

WYZNACZANIE TERENOWEJ ZDOLNOŚCI ROZDZIELCZEJ SENSORÓW CYFROWYCH W OPARCIU O CELE KALIBRACYJNE

DETERMINING THE GROUND RESOLVED DISTANCE FOR DIGITAL SENSORS USING CALIBRATION TARGETS

Agata Orych, Piotr Walczykowski

Zakład Teledetekcji i Fotogrametrii, Wojskowa Akademia Techniczna

SŁOWA KLUCZOWE: teledetekcja, interpretacja zdjęć, terenowa zdolność rozdzielcza, sensory cyfrowe, cele kalibracyjne

STRESZCZENIE: Jednym z najistotniejszych parametrów opisujących jakość i przydatność interpretacyjną satelitarnych i lotniczych obrazów teledetekcyjnych jest ich rozdzielczość przestrzenna. Zobrazowania o dobrej rozdzielczości terenowej umożliwią interpretatorowi dokonanie dokładniejszej analizy i bardziej szczegółowego rozpoznania niżeli byłoby to możliwe na podstawie obrazów o niższej rozdzielczości.

W przypadku sensorów cyfrowych możemy rozróżnić dwa parametry opisujące rozdzielczość powierzchniową obrazów: GRD (Ground Resolved Distance) i GSD (Ground Sampling Distance). GSD jest to częstość próbkowania i określa jedynie wielkość piksela w terenie. Parametr GRD jednak określa najmniejszą wielkość, jaka może zostać rozróżniona na zobrazowaniu. Terenowa zdolność rozdzielcza wyznaczana jest na podstawie specjalnie skonstruowanych testów kalibracyjnych. Testy te przyjmują szereg kształtów, form i rozmiarów. Cechują się zróżnicowanym kontrastem pomiędzy poszczególnymi elementami.

Cele kalibracyjne wykorzystywane były od wielu lat do wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej sensorów analogowych. Najnowsze badania rozdzielczości sensorów cyfrowych wykonane na podstawie tych samych tradycyjnych celów kalibracyjnych pokazały, iż niektóre tradycyjne cele nie są odpowiednie. W celu poprawnego zbadania rozdzielczości sensorów cyfrowych niezbędne są pewne zmiany w konstrukcji takiego celu. Wartości GRD wyznaczone na podstawie istniejących celów obarczone są dużymi błędami spowodowanymi artefaktami występującymi na pozyskanych obrazach. Wynika to ze sposobu, w jaki promieniowanie rejestrowane jest przez detektor cyfrowy.

Zespół Zakładu Teledetekcji i Fotogrametrii WAT przeprowadził serię doświadczeń, które pozwoliły na określenie optymalnych parametrów celu kalibracyjnego, który służyłby do wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej sensorów cyfrowych. Dodatkowo badania pozwoliły na opisanie metodyki prowadzenia analizy wizualnej pozyskanych obrazów. W badaniach tych przeanalizowano parametry specyficzne dla obrazów cyfrowych.

1. ZDOLNOŚĆ ROZDZIELCZA SENSORA

Miarą jakości sensorów teledetekcyjnych i fotogrametrycznych są ich rozdzielczości. Powszechnie rozróżnia się cztery rodzaje rozdzielczości:

- rozdzielczość przestrzenna – czyli jak małe elementy jest sensor w stanie zarejestrować, tak aby były one rozróżnialne przez interpretatora;
- rozdzielczość radiometryczna – czyli za pomocą ilu odcieni szarości zarejestrowany został obraz;
- rozdzielczość spektralna – czyli które zakresy promieniowania elektromagnetycznego zostały zarejestrowane przez sensor;
- rozdzielczość czasowa – czyli z jaką częstotliwością wykonywane są zobrażenia tego samego obszaru.

Rozdzielczość przestrzenna jest miarą niezbędną przy określaniu jakości zobrażeń oraz ich pojemności interpretacyjnej. Im mniejsze elementy jesteśmy w stanie rozróżnić na zobrażowaniu, tym więcej informacji jesteśmy w stanie z tego zobrażenia uzyskać.

Najczęściej stosowaną miarą rozdzielczości powierzchniowej jest GRD (ang. *Ground Resolved Distance*, czyli terenowa zdolność rozdzielcza). GRD jest najmniejszą rozróżnialną wielkością na zobrażowaniu. Przy znanej wysokości lotu (lub odległości sensora od obiektu), zależność pomiędzy obrazem najmniejszego obiektu zidentyfikowanego na zobrażowaniu, Δx_i , oraz długości tego obiektu w terenie definiowana jest przez równanie (1).

$$GRD = H \frac{\Delta x_i}{f} \quad (1)$$

gdzie:

H – wysokość lotu lub odległość pomiędzy sensorem a obiektem,

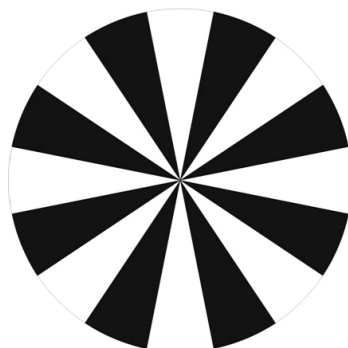
f – ogniskowa sensora (Keating et al., 1997).

W przypadku sensorów cyfrowych, rozdzielczość przestrzenna może również być definiowana jako GSD (ang. *Ground Sampling Distance*, czyli terenowa wielkość próbkowania). Jest to miara określająca odległość w terenie pomiędzy środkami dwóch sąsiadujących detektorów – pikseli.

GSD jest to wielkość, która umożliwia określenie rzeczywistych możliwości interpretacyjnych zobrażeń tylko w sposób przybliżony, zaś GRD opisuje rzeczywistą rozdzielczość z jaką pozyskane zostało zobrażowanie uwzględniając degradujący wpływ atmosfery, optyki i materiału rejestrującego promieniowanie (matryca CCD lub film światłoczuły) na jakość obrazu.

2. METODY WYZNACZANIA TERENOWEJ ZDOLNOŚCI ROZDZIELCZEJ (GRD) SENSORÓW ANALOGOWYCH

Terenowa zdolność rozdzielcza sensorów wyznaczana jest na podstawie analizy zobrażeń specjalnie skonstruowanych celów kalibracyjnych. Cele kalibracyjne składają się z geometrycznych elementów o znanych rozmiarach. Najczęściej stosowanymi rodzajami celów do wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej są testy Siemens'a i testy paskowe.



Rys. 1. Gwiazda Siemens'a

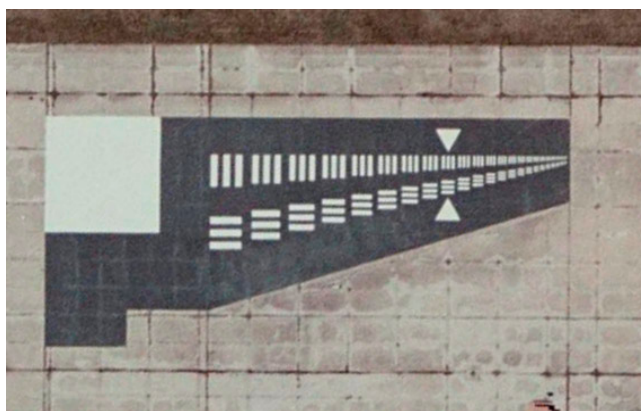
Test Siemens'a (Rys. 1) ma kształt koła podzielonego na parzystą liczbę segmentów (8, 18, 32...) pomalowanych naprzemiennie białą i czarną farbą. Wykonując zobrazowanie takiego celu z dużej wysokości, w środku celu powstaje tzw. krążek nieostrości, czyli obszar na którym poszczególne sektory celu się zlewają i stają się nierozróżnialne. Wyznaczenie wartości GRD (wyrażonej w pl/mm) na podstawie tego celu wykonuje się poprzez pomiar średnicy tego krążka i podstawieniu tej wartości do równania (2):

$$GRD = \frac{2s}{d\pi} pl/mm \quad (2)$$

gdzie:

s – liczba sektorów celu,

d – średnica krążka nieostrości w mm.



Rys. 2. Test paskowy znajdujący się w Wright Patterson AirForce Base, OH, USA

Testy paskowe (Rys. 2) składają się z równomiernie rozłożonych grup pasków o zmniejszających się wymiarach. Przykładem takiego testu jest cel kalibracyjny znajdujący się na płycie lotniska w Wright Patterson Airforce Base w stanie Ohio, USA (Rys. 2). Cel ten składa się z 23 grup pasków, z czego w skład każdej grupy wchodzi trzy paski białe przedzielone

czarnymi paskami. Każda z grup jest o $\sqrt[6]{2}$ razy mniejsza od poprzedniej w zakresie od 5 do 75 cm. Wartość GSD wyznaczana jest poprzez oszacowanie która najmniejsza grupa pasków celu jest ostatnią w pełni rozpoznawalną na zobrazowaniu. Terenowe wymiary tej wyznaczonej grupy określają terenową zdolność rozdzielczą danego zobrazowania.

3. METODY WYZNACZANIA TERENOWEJ ZDOLNOŚCI ROZDZIELCZEJ (GRD) SENSORÓW CYFROWYCH

Wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej sensorów cyfrowych jest zagadnieniem wciąż badanym. Wyznaczanie GSD na podstawie istniejących celów i wykorzystując istniejące metodyki daje duże błędy. Są one spowodowane sposobem w jaki rejestrowany jest obraz przez sensor cyfrowy i występujące z tego powodu artefakty na zobrazowaniach (Walczykowski et al., 2010).

Zespół badawczy Zakładu Teledetekcji i Fotogrametrii WAT we współpracy z członkami IWGS (Informal WorkingGroup on Sensors – Grupa robocza do spraw sensorów przy OBWE) wykonał obszerne badania na temat metodyki wyznaczania GRD i parametrów celów kalibracyjnych wykorzystywanych do oceny sensorów cyfrowych.

3.1. Dane wejściowe

Zobrazowania pozyskane zostały podczas lotów testowych wykonanych w bazie Wright Patterson AFB w Stanach Zjednoczonych. Loty wykonano na czterech różnych wysokościach: 2704 m, 3004 m, 3005 m oraz 3504 m. Dla każdej z tych wysokości wykonano po pięć przelotów uzyskując 5 zdjęć testów dla jednej wysokości. Wszystkie zdjęcia wykonano przy pionowym położeniu sensora. Dodatkowo na wysokości 3504 m wykonano zobrazowanie przy wychyleniu jednego z sensorów o $7,5^\circ$ oraz 15° od nadiru.

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

3.2. Wykorzystane sensory

Do analiz wykorzystano zobrazowania pozyskane za pomocą trzech różnych układów sensorów cyfrowych:

- kadrowej kamery DMC-2001 firmy Z/I Imaging – zobrazowania panchromatyczne (PAN) oraz barwne (RGB),
- skanera liniowego ADS-40 firmy Leica – zobrazowania pozyskane w kanałach czerwonym (R), zielonym (G) i niebieskim (B) oraz panchromatyczne (PAN),
- kadrowej kamery średniego formatu RCD-105 firmy Leica – zobrazowania barwne (RGB) uzyskane z zastosowaniem technologii z filtrem Bayer'a oraz interpolacji („de-Bayering”) pozyskanych danych surowych.

3.3 Wykonane analizy

Podstawowym celem badań zespołów była analiza czynników mających wpływ na poprawność wyznaczonej wartości GRD dla każdego rodzaju sensora cyfrowego. Wynikiem analiz byłoby określenie optymalnej metodyki określania wartości GSD. W przypad-

ku analizie rozdzielczości, słuszność danej metody byłaby potwierdzona dużą powtarzalnością odczytów dokonanych przez poszczególnych obserwatorów (małe wartości rozkładu oraz odchylenia standardowego) oraz zgodnością otrzymywanych wyników z wynikami teoretycznymi (GSD).

Pierwszą serię analiz wykonało dziesięciu wyszkolonych obserwatorów wykorzystując sprzęt komputerowy o takiej samej konfiguracji. Rozdzielczość odczytywano wykorzystując cztery różne reguły:

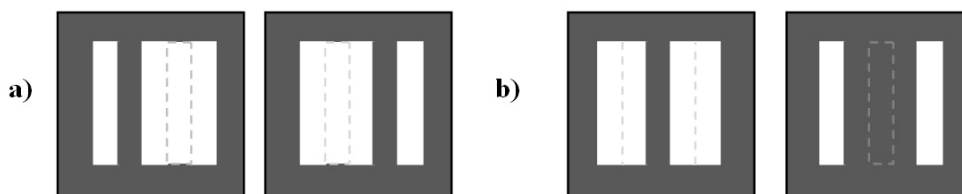
Reguła 1 – Terenowa zdolność rozdzielcza definiowana jest poprzez ostatnią widoczną triadę (3 paski: biały-czarny-biały) przed pierwszą niewidoczną triadą.

Reguła 2 – Terenowa zdolność rozdzielcza definiowana jest poprzez najmniejszą widoczną triadę.

Reguła 3 – Terenowa zdolność rozdzielcza definiowana jest poprzez najmniejszą widoczną grupę pasków (wszystkie paski grupy: biały-czarny-biały-czarny-biały).

Reguła 4 – Terenowa zdolność rozdzielcza definiowana jest poprzez ostatnią widoczną grupę pasków przed pierwszą niewidoczną grupą pasków.

Po dokonaniu analizy wszystkich otrzymanych wyników, przedstawiono serię problemów powodujących duże rozbieżności pomiędzy wynikami odczytów poszczególnych obserwatorów. Najważniejszym problemem była błędna interpretacja terminu „triada”. W wyniku dyskusji pomiędzy zespołami badawczymi stwierdzono, że w celu zapewnienia większej zgodności w interpretacji, zarówno cele kalibracyjne zobrazowane w sposób przedstawiony na rysunku 3a jak i te przedstawione na rysunku 3b, będą interpretowane jako rozdzielcza triada.



Rys. 3. Różne definicje terminu „triada”

Następnie dokonano kolejnej analizy tych samych danych, uwzględniając omówione uściślenia w metodyce prowadzenia analizy wizualnej. W drugiej analizie brało udział szesnastu wykwalifikowanych obserwatorów pracujących na tych samych konfiguracjach sprzętowych.

Dokonano analizy statystycznej wszystkich pozyskanych wyników. W analizie brano pod uwagę trzy kryteria:

- GRD/GSD** – odchylenie wartości odczytanych od wartości teoretycznych,
- α** – odchylenie standardowe wyników wszystkich obserwatorów,
- spread** – różnice pomiędzy wartościami maksymalnymi a minimalnymi otrzymanymi przez obserwatorów.

Po wyliczeniu powyższych parametrów dla wyników z każdego sensora, uzyskanych według każdej reguły, każdemu z rezultatów przypisano punkt rankingowy. Najlepsza reguła została wybrana na podstawie średniej z punktów rankingowych dla każdej kamery.

Na podstawie takiej analizy, wysnuto wniosek, iż reguła nr 3 daje najbardziej wiarygodne wyniki w określaniu wartości GRD.

W wyniku powyższych analiz zaproponowano następującą listę czynników, które mogą nadal mieć wpływ na wyznaczaną wartość rozdzielczości zobrazowania i mogą być one odpowiedzialne za tak duże rozbieżności w odczytach dokonanych przez poszczególnych obserwatorów:

- a. Monitor i karta graficzna
Postawiono pytanie czy monitory komputerowe o różnych parametrach oraz karta graficzna nie mają wpływu na określanie rozdzielczości zobrazowań cyfrowych
- b. Różnice w oprogramowaniu
Czy różnice w algorytmach wykorzystywanych do powiększania obrazu na ekranie komputera mogą mieć wpływ na określanie wartości GRD?
- c. Łączenie obrazów („stitching and stacking”)
Pojawiły się obawy odnośnie położenia celów kalibracyjnych w polu widzenia kamery, a więc i ich położenia na zobrazowaniu względem środka obrazu. Jest to obszar, gdzie w niektórych rodzajach kamer (np. DMC-2001) obrazy cząstkowe są łączone. Należy przeprowadzić badania, czy rozdzielczość obrazów cząstkowych oraz obrazu wynikowego (po sklejeniu) jest taka sama
- d. Cele pod kątem 45°
Czy orientacja celu w kadrze ma znaczący wpływ na określenie wartości GRD? Jeżeli nie, to rozdzielczość mogłaby być wyznaczana na podstawie zobrazowań wykonanych pod dowolnym kątem względem celu kalibracyjnego.
- e. Cele dwu-paskowe a trój-paskowe
Wraz z dyskusją na temat poszczególnych reguł prowadzenia analizy wizualnej rozpoczęto dyskusje na temat wymaganej ilości pasków wchodzących w skład celu kalibracyjnego. Mniejsza ilość pasków mogłaby oznaczać mniejszą ilość artefaktów powstających na zobrazowaniach. Z drugiej strony, test trój-paskowy pozwala na bardziej jednoznaczne wyznaczenie wartości rozdzielczości.
- f. Interpolacja Bayera
Obraz barwny w sensorach wykorzystujących tego typu rozwiązanie powstaje w wyniku odpowiedniej interpolacji wartości intensywności promieniowania padającego na poszczególne sąsiednie piksele. Każdy producent sensorów cyfrowych wykorzystuje swoje własne algorytmy do wyliczania wartości kanałów RGB. Czy ta różnorodność algorytmów pomiędzy sensorami będzie miała wpływ na jakość zobrazowania?
- g. Odległość pomiędzy poszczególnymi grupami pasków
Wstępne badania strony niemieckiej wskazują, iż większe odległości pomiędzy grupami pasków znacznie ułatwiają dokonywanie poprawnej analizy zobrazowań. W przypadku celów składających się z grup pasków usytuowanych blisko siebie, obserwator ma czasem problem z określeniem przynależności danego paska do danej grupy. Może to spowodować błędne określanie rozdzielczości danego zobrazowania.

Przeprowadzono analizy oraz dyskusje na temat wszystkich powyższych czynników. Zespół Wojskowej Akademii Technicznej przeprowadził badania dotyczące punktów a–d zaś pozostałe punkty e–g zostały poddane analizie przez specjalistów w Media Processing Facility w Dayton, USA.

Pierwszych analiz dokonano z pomocą grupy 108 studentów Wojskowej Akademii Technicznej, co umożliwiło uzyskanie prawie 2000 pomiarów wartości GRD. Obserwatorzy dokonali odczytów najmniejszej rozdzielczej grupy pasków zgodnie z wytycznymi utworzonymi przez zespoły badawcze 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 obrazowań na różnych wysokościach, celów o różnych orientacjach i o różnym usytuowaniu celu w kadrze.

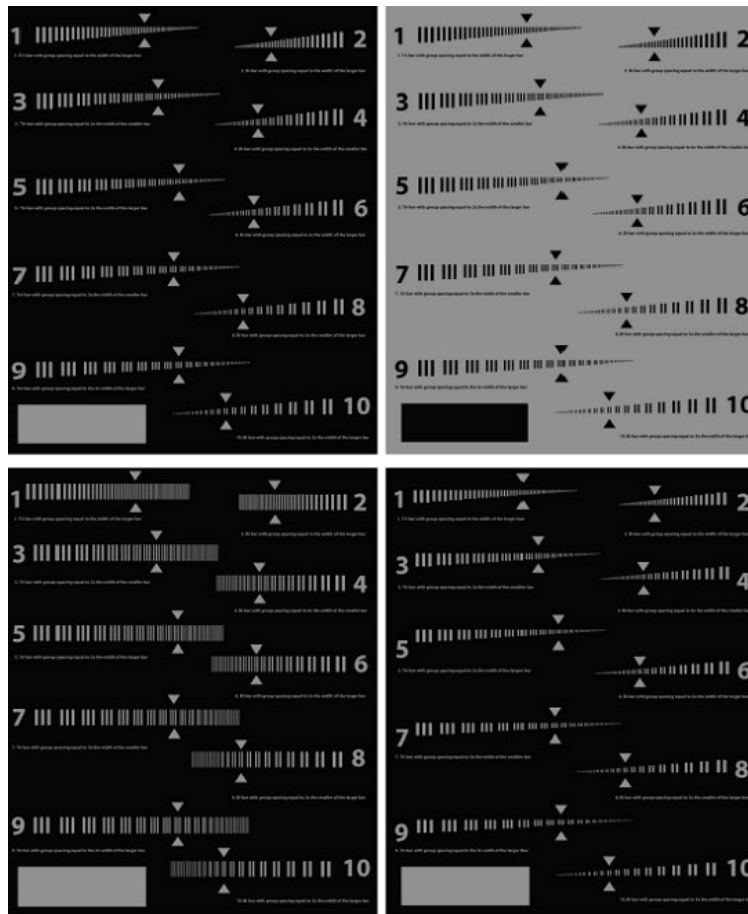
Następnym etapem badań w Wojskowej Akademii Technicznej była analiza wpływu różnych algorytmów powiększania obrazu na ekranie komputera na wyznaczaną wartość GRD. Odczyty wykonane przez 160 studentów Wojskowej Akademii Technicznej dały w sumie 5291 pojedynczych pomiarów. Żądane powiększenie (1200%) obrazów 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.

Tak duża próbka danych w przypadku obu etapów badań umożliwiła dokonania szczegółowych i wiarygodnych analiz statystycznych. Dla każdej próbki obliczono wartość GRD oraz stosunek obliczonej wartości GRD do teoretycznej wartości GSD. Następnie, dla każdego zestawu parametrów obliczono:

- średnią wartość GRD,
- średnią wartość ilorazu wartości GRD do wartości GSD,
- wartości minimalne i maksymalne wartości GRD,
- rozpiętość pomiędzy wartością maksymalną i minimalną wartości GRD,
- odchylenie standardowe dla danej próbki,
- odchylenie standardowe dla wszystkich badanych próbek wynosiło poniżej 0.1, tak więc uznano wyniki za poprawne.

Analizy pozostałych punktów dokonano na podstawie serii obrazowań specjalnie skonstruowanych celów kalibracyjnych (Rys. 4) wykorzystując dwie kamery cyfrowe: IMPERX IPX-16M3-GCFB16 oraz IMPERX IPX-11M5-GMFB11.

Cele oraz kamery pozwoliły na pozyskanie obrazowań, na podstawie których grupa dziesięciu obserwatorów dokonała analizy wizualnej. Cele przedstawione na (Rys. 4) pozwalają na dokonanie analizy wpływu wielkości poszczególnych pasków, rozmieszczenia grup, liczby pasków w grupie oraz kolory pasków i tła na wyznaczanie wartości GSD. Obrazowania pozyskane oraz przeanalizowane podczas badania pozyskane były w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu stałego oświetlenia. Ponieważ wykorzystane kamery są sensorami z filtrem Bayera, każdy obraz został przetworzony z wykorzystaniem czterech różnych algorytmów de mozaikujących: *adaptive smooth hue*, *smooth hue*, *bilinear* i *replication*. Mimo, iż uzyskane wyniki oraz wnioski nie uwzględniają wpływu atmosfery, wibracji sensora, poruszenia oraz innych parametrów, które mogłyby mieć wpływ na jakość obrazu, zespół badawczy prowadzący badanie jest przekonany, że lotnicze obrazowania pozyskane w sposób poprawny będą dawały zbliżone wyniki.



Rys. 4. Cele kalibracyjne wykorzystane podczas badań w Media Processing Facility, USA

4. WYNIKI ANALIZ I WNIOSKI

Analiza wartości uzyskanych przez zespół WAT podczas badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

- średni stosunek wartości GRD/GSD dla wszystkich przeanalizowanych rozdzielczości wynosił od 100% do 104%. Są to różnice niewielkie i dopuszczalne,
- średni stosunek wartości GRD/GSD dla monitorów typu CRT wynosił 101%, zaś dla LCD 103%. Są to różnice niewielkie i dopuszczalne,
- średni stosunek wartości GRD/GSD przy różnych kartach graficznych wynosił 103–104%. Są to różnice niewielkie i dopuszczalne,
- orientacja celu kalibracyjnego (0° , 45° i 90°) nie ma istotnego wpływu na wyznaczenie wartości GRD (103–105%),

- usytuowanie celu w kadrze (w nadirze, 7° od nadiru i 15° od nadiru) nie ma istotnego wpływu na wyznaczanie wartości GRD (100–105%),
- wpływ algorytmu przepróbkowania obrazu na wyznaczaną wartość GRD jest niewielki (94%–106% dla DMC2001 i 101%–111% dla RCD105) i pomijalny, gdyż mieści się w granicach dopuszczalnego błędu utrzymania wysokości lotu ($\pm 15\%$).

Wyniki analizy zespołu z Dayton doprowadziły do następujących wniosków:

- cel powinien składać się z jasnych grup pasków na ciemnym tle,
- dopuszczalne są zarówno cele dwu-paskowe jak i trój-paskowe,
- stosunek boków pasków powinien wynosić 1:5,
- poszczególne grupy pasków powinny być oddalone od siebie o przynajmniej podwójną szerokość mniejszego paska,
- dla przeprowadzonych testów na zdjęciach wykonanych w warunkach laboratoryjnych algorytmem demozaikującym, przy którym otrzymuje się wartości najbardziej zbliżone do teoretycznych jest *adaptive smooth Hue*.

LITERATURA

Keating, D. *Automatic digital processing for calibration data of Open Skies Treaty sensors*, USAF, 1997.

Kurczyński Z., *Lotnicze i satelitarne zobrazowanie Ziemi. cz. I.*, Politechnika Warszawska.

Laroche C.A. and Prescott M.A., *Apparatus and method for adaptively interpolating a full color image utilizing chrominance gradients*, Patent 5, 373, 322, Grudzień 1994.

Walczykowski P., Orych A.; *Wybrane problemy z wyznaczaniem zdolności rozdzielczej sensorów wykorzystywanych w ramach misji Open Skies*. Biuletyn WAT, 2010.

Walczykowski P., Orych A., Jenerowicz A., Kawka K.; *Wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej zobrazowań pozyskiwanych w ramach Traktatu Open Skies za pomocą kadrowych kamer cyfrowych*. Biuletyn WAT, 2010.

Traktat Open Skies, 1992.

DETERMINING THE GROUND RESOLVED DISTANCE FOR DIGITAL SENSORS USING CALIBRATION TARGETS

KEYWORDS: remote sensing, image interpretation, ground resolved distance, digital sensors, calibration targets

SUMMARY: One of the main parameters describing the quality and interpretational usefulness of satellite and aerial remote sensing images is their spatial resolution. Imagery characterized by a high ground resolution enable the interpreter to conduct a more detailed analysis and more thorough interpretation than possible with images of lower resolution. When working with digital sensors we can distinguish two parameters which define the spatial resolution of images: GRD (Ground Resolved Distance) and GSD (Ground Sampling Distance). GSD is the sampling frequency and only describes the size of the pixel on the ground. The GRD parameter describes the smallest length which can be recognized on the image. The ground resolved distance is determined based on especially constructed calibration targets. These targets can take several forms, shapes and sizes. They are characterized by

a difference in contrast between its individual segments. Calibration targets have been used for many years to determine the ground resolved distance of analogue sensors. The newest research on digital sensors based on the same traditional calibration targets have shown that some of these targets are now inadequate. In order to correctly determine the resolution of digital sensors, changes must be made to the structure of the targets. The GRD value calculated based on existing targets is laden with large errors caused by artifacts occurring on the acquired images. These are the result of the way energy is registered by a digital sensor. A research team from the Remote Sensing and Photogrammetry Department of the military University of Technology has conducted a number of experiments which have allowed to determine the optimal parameters of a calibration target for establishing the ground resolved distance of digital sensors. Additionally, the experiments allowed description of a new methodology for analyzing the acquired imagery. In these experiments a number of parameters specific to digital imagery had been analyzed.

mgr inż. Agata Orych
e-mail: aorych@wat.edu.pl
telefon: (22) 683 7148
fax: (22) 683 9021

dr inż. Piotr Walczykowski
e-mail: pwalczykowski@wat.edu.pl
telefon: (22) 683 9021
fax: (22) 683 9021