728,76	91	
max.-min.	11,85	596,65	20	
$\sigma$	3,46	159,05	0,05	
261 obserwacji na monitorach LCD		$L(i)$	$H_{\min}$	% $H_{\min}$ calc
	śr.	<b>30,61</b>	<b>3090,22</b>	<b>103</b>
	max.	43,57	3582,09	119
	min.	22,77	2412,45	80
	max.-min.	20,80	1169,64	39
	$\sigma$	4,18	243,59	0,08

### 3.3.2. Karta graficzna

Ze względu na analogowy charakter monitora istnieje konieczność zamiany sygnału cyfrowego na analogowy, za co odpowiedzialna jest karta graficzna. Analogicznie jak dla monitorów LCD i CRT obliczono średnią wysokość minimalną dla każdej z 3 grup kart graficznych podzielonych pod względem producenta.

TABELA 3

Średnie pomiary wartości  $L_i$  oraz obliczone wartości  $H_{\min}$ 

200 obserwacji na kartach graficznych ATI		$L(i)$	$H_{\min}$	% $H_{\min}$ calc
	śr.	<b>30,91</b>	<b>3081,43</b>	<b>103</b>
	max.	43,46	3582,09	119
	min.	23,29	2418,78	81
	max.-min.	20,17	1163,31	39
	$\sigma$	4,15	243,49	0,08
25 obserwacji na kartach graficznych INTEL		$L(i)$	$H_{\min}$	% $H_{\min}$ calc
	śr.	<b>29,48</b>	<b>3094,46</b>	<b>103</b>
	max.	36,24	3562,58	119
	min.	22,77	2663,22	89
	max.-min.	13,47	899,36	30
	$\sigma$	3,81	228,12	0,08

cd. tabeli 3

47 obserwacji na kartach graficznych NVIDIA		$L(i)$	$H_{\min}$	$\% H_{\min \text{ calc}}$
	śr.	<b>29,76</b>	<b>3114,36</b>	<b>104</b>
	max.	43,57	3429,22	114
	min.	23,81	2412,45	80
	max.-min.	19,76	1016,78	34
	$\sigma$	4,18	238,37	0,08

### 3.3.3. Rozdzielczość monitora

Rozdzielczość określa liczbę pikseli obrazu wyświetlanych na ekranie monitora i jest jednym z parametrów trybu wyświetlania. Wartość tę wyraża się w postaci liczby pikseli w poziomie i pionie. Nie jest to rozdzielczość wyświetlacza, ale rozdzielczość obrazu na tym wyświetlaczu. Najpopularniejszą rozdzielczością spotykaną w laptopach jest  $1440 \times 900$  pikseli. Oznacza to, że obraz może zostać wyświetlony za pomocą 1 296 000 pikseli. Większość wykonanych pomiarów wartości  $L_2$  (najmniejsza rozdzielcza grupa pasków) została odczytana na monitorach o rozdzielczości  $1440 \times 900$  — 175 próbek, 57 odczytów dla rozdzielczości  $1280 \times 800$  oraz dla rozdzielczości  $1024 \times 768$  jedynie 10.

TABELA 4

Średnie pomiary wartości  $L_i$  oraz obliczone wartości  $H_{\min}$ 

175 obserwacji $1440 \times 900$ Px		$L(i)$	$H_{\min}$	$\% H_{\min \text{ calc}}$
	śr.	<b>30,90</b>	<b>3097,43</b>	<b>103</b>
	max.	43,46	3582,09	119
	min.	23,29	2418,78	81
	max.-min.	20,17	1163,31	39
	$\sigma$	4,14	239,66	0,08
57 obserwacji $1280 \times 800$ Px		$L(i)$	$H_{\min}$	$\% H_{\min \text{ calc}}$
	śr.	<b>30,21</b>	<b>3082,28</b>	<b>103</b>
	max.	43,57	3483,04	116
	min.	23,29	2412,45	80
	max.-min.	20,28	1070,59	36
	$\sigma$	4,24	236,13	0,08
10 obserwacji $1024 \times 768$ Px		$L(i)$	$H_{\min}$	$\% H_{\min \text{ calc}}$
	śr.	<b>28,45</b>	<b>3118,67</b>	<b>104</b>
	max.	35,32	3406,97	114
	min.	23,81	2551,67	85
	max.-min.	11,51	855,30	29
	$\sigma$	3,63	280,70	0,09

Wartości  $L_i$  obliczone z uśrednienia pomiarów otrzymanych z zobrażeń pozyskanych na jednej wysokości pokazują, że rozdzielczość monitora nie ma wpływu na wartość odczytów. Różnica dla obliczonego  $H_{\min}$  przy użyciu rozdzielczość  $1400 \times 900$  oraz  $1280 \times 800$  jest praktycznie niezauważalna i wynosi jedynie 15,15 m, a różnica dla rozdzielczości  $1440 \times 900$  i  $1024 \times 768$  to również jedynie 21,24 m. Można zatem przyjąć, że typ użytej rozdzielczości monitora nie wpływa na poprawność otrzymanych wyników.

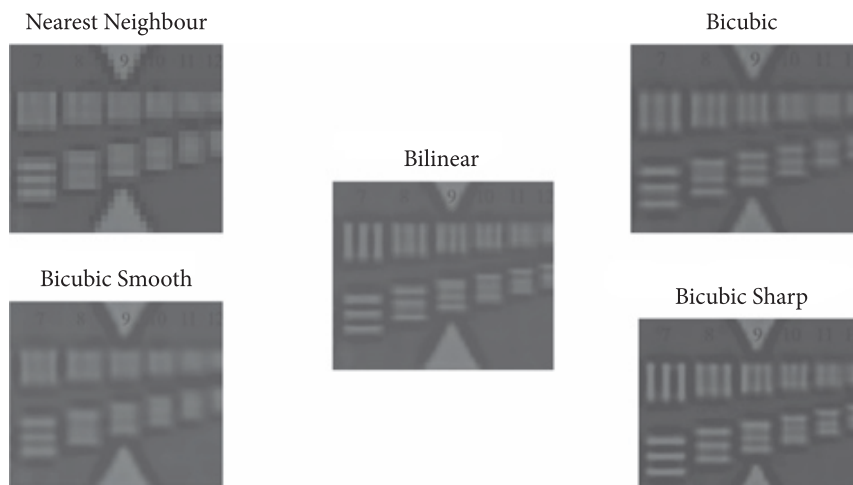
### 3.4. Etap 2

Badania wykonano na podstawie zobrażeń celu kalibracyjnego w Wright Patterson Airforce Base. Poddano analizie pięć różnych algorytmów na podstawie zobrażeń pozyskanych za pomocą dwóch różnych sensorów — Z/I DMC-2001 oraz Leica RCD-105.

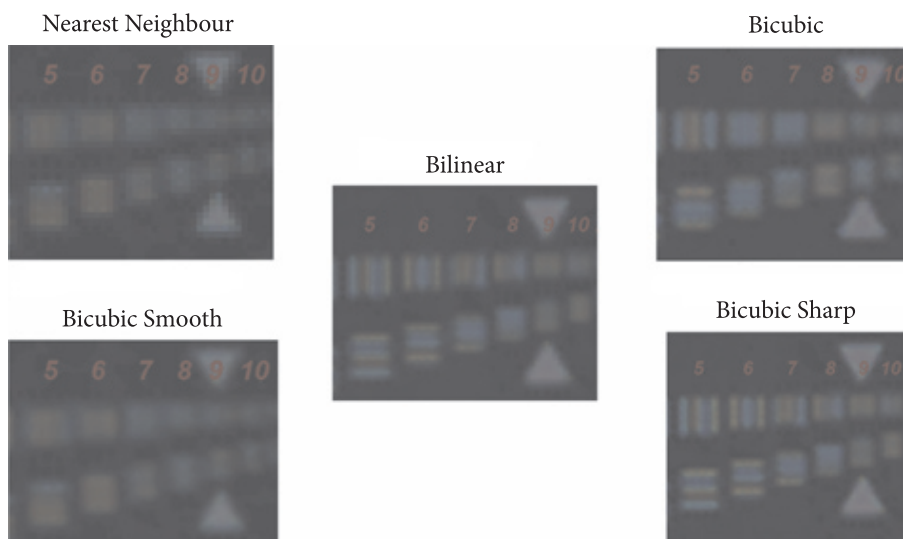
Odczyty wykonane przez 160 studentów Wojskowej Akademii Technicznej dały w sumie 5291 pojedynczych pomiarów. Żądane powiększenie (1200%) obrazów do analizy uzyskano, stosując pięć algorytmów przetwarzania: *nearest neighbour*, *bilinear*, *bicubic*, *bicubic smooth* oraz *bicubic sharp*. Wszystkie obrazy zostały przeanalizowane na tych samych komputerach i za pomocą tego samego oprogramowania — ImageJ. Na podstawie wykonanych analiz uzyskano poniższe wyniki:

Leica RDC ( $H_{\min \text{ calc}} = 2013 \text{ m}$ )				Z/I DMC-2001 ( $H_{\min \text{ calc}} = 3000 \text{ m}$ )			
Metoda	$H_{\min}/H_{\min \text{ calc}} - 1 [\%]$			Metoda	$H_{\min}/H_{\min \text{ calc}} - 1 [\%]$		
Bicubic	0		6	Bicubic	3		8
Bicubic sharpened	-1		6	Bicubic sharpened	6		11
Bicubic smoothed	1		5	Bicubic smoothed	0		9
<b>All bicubic</b>	<b>0</b>	do	<b>6</b>	<b>All bicubic</b>	<b>3</b>	do	<b>9</b>
Bilinear	-4		3	Bilinear	-3		5
Nearest neighbour	-6		-4	Nearest neighbour	-3		1

Wyniki pomiarów uzyskane w WAT wywołały dyskusje, których wynikiem była propozycja następującego zapisu w Decyzji opisującej wymagania stawiane oprogramowaniu, na którym wykonywana jest analiza wizualna plików obrazowych Open Skies: Zoom. *Oprogramowanie ma umożliwiać powiększanie (obrazu) przez replikację pikseli, cubic convolution lub obie te metody.*



Rys. 3. Analizowane zobrazowania DMC-2001 powiększone dziesięciokrotnie za pomocą pięciu algorytmów



Rys. 4. Analizowane zobrazowania RCD-105 powiększone dziesięciokrotnie za pomocą pięciu algorytmów

#### 4. Wnioski

Badania przeprowadzone przed zespół WAT spotkały się z dużym zainteresowaniem i uznaniem wśród członków IWGS. Wojskowa Akademia Techniczna dysponuje potencjałem badawczym oraz zapleczem laboratoryjnym niezbędnym do prowadzenia tego typu badań w ramach pracy IWGS.

Analiza wartości uzyskanych podczas badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- Średni stosunek wartości  $H_{\min}/H_{\min\_teoretyczna}$  dla wszystkich przeanalizowanych rozdzielczości wynosił od 100% do 104%. Są to różnice niewielkie i dopuszczalne.
- Średni stosunek wartości  $H_{\min}/H_{\min\_teoretyczna}$  dla monitorów typu CRT wynosił 101%, zaś dla LCD 103%. Są to różnice niewielkie i dopuszczalne.
- Średni stosunek wartości  $H_{\min}/H_{\min\_teoretyczna}$  przy różnych kartach graficznych wynosił 103-104%. Są to różnice niewielkie i dopuszczalne.
- Orientacja celu kalibracyjnego ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $90^\circ$ ) nie ma istotnego wpływu na wyznaczenie wartości  $H_{\min}$  (103-105%).
- Usytuowanie celu w kadrze (w nadirze,  $7^\circ$  od nadiru i  $15^\circ$  od nadiru) nie ma istotnego wpływu na wyznaczenie wartości  $H_{\min}$  (100-105%).
- Wpływ algorytmu przepróbkowania obrazu na wyznaczoną wartość  $H_{\min}$  jest niewielki (94%-106% dla DMC2001 i 101%-111% dla RCD105) i pomijalny, gdyż mieści się w założeniach Traktatu (lot można wykonać na wysokości  $\pm 15\%$  od  $H_{\min}$ ).

Wyniki badań uwzględnione zostały przy tworzeniu nowej wersji decyzji 14. dotyczącej aparatury obserwacyjnej w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni, jak również w decyzjach dotyczących przetwarzania oraz zapisu plików obrazowych. Wraz z zakończeniem prac nad nowymi decyzjami i ich uchwaleniem przez OSCC w czerwcu 2010 r., IWGS rozpoczął pracę nad decyzjami dotyczącymi sensorów radarowych i termalnych. Zespół z Wojskowej Akademii Technicznej zamierza brać czynny udział w dyskusjach i badaniach, które umożliwią wykorzystywanie sensorów cyfrowych podczas misji Open Skies.

Artykuł wpłynął do redakcji 5.07.2010 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w sierpniu 2010 r.

#### LITERATURA

- [1] Z. SITEK, *Wprowadzenie do teledetekcji lotniczej i satelitarnej*, wyd. II, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Kraków, 2002.
- [2] Traktat Open Skies wraz z Decyzjami.
- [3] R. SANDAU, *Design Principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor*, XIX Kongres, tom I, Amsterdam, 2000.
- [4] <http://www.leica-geosystems.pl/>

#### A. ORYCH

##### **The methodology of conducting visual analysis of digital imagery when determining the minimal height above ground level for Open Skies missions**

**Abstract.** The Treaty on Open Skies is an international agreement, which enables its signatories to perform unarmed observation flights over the territory of other State-Parties. The Treaty states very clearly what

aircraft, sensors and films can be used during an observation flight. All camera configurations must pass a certification process before they are allowed to be used during observation missions. This is to ensure, that the camera configuration will not enable the Observing Party to obtain imagery which is of better resolution than that stated by the Treaty. According to the Treaty, frame and video sensors registering imagery in the visible and close infrared regions of the electromagnetic spectrum, can acquire imagery with a ground resolution no better than 30 cm. Because ground resolution is dependent on the height of the flight, a minimal allowed flying height ( $H_{min}$ ) at which the minimal resolution will not be exceeded must be determined for each configuration during certification. This is done by analyzing a series of images of specially constructed calibration targets.

Up till now, the Treaty has only allowed for analogue sensors to be used during such observation flights. The 21st century has seen an extremely dynamic development in modern technologies. Traditional techniques which have been used to acquire imagery are now being pushed out by more modern solutions. The appearance of the DMC-2001 sensor in 2001 has opened new doors in the image acquisition and interpretation world. Such new sensors are now being considered by State-Parties, signatories of the Open Skies Treaty. However, imagery obtained from digital sensors cannot be regarded in the same way as traditional analogue imagery. Digital sensors can cause certain artifacts to appear on imagery. These artifacts can lead to inconsistent and ambiguous readings and analyses, in turn leading to incorrect determining of the  $H_{min}$  value. Additionally, it has to be tested, whether the way in which an image is processed and displayed, can have any effect on the determination of this very important value. A research team at the Military University of Technology in Warsaw has performed a number of tests in order to analyze the affect of some of these factors.

**Keywords:** Open Skies, ground resolution, resampling algorithms, digital sensors