



## Wybrane problemy wyznaczania zdolności rozdzielczej sensorów wykorzystywanych w ramach misji Open Skies

PIOTR WALCZYKOWSKI, AGATA ORYCH

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

**Streszczenie.** Precyzyjne wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej sensorów jest kluczowym problemem przy pozyskiwaniu obrazowań z pułapu lotniczego, zwłaszcza w ramach traktatu Open Skies. Ustalono w nim minimalną, dopuszczalną, terenową zdolność rozdzielczą dla poszczególnych rodzajów sensorów. Ponieważ rozdzielczość terenowa większości rodzajów sensorów jest uzależniona od ich wysokości nad odwzorowywanym terenem, konieczne jest wyznaczenie minimalnej wysokości lotu obserwacyjnego, na której dozwolona rozdzielczość terenowa nie zostanie przekroczona. W tym celu wykonuje się przeloty i pozyskuje obrazowania nad specjalnie skonstruowanymi celami kalibracyjnymi. Na pozyskanych obrazowaniach mogą występować pewne błędy, artefakty, mające wpływ na poprawność wyznaczania zdolności rozdzielczej. W przypadku badań w zakresie widzialnym błędy spowodowane są przeważnie pracą sensora oraz sposobem rejestracji danych. W przypadku sensorów termalnych, dodatkowym elementem mogącym wprowadzać błędy są same cele kalibracyjne. W Zakładzie Teledetekcji i Fotogrametrii WAT prowadzone są obecnie prace nad stworzeniem nowych celów kalibracyjnych, których konstrukcja będzie minimalizowała te błędy.

**Słowa kluczowe:** teledetekcja, terenowa zdolność rozdzielcza, Open Skies

**Symbol UKD:** 528.7

### 1. Wstęp

Traktat Open Skies jest międzynarodowym porozumieniem zawartym pomiędzy 34 państwami–stronami, którego celem jest umocnienie wzajemnego zrozumienia i zaufania z militarne go punktu widzenia, poprzez umożliwienie uczestnikom, niezależnie od wielkości ich terytorium, samodzielnego pozyskiwania informacji o siłach zbrojnych i działaniach państw stanowiących obiekt ich zainteresowania. Traktat ustala rygorystyczne zasady prowadzenia nieuzbrojonych lotów obserwa-

cyjnych nad terytorium jego uczestników oraz ściśle definiuje rodzaje sensorów, jakie mogą być wykorzystane podczas lotów obserwacyjnych.

## 2. Sensory wykorzystywane w ramach traktatu Open Skies

Samoloty i aparatura obserwacyjna przeznaczone do wykonywania tych lotów przechodzą szczegółowy proces atestacji pod nadzorem międzynarodowej komisji, aby zapewnić, że aparatura obserwacyjna nie ma większej rozdzielczości od tej określonej traktatem. Według traktatu, „wysokość lotu samolotu obserwacyjnego nad powierzchnią Ziemi nie może pozwolić stronie obserwującej na przekroczenie ograniczeń rozdzielczości terenowej aparatury obserwacyjnej zgodnie z postanowieniami artykułu IV ustęp 2”, czyli w przypadku sensorów pozyskujących zobrazenia w zakresie widzialnym, „rozdzielczość terenowa nie może przekraczać 30 centymetrów przy najmniejszej wysokości lotu nad poziomem terenu”, a w zakresie podczerwonym — 50 cm. Taka rozdzielczość pozwoli na ogólne wykrycie oraz identyfikację obiektów, lecz uniemożliwi dokonanie szczegółowego opisu oraz analizy technicznej obserwowanego terenu. Na dzień dzisiejszy traktat zezwala jedynie na pozyskiwanie zobrażeń za pomocą sensorów analogowych, rejestrujących obraz na materiale światłoczułym. Prowadzone są rozmowy 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 zobrażeń cyfrowych o lepszej rozdzielczości (terenowej lub spektralnej) od tych, które byłyby zarejestrowane za pomocą sensorów analogowych. Według proponowanej aktualizacji *Decyzji 14*, będącej załącznikiem do traktatu Open Skies (dot. aparatury obserwacyjnej w zakresie widzialnym i bliskim podczerwieni), dozwolone byłoby wykonywanie lotów obserwacyjnych z wykorzystaniem następujących sensorów:

1. wykorzystujących filtr „Bayera” (bez ograniczeń odnośnie zakresów spektralnych poszczególnych elementów filtra);
2. pozyskujących zobrazenia w oddzielnych kanałach (zarówno skanery liniowe jak i kamery kadrowe), które spełniają następujące warunki:
  - 2.1. Wartość środkowa zakresu wynosi:  $0,47 \pm \Delta\lambda \mu\text{m}$  (dla kanału niebieskiego) i/lub  $0,547 \pm \Delta\lambda \mu\text{m}$  (dla kanału zielonego) i/lub  $0,635 \pm \Delta\lambda \mu\text{m}$  (dla kanału czerwonego).
  - 2.2. Szerokość zakresu  $D\lambda$  dla każdego kanału nie może przekraczać czterokrotnego odchylenia wartości środkowej tego kanału od nominalnej długości fali dla danego kanału (niebieski —  $0,47 \mu\text{m}$ , zielony —  $0,547 \mu\text{m}$  i czerwony —  $0,635 \mu\text{m}$ ). Oznacza to, że szerokość zakresu każdego kanału musi spełniać zależność  $D\lambda \geq 4 \Delta\lambda$ . Dla przykładu, jeśli sensor pozyskuje zobrazenia w zakresie niebieskim, przy środkowej

długości fali  $\lambda = 0,50$ , wartość  $D\lambda$  powinna wynosić przynajmniej  $4 \cdot 0,03 = 12 \mu\text{m}$ . Tak więc najwęższy zakres promieniowania elektromagnetycznego, jaki może być rejestrowany przez sensor spełniający wymagania traktatu, wynosi od  $0,38 \mu\text{m}$  do  $0,62 \mu\text{m}$ .

Zgodnie z nowym zapisem, zabronione byłoby wykonywanie zobrazowań za pomocą sensorów zaprojektowanych w sposób umożliwiający uzyskiwanie rozdzielczości lepszej niż ta określona wielkością elementu sensora (rozdzielczość subpikselowa). Przykładem tego typu sensorów są skanery typu *pushbroom* z kilkoma linijkami detektorów pozyskujących promieniowanie w jednym paśmie, przesuniętych względem siebie w kierunku prostopadłym do kierunku skanowania.

### 3. Terenowa zdolność rozdzielcza oraz metody jej wyznaczania

Terenowa zdolność rozdzielcza definiowana jest jako najmniejsza rozróżnialna wielkość widoczna na zobrazowaniu. W fotografii analogowej mówi się o terenowej zdolności rozdzielczej (GRD — ang. *Ground Resolved Distance*) w znaczeniu częstotliwości powierzchniowej ( $k$ ), gdzie  $k$  podane jest w parach linii na milimetr (gdzie para linii to jedna czarna i jedna biała linia). Wzajemny stosunek pomiędzy rozdzielczością ( $r$ ) i częstotliwością powierzchniową obrazu ( $k$ ) jest następujący:

$$k = 1 / r \text{ (ilość par linii(PL)/mm)}. \quad (1)$$

W przypadku sensów cyfrowych, oprócz pojęcia GRD, zobrazowania opisane są parametrem GSD (ang. *Ground Sampling Distance*), czyli częstością próbkowania terenu równą iloczynowi mianownika skali zobrazowania ( $m_{ob}$ ) i wielkości piksela ( $Px$ ):

$$GSD = m_{ob}Px. \quad (2)$$

Do celów rozpoznania obrazowego wykorzystuje się tylko rozdzielczość GRD, gdyż GSD nie określa wyraźnie jakości zobrazowania, lecz jest jedynie miarą wielkości piksela w terenie.

W rozpoznaniu obrazowym wyróżnia się pięć podstawowych poziomów jakościowych informacji obrazowej:

1. Wykrycie — odkrycie obecności obiektu, jego zlokalizowanie.
2. Ogólna identyfikacja — ustalenie klasy obiektu.
3. Precyzyjna identyfikacja — dokładne przyporządkowanie obiektu do danego typu.
4. Opis — wymiary, wyposażenie, szczegóły konstrukcyjne.
5. Analiza techniczna — dokładna analiza specyficznego wyposażenia.

Poniższa tabela przedstawia przybliżone wartości rozdzielczości zobrazowania [m] wymagane do użytecznej analizy celów naziemnych.

TABELA 1

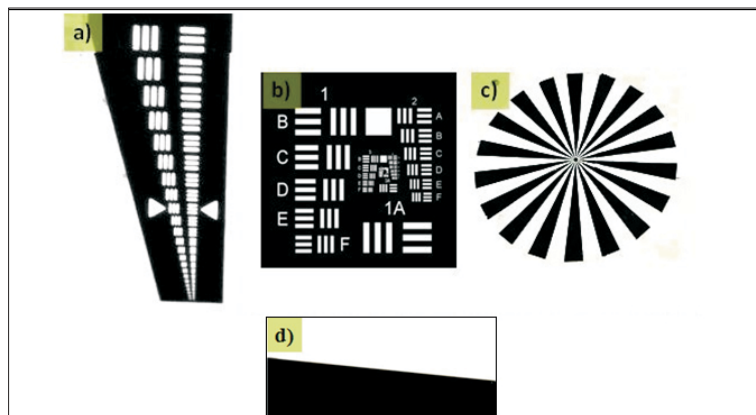
Rozdzielczości zobrazowania [m] wymagane do użytecznej analizy celów naziemnych

Obiekt	Wykrycie	Identyfikacja		Opis	Analiza techniczna
		Ogólna	Precyzyjna		
Mosty	6	4,5	1,5	1	0,3
Stacje radiolokacyjne	3	1-1,5	0,3	0,15	0,015
Infrastruktura lotniskowa	6	4,5	3	0,3	0,15
Rakiety i artyleria	1	0,6	0,15	0,05	0,045
Samoloty	4,5	1,5	1	0,15	0,045
Wyrzutnie pocisków	3	1,5	0,6	0,3	0,045
Okręty i łodzie podwodne	10-30	4,5-6	0,6-1,5	0,3-1	0,3-0,045
Broń atomowa	2,5	1,5	0,3	0,03	0,0015
Pojazdy	1,5	0,6	0,3	0,06	0,0045
Pola minowe	3-9	6	1	0,03	n/a
Porty morskie	30	15	6	3	0,3
Infrastruktura kolejowa	15-30	15	6	1,5	0,4
Drogi	10-20	5	1	0,6	0,4
Tereny zurbanizowane	60	30	3-5	1	0,75
Teren	90+	30-90	4,5	1,5	0,75

Terenową zdolność rozdzielczą sensorów umieszczonych na platformach lotniczych wyznacza się przy wykorzystaniu specjalnie skonstruowanych celów kalibracyjnych. Obiekty te określone są odpowiednimi wymiarami zewnętrznymi oraz odbiciowymi charakterystykami częstotliwościowo-przestrzennymi. Zazwyczaj obiekty tego typu buduje się w formie płaskiej, modułowej konstrukcji, tworzonej z elementarnych płaszczyzn składowych, rozkładanej na odpowiednio wybranej powierzchni. Powierzchnia ta powinna być płaska (równoległa do powierzchni elementów światłoczułych sensora) i zapewniać stabilność rozkładanych testów. Wykorzystuje się testy o różnych rozmiarach i kształtach, między innymi:

- testy paskowe w postaci układu pól o zmniejszających się wymiarach (rys. 1a),
- testy paskowe typu „USAF 1951” (rys. 1b),

- testy w postaci gwiazdy Siemens (rys. 1c),
- testy na podstawie przekoszonej krawędzi (rys. 1d).



Rys. 1. Testy kalibracyjne: a) test paskowy; b) test paskowy „USAF 1951”; c) test kalibracyjny w postaci gwiazdy Siemens; d) przekoszona krawędź

Ważny jest nie tylko kształt i rozmiar testu, lecz również jego kolor i tworzywo, z jakiego został wykonany. W przypadku celów wykorzystywanych do badania sensorów rejestrujących promieniowanie widzialne, układane są cele, dla których stosunek kontrastu pomiędzy elementami białymi a czarnymi wynosi przynajmniej 1:5 (modulacja 0,66). Wykonując testy sensorów termalnych, szuka się kontrastu nie w barwie, lecz w temperaturze radiacyjnej poszczególnych elementów. Dlatego też cele termalne produkuje się z materiałów o różnych współczynnikach emisyjności (cele pasywne) lub o różnych temperaturach kinetycznych (podgrzewane — cele aktywne).

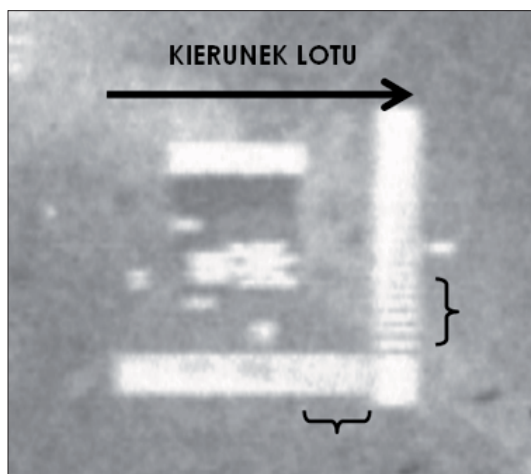
Badanie zdolności rozdzielczej sensorów dla potrzeb Open Skies wykonuje się poprzez analizę widoczności poszczególnych elementów specjalnie skonstruowanych i wyłożonych celów zarejestrowanych na zobrazeniach lotniczych pozyskanych na różnych wysokościach lotu. Taka metodyka powinna pozwolić na określenie minimalnego pułapu lotu, na którym dopuszczalna zdolność rozdzielcza na zobrazeniach nie zostanie przekroczona ( $H_{\min}$ ). W praktyce jednak na pozyskanych zobrazeniach występuje seria błędów mających negatywny wpływ na wyznaczaną rozdzielczość, a zarazem uniemożliwiających poprawne określenie wartości  $H_{\min}$ .

#### 4. Błędy występujące na pozyskanych zobrazeniach

Błędy występujące na zobrazeniach testów kalibracyjnych uzależnione są od rodzaju wykorzystanego sensora.

#### 4.1. Kadrowe sensory analogowe

Artefaktem najczęściej występującym na analogowych zobrazowaniach pozyskanych za pomocą kamery kadrowej jest rozmycie obrazu wzdłuż linii lotu, spowodowane brakiem systemu kompensacji poruszenia samolotu (FMC — ang. *Forward Motion Compensation*). Na takich zobrazowaniach istnieje możliwość określenia rozdzielczości na podstawie celów ustawionych w poprzek linii lotu, natomiast elementy celów ustawionych wzdłuż linii lotu nie będą rozróżnialne.



Rys. 2. Wycinek zdjęcia lotniczego pozyskanego podczas lotu obserwacyjnego strony ukraińskiej w kwietniu 2009 za pomocą analogowej kamery kadrowej AFA-41/7,5

#### 4.2. Sensory cyfrowe

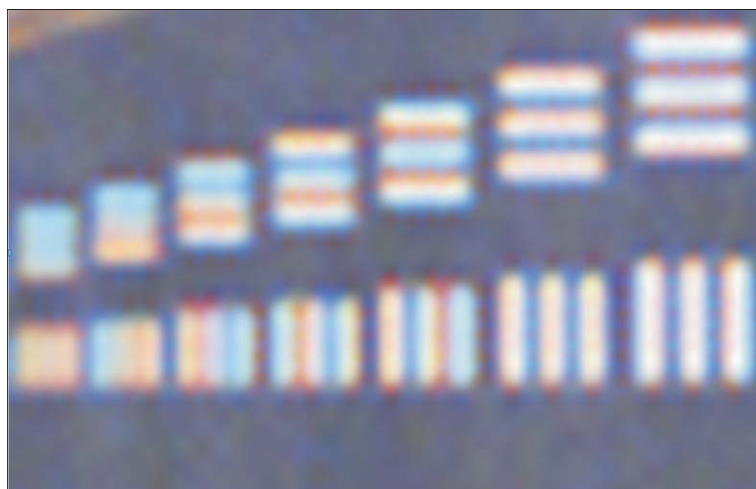
Na zobrazowaniach pozyskanych za pomocą sensorów cyfrowych występuje szereg błędów, między innymi:

- błędy spowodowane interpolacją barw w sensorze wykorzystującym filtr Bayera;
- blooming;
- aliasing.

##### 4.2.1. Błędy spowodowane interpolacją barw w sensorze wykorzystującym filtr Bayera

Sensory wykorzystujące filtr Bayera nie pozyskują bezpośrednio informacji dotyczącej barwy obrazowanego obiektu. Nad każdym detektorem (pikselem)

umieszczony jest czerwony, niebieski lub zielony filtr. Na powierzchni całej matrycy znajduje się po 25% pikseli rejestrujących czerwoną i niebieską składową światła oraz 50% pikseli rejestrujących promieniowanie zielone, równomiernie rozłożonych na całej jej powierzchni. Taki układ filtrów podyktowany jest czułością spektralną oka ludzkiego, które jest dwukrotnie bardziej czułe na promieniowanie zielone, niż czerwone i niebieskie. Wynikowy kolor piksela wyznaczany jest na podstawie odpowiednio ważonej interpolacji z wartości zarejestrowanych przez sąsiadujące piksele. Jeśli kamera miałaby zarejestrować jednolicie czerwony obiekt, sygnał ładunkowy nie byłby stworzony jedynie przez piksele z czerwonym filtrem, lecz przez wszystkie sąsiadujące piksele: czerwone, zielone i niebieskie.



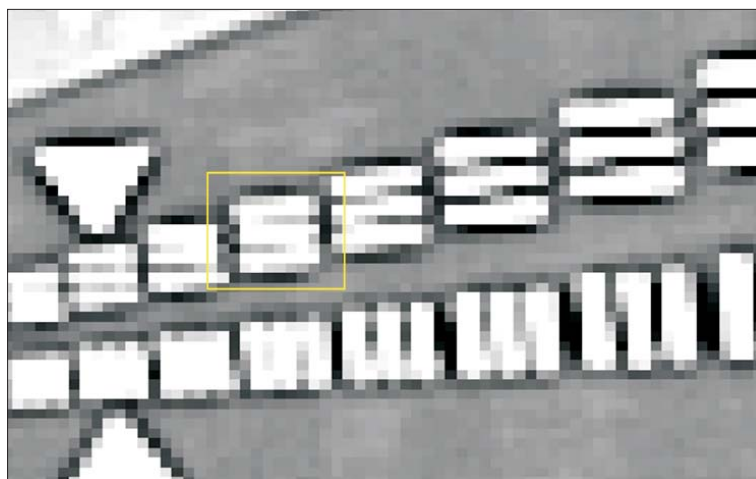
Rys. 3. Zobrazowanie celu kalibracyjnego w bazie lotniczej Wright Patterson pozyskane za pomocą cyfrowej kamery kadrowej z filtrem Bayera — Leica RCD-105. Na obrazowaniu widoczna jest błędna interpolacja kolorów

#### 4.2.2. Blooming

Obraz cyfrowy na matrycy CCD powstaje na skutek akumulacji elektronów w studni potencjału każdego piksela, czyli tak zwanym obszarze zubożenia. Każdy taki obszar ma taką samą pojemność, wprost proporcjonalną do ilości odcieni szarości, jaką może zarejestrować dany detektor (rozdzielczość radiometryczna). W przypadku gdy na piksel pada duża ilość światła, w studni potencjału gromadzi się duża ilość ładunków, dając w wyniku wysoką wartość DN (ang. *Digital Number*), czyli jasny element na obrazie końcowym. Przy bardzo dużym natężeniu padającego promieniowania, kiedy w studni potencjału akumuluje się więcej ładunków, niż jest ona w stanie pomieścić, nadliczbowe ładunki prze-



mieszczają się do sąsiadujących, ciemniejszych pikseli. Proces ten nazywany jest *bloomingiem* i jest podstawową przyczyną niskiej rozdzielczości rozświetlonych obszarów na obrazach.



Rys. 4. Zobrazowanie celu kalibracyjnego w bazie lotniczej Wright Patterson pozyskane za pomocą cyfrowej kamery kadrowej Z/I DMC-2001. Na obrazowaniu występuje blooming

Większość nowoczesnych urządzeń obrazujących CCD zawiera poprzeczny *overflow drain*, czyli w przENOŚNI „rynnę”, która odprowadza nadliczbowe ładunki, zapobiegając rozmyciu się obrazu.

#### 4.2.3. Aliasing

Przy sensorach o regularnym rozmieszczeniu komórek niemożliwe jest rozróżnienie szczegółów obrazowych o częstotliwości powierzchniowej  $k_i \leq 0,5k_s$  gdyż byłoby to niezgodne z twierdzeniem Nyquista o próbkowaniu. Stwierdza ono, że próbkowanie jakiegokolwiek sygnału, który ma częstotliwość powierzchniową ( $k_i$ ) bliską częstotliwości próbkowania ( $k_s$ ), stwarza modulacje intensywności w wyświetlanym obrazie w formie zjawiska potocznie nazywanego aliasingiem. Zjawisko to jest najbardziej oczywiste wokół i powyżej limitu Nyquista i powstaje, ponieważ maksymalne i minimalne wartości intensywności na obrazie (czyli w przypadku celu kalibracyjnego — poszczególne pasy celu) nie zawsze w pełni pokrywają się z elementem sensora. Przykładem aliasingu jest występowanie „schodków” na liniach ukośnych lub obrzeżach brył w obrazach cyfrowych. Istnieje możliwość zmniejszenia występowania aliasingu na obrazie, dzięki wykorzystaniu filtrów antyaliasingowych podczas pozyskiwania obrazów.



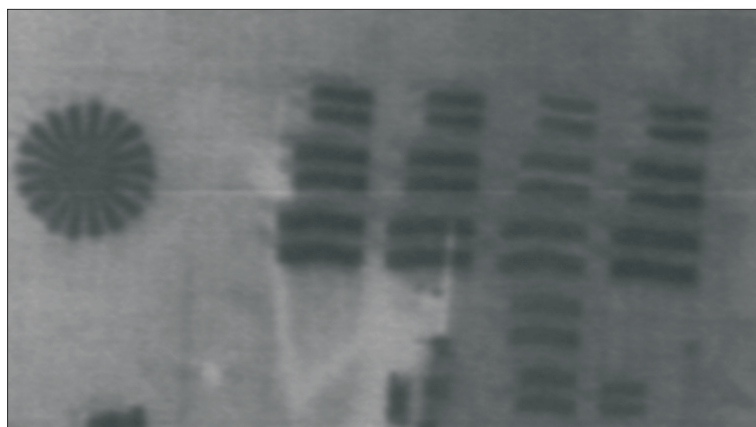


Rys. 5. Zobrazowanie celu kalibracyjnego w bazie lotniczej Wright Patterson pozyskane za pomocą cyfrowej kamery kadrowej Z/I DMC-2001. Na zobrazowaniu występuje aliasing

Opisane powyżej błędy występują zarówno w przypadku cyfrowych sensorów kadrowych jak i skanerów liniowych.

#### 4.3. Skanery liniowe

Skanery liniowe, zarówno cyfrowe jak i analogowe, charakteryzują się błędami związanymi z geometrią obrazu. Ponieważ obraz w przypadku skanerów liniowych pozyskiwany jest linijka po linijce, występują minimalne przesunięcia pomiędzy



Rys. 6. Zobrazowanie celów kalibracyjnych w bazie lotniczej w Eskisehir, Turcja, uzyskane za pomocą analogowego termalnego skanera liniowego AAD-5. Na zobrazowaniu widoczne są zniekształcenia geometryczne

poszczególnymi linijkami. Powoduje to zakrzywianie się odcinków prostych, co w rezultacie może zadecydować o poprawności wyznaczania zdolności rozdzielczej sensora, zwłaszcza na podstawie Gwiazdy Siemens.

#### 4.4. Sensory termalne

Przy badaniu sensorów termalnych wykorzystuje się cele zarówno aktywne (podgrzewane), jak i pasywne (zbudowane z materiałów o różnej emisyjności). Aktywne cele kalibracyjne charakteryzują się możliwością zmiany ich emisyjności. Podgrzewanie testu możliwe jest dzięki zastosowaniu elementów grzewczych wewnątrz materiału, z którego wykonane są cele. Wytworzenie tego typu aktywnego celu kalibracyjnego jest kosztowne, ponieważ wymaga od producenta wykonania systemu grzewczego, który będzie dawał nie tylko żadaną temperaturę, ale jednocześnie zapewniał jednolity rozkład temperatury na całej powierzchni celu. Utrzymanie stałej temperatury radiacyjnej w warunkach polowych jest sprawą niezwykle złożoną.

Podgrzewane cele aktywne mogą spowodować ocieplenie się mas powietrza i gleby wokół testu, co spowoduje, że na obrazie zostanie zarejestrowana temperatura wyższa od rzeczywistej.

Problemy te nie występują, gdy do wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej wykorzystywane są cele pasywne. W tym przypadku jednak bardzo istotnym jest odpowiednie dobranie tworzywa, z którego wykonany zostanie cel. Jeśli powierzchnia jest błyszcząca, będzie odbijała duże ilości promieniowania słonecznego (lub innego źródła światła) i będzie bardzo czuła na kąt padania tego światła. Może to spowodować nierównomierny rozkład temperatury radiacyjnej na jej powierzchni oraz zmiany w temperaturze (a zarazem w kontraście i wyznaczonej zdolności rozdzielczej) w zależności od pory dnia, wraz z ruchem słońca.

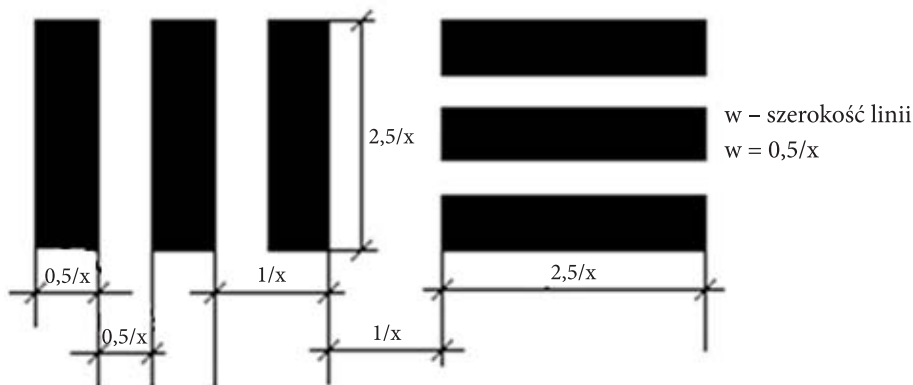
Z tego samego powodu istotne jest wykonanie całej powierzchni celu (elementu) z jednolitego materiału, aby zminimalizować różnice w temperaturze radiacyjnej powstające na powierzchni celu.

## 5. Cele kalibracyjne zaprojektowane na WAT

W ramach prac naukowych oraz współpracy z Departamentem Wojskowych Spraw Zagranicznych, zespół Zakładu Teledetekcji i Fotogrametrii WAT zaprojektował i wytworzył szereg celów kalibracyjnych, dla sensorów rejestrujących zarówno promieniowanie widzialne, jak i termalne.

W 1995 roku w Zakładzie Rozpoznania Obrazowego WAT, pod kierownictwem profesora Wiesława Dębskiego, opracowano i wykonano cel kalibracyjny przeznaczony do wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej sensorów rejestru-

jących promieniowanie widzialne. Konstrukcję nośną stanowią ramy wykonane z kształtowników aluminiowych, do nich przymocowano blachy aluminiowe, na powierzchnię których naniesiono technikami malarskimi odpowiednio zwymiarowany wzór dwupaskowy (rys. 7) o specjalnie dobranej kontrastowości pomiędzy pasami jasnymi i ciemnymi.



Rys. 7. Wymiarowanie grupy pasków celu kalibracyjnego WAT do badania terenowej zdolności rozdzielczej sensorów rejestrujących promieniowanie w zakresie widzialnym

Szerokość i długość czarnych i białych pasków jest stała w obrębie jednej grupy, zaś szerokość pasków w grupach składających się na cel kalibracyjny zmienia się stopniowo wg współczynnika  $\sqrt{2}$ . Pomiar widmowego współczynnika odbicia pasów jasnych i ciemnych na celu kalibracyjnym w zakresie od 350 nm do 1050 nm wykonane połowym spektrometrem Field Spec Open Skies potwierdziły, że dobór farb na wykonanie celu kalibracyjnego był prawidłowy. W całym badanym zakresie spektralnym współczynniki odbiciowe są jednakowe.

Na podstawie pomiarów odbicia promieniowania przez pasy jasne i ciemne celu kalibracyjnego wykazano niezmienność wartości widmowego współczynnika odbicia w zależności od kąta obserwacji w zakresie od 0 do  $60^\circ$ , co świadczy o równomiernym dyfuzyjnym rozproszeniu światła w całym zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni.

Rezultaty badań parametrów technicznych celu kalibracyjnego podane powyżej zostały potwierdzone przez grupę ekspertów zagranicznych uczestniczących w misjach Open Skies.

Cele te zostały wykorzystane podczas misji obserwacyjnej strony ukraińskiej 24 kwietnia 2009 r., która badała zdolność rozdzielczą najnowszej produkcji filmów IP42Ł. Cele zostały rozłożone na stadionie WAT wzdłuż i w poprzek linii lotu samolotu. Podczas przelotu nad celem wykonano serię zdjęć za pomocą analogowej

kamery kadrowej AFA-41/7,5 z wysokości 1100 m nad terenem. Wysokość ta to zakładana wartość  $H_{\min}$ , czyli pułap lotu samolotu, przy którym rozdzielczość terenowa pozyskanego zobrazowania powinna wynosić 30 cm. Na podstawie pozyskanych zobrazowań stwierdzono, iż rozdzielczość filmu jest znacznie niższa, tak więc przyjęta wartość  $H_{\min}$  była za wysoka.

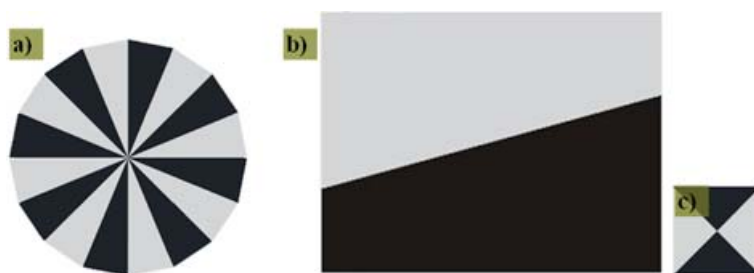
TABELA 2

## Geometria celu kalibracyjnego

Grupa pasków	Szerokość [cm]	Długość [cm]	GRD [cm]
19	5,95	29,76	11,90
18	6,68	33,41	13,36
17	7,5	37,50	15,00
16	8,42	42,09	16,84
15	9,45	47,25	18,90
14	10,61	53,03	21,22
13	11,91	59,53	23,82
12	13,36	66,68	26,72
11	15,0	75,00	30,00
10	16,84	84,18	33,68
9	18,9	94,49	37,80
8	21,21	106,07	42,42
7	23,81	119,08	47,62
6	26,73	133,63	53,46
5	30,00	150,00	60,00
4	33,67	168,37	67,34
3	37,80	188,99	75,60
2	42,43	212,13	84,86
1	47,62	238,11	95,24

Obecnie prowadzone są ostatnie prace konstruktorskie przy tworzeniu zestawu nowych celów kalibracyjnych, które będą wykorzystane do testowania obu rodzajów sensorów. Zestaw składa się z trzech rodzajów celów:

- gwiazda Siemens'a składająca się z 16 sektorów o promieniu 2,5 m (rys. 8a), co daje zewnętrzną krawędź każdego sektora równą 1 m. Cel zostanie wykorzystany do określania terenowej zdolności rozdzielczej zarówno metodą subiektywną jak i obiektywną;
- przekoszona krawędź o wymiarach  $6,3 \times 8,5$  m (rys. 8b). Cel zostanie wykorzystany do określania terenowej zdolności rozdzielczej metodą obiektywną;
- 6 czterosektorowych kwadratów o boku 1 m (rys. 8c). Cel ten zostanie wykorzystany do wyznaczania podstawowych parametrów lotu i pracy sensora.



Rys. 8. Schemat budowy najnowszych celów kalibracyjnych WAT: a) gwiazda Siemens'a, b) przekoszona krawędź, c) test do wyznaczania parametrów lotu i pracy skanera

Na szczególną uwagę zasługuje zestaw sześciu czterosektorowych kwadratów. Po odpowiednim przestrzennym rozmieszczeniu celów w terenie oraz na podstawie pomiaru odległości pomiędzy nimi na obrazie, możliwe jest określenie parametrów lotu oraz pracy skanera liniowego. Metodykę ich wyznaczania szczegółowo opisano w artykule *Numerical Analysis Of Whiskbroom Type Scanner Images For Assessment Of Open Skies Test Flights* (Dębski et al., 2008b).

Cele zostały wykonane z dwóch rodzajów tkanin — czarnej bawełny oraz włókna szklanego, które jest z jednej strony białe, a z drugiej pokryte folią aluminiową. Cele zostały zszyte w sposób umożliwiający ich wykorzystanie dla sensorów widzialnych (strona czarno-biała) jak i termalnych (strona czarno-aluminiowa). Materiały te zostały dokładnie przebadane, dla potwierdzenia, że spełniają wymagania traktatu odnośnie kontrastu pomiędzy poszczególnymi elementami celu w obu badanych zakresach. Badania spektrometryczne potwierdziły, że obie tkaniny mają stałe współczynniki odbicia w zakresie  $350\text{-}1050\ \mu\text{m}$ .

Praktyczne badania terenowe, które są przewidziane na przełom czerwca i lipca 2009, potwierdzą przydatność nowych celów do precyzyjnego wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej sensorów lotniczych. Dodatkowo, podczas homologacji samolotu CASA w ramach traktatu Open Skies w Turcji w sierpniu

2009 r., przewidywane są badania naziemne oraz w locie nowych celów z użyciem skanera termalnego AAD-5.

Opisana metodyka wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej sensorów oraz kwalifikacji obrazowań pozyskanych za pomocą skanera liniowego, wykorzystanych do wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej, pozwoli na rozszerzenie zakresu urządzeń wykorzystywanych do realizacji traktatu i jest autorską myślą techniczną pracowników Zakładu Teledetekcji i Fotogrametrii WAT.

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

#### LITERATURA

- [1] W. DĘBSKI, J. JASIŃSKI, P. WALCZYKOWSKI, *A method of assessment of aircraft flight and AAD-5 thermal scanner performance parameters by means of Polish target images analysis*, Vienna, 04.12.2006, <http://www.osce.org/oscedel>
- [2] W. DĘBSKI, J. JASIŃSKI, P. WALCZYKOWSKI, *Selected issues of geometrical quality assessment of thermal images acquired by means of whiskbroom scanner*, Polish Journal of Environmental Studies, 16, 2B; the 2<sup>nd</sup> conference on Application of Modern Satellite, Aerial and Ground Images for Needs of Country Defense and National Economy, Podlesie, 14-15.06.2007.
- [3] W. DĘBSKI, P. WALCZYKOWSKI, A. ORYCH, *Selected problems with determining the ground resolution of thermal sensors*, Polish Journal of Environmental Studies, 17, 1C; the 3<sup>rd</sup> conference on Application of Modern Satellite, Aerial and Ground Images for Needs of Country Defense and National Economy, Serock, 11-13.06.2008.
- [4] W. DĘBSKI, P. WALCZYKOWSKI, *Numerical analysis of whiskbroom type scanner images for assessment of Open Skies test flights*, The XXI Congress The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Pekin, 3-11.06.2008.
- [5] R. GRAHAM, A. KOH, *Digital Aerial Survey — Theory and Practice*, Whittles Publishing, Anglia, 2002.
- [6] Z. KURCZYŃSKI, *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.

P. WALCZYKOWSKI, A. ORYCH

#### **Selected problems with determination of resolving power of sensors used during Open Skies missions**

**Abstract.** The precise determination of resolving power of sensors is a key problem especially when establishing which sensors can be used for Open Skies missions. The Treaty on Open Skies dictates the lowest acceptable resolving power of sensors which can be used during observation flights. Because the resolving power of most sensors differs with the height of the sensor above the terrain, it is essential to determine the minimal flying altitude, at which the permitted spatial resolution will not be exceeded. A series of test flights above especially constructed calibration targets is conducted in order to acquire imagery of these tests at different altitudes. The spatial resolution of these images is determined by evaluating the visibility of each of the components of these calibration targets. In theory, such a methodology would allow for the precise calculation of the resolving power.

In reality, however, the acquired images can be burdened with a number of artifacts, or deformities, which can have a negative effect on accuracy of our calculations. When acquiring imagery in the visible range, these errors are usually caused by the detector itself or by the method by which the data is registered. However, imagery in the thermal range can additionally contain errors caused by the design of the calibration targets used.

In recent years, at the Department of Remote Sensing and Photogrammetry at the Military University of Technology in Warsaw, we have designed and constructed a number of calibration targets used during Open Skies missions. One such target had been recently laid out during a Ukrainian observation flight over Polish territories. The aim of the experiment was to establish the resolving power of a new Ukrainian film. A series of images had been acquired by means of the AFA-41/7.5 analogue frame camera from a height of 1100 m. This height is the theoretical  $H_{min}$  for this film, meaning the spatial resolution of imagery acquired from this altitude, will be close to 30 cm. Based on imagery acquired during this flight, it had been established that the spatial resolution of the resultant imagery is much worse than 30 cm, which means that the chosen  $H_{min}$  value had been too high.

We are currently in the process of constructing a new set of calibration targets, whose design will minimize the aforementioned errors. Additionally, the targets have been designed in such a way, that they will be used for determining the spatial resolution of both thermal and optical sensors. The effectiveness of these new targets will be tested shortly.

**Keywords:** remote sensing, spatial resolution, Open Skies

**Universal Decimal Classification:** 528.7



