

**DOBÓR MATERIAŁÓW DO WYTWORZENIA PASYWNYCH CELÓW
KALIBRACYJNYCH ORAZ METODYKA WYZNACZANIA TERENOWEJ
ZDOLNOŚCI ROZDZIELCZEJ KAMER I SKANERÓW TERMALNYCH**

**SELECTION OF MATERIALS FOR THE DEVELOPMENT OF PASSIVE
CALIBRATION TARGETS AND THE METHODOLOGY USED
IN DETERMINING THE SPATIAL RESOLUTION
OF THERMAL CAMERAS AND SCANNERS**

Wiesław Dębski, Piotr Walczykowski, Agata Orych

Wojskowa Akademia Techniczna im. J. Dąbrowskiego

SŁOWA KLUCZOWE: sensory termalne, cele kalibracyjne, terenowa zdolność rozdzielcza, MTF

STRESZCZENIE: Precyzyjne wyznaczenie terenowej zdolności rozdzielczej sensorów termalnych jest problemem niezwykle istotnym przy pozyskiwaniu zobrażeń z pułapu lotniczego. Artykuł przedstawia możliwości wyznaczenia terenowej zdolności rozdzielczej sensorów termalnych w oparciu o specjalnie do tego celu zaprojektowane testy kalibracyjne.

Przedstawiono rodzaje istniejących termalnych celów kalibracyjnych. W artykule zostały omówione i przeanalizowane dwie podstawowe metody wyznaczenia rozdzielczości terenowej na podstawie zobrażeń celów kalibracyjnych – metoda subiektywna oraz metoda obiektywna. Dokonano analizy istniejących pasywnych celów termalnych wykorzystywanych przez międzynarodowe zespoły Traktatu *Open Skies*. Cele, które spełniają rygorystyczne wymogi Traktatu są jednak przeważnie mało mobilne. Dlatego też prowadzone są dalsze prace nad doбором odpowiednich materiałów do wytworzenia pasywnych celów kalibracyjnych.

W wyniku analizy danych pozyskanych z pomiarów *Open Skies* oraz własnych opracowań, można stwierdzić, że najwygodniejszym rozwiązaniem jest wykorzystanie materiałów tekstylnych do wykonania termalnych celów kalibracyjnych.

Cele kalibracyjne wykorzystywane przez uczestników Traktatu *Open Skies* uniemożliwiają określenia zdolności rozdzielczej sensora dla dowolnej wysokości lotu.

W artykule przedstawiono metodykę obiektywnego określania zdolności rozdzielczej sensora termalnego na dowolnym pułapie lotu na podstawie tkaninowych testów Siemens'a i przekoszonej krawędzi wykorzystując do tego celu funkcję przenoszenia modulacji.

1. WSTĘP

Podstawowym parametrem opisującym sensor, oraz widoczność i rozróżnialność obiektów na obrazach wykonanych za jego pomocą, jest terenowa zdolność rozdzielcza.

Rozdzielczość sensorów definiowana jest jako najmniejsza częstotliwość przestrzenna rozpoznawalna na płaszczyźnie tłowej sensora i mierzona jest w liczbie par linii na milimetr obrazu. Jedną parę stanowi jedna linia biała i jedna czarna. Odpowiednikiem tej rozdzielczości w terenie jest terenowa zdolność rozdzielcza.

Testy kalibracyjne wykorzystywane są między innymi przez uczestników badań

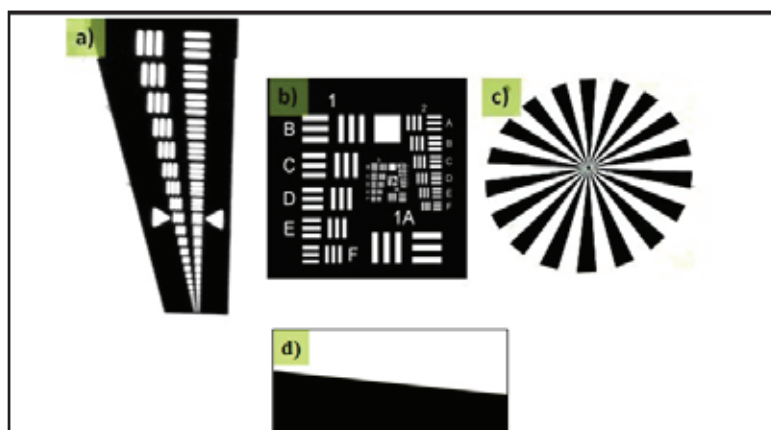
sensorów, organizowanych w ramach Traktatu *Open Skies*. Traktat *Open Skies* jest międzynarodowym porozumieniem zawartym pomiędzy 34 Państwami-Stronami, które umożliwia wykonywanie lotów nad terytorium sygnatariuszy Traktatu. Samoloty i aparatura obserwacyjna przeznaczone do wykonywania tych lotów przechodzą szczególny proces atestacji pod nadzorem międzynarodowej komisji, aby zapewnić, minimalną wysokość lotu nad celami kalibracyjnymi przy której dopuszczalna zdolność rozdzielcza (50 cm) nie zostanie przekroczona. Lot na niższej wysokości spowodowałoby uzyskanie lepszej rozdzielczości termogramów, co jest niezgodne z ustaleniami Traktatu.

Dotychczas w ramach Traktatu *Open Skies* wszelkie badania rozdzielczości w zakresie termalnym prowadzono w zakresie 8-12 μm , ale w związku z planami wprowadzenia zasobnika DB-110 do Polskich Sił Powietrznych, który będzie zawierał kamerę termowizyjną w zakresie 3-5 μm , istnieje potrzeba wykonania celu, który mógłby być wykorzystany do określania rozdzielczości tego typu sensorów.

2. CELE KALIBRACYJNE DLA SENSORÓW LOTNICZYCH REJESTRUJĄCYCH W ZAKRESIE WIDZIALNYM

Wyznaczanie zdolności rozdzielczej całego układu detekcyjnego możliwe jest przy zastosowaniu jednego następujących testów:

- test paskowy „USAF 1951”,
- test paskowy w postaci układu pól o zmniejszających się wymiarach,
- test na podstawie przekoszonej krawędzi,
- test w postaci gwiazdy Siemens.



Rys. 1 a) Test paskowy do wyznaczania terenowej zdolności rozdzielczej. b) Test paskowy „USAF 1951” do wyznaczania zdolności rozdzielczej układów optycznych i materiałów światłoczułych. c) Test kalibracyjny w postaci gwiazdy Siemens d) Przekoszona krawędź

W przypadku testów paskowych, stosunek szerokości pasa do jego długości wynosi 1:5. Elementy celów są na przemian czarne i białe o wartości kontrastu z zakresu 1:5 do 1:10. Do badań cele rozkładane są na terenie płaskim, tak aby płaszczyzna celów

była równoległa do płaszczyzny tłowej.

3. CELE KALIBRACYJNE DLA SENSORÓW LOTNICZYCH REJESTRUJĄCYCH W ZAKRESIE TERMALNYM

Wyznaczanie terenowej zdolności rozdzielczej sensorów termalnych wymaga specjalnie zaprojektowanego celu. W przypadku sensorów termalnych poszczególne elementy celu muszą ze sobą kontrastować, lecz nie w zakresie widzialnym, ale termalnym. Dlatego też wykorzystywane są cele, których elementy różnią się pod względem temperatury radiacyjnej. Wykonanie optymalnego celu kalibracyjnego dla potrzeb sensorów termalnych jest bardzo trudne, gdyż duży wpływ na otrzymane wyniki (termogramy) ma otoczenie i promieniowanie słoneczne. Wykorzystuje się dwa główne rodzaje celów: aktywne i pasywne.

3.1. Aktywne termalne cele kalibracyjne

Terenowe cele termalne stosowane zgodnie z wymaganiami Traktatu *Open Skies* najczęściej składają się z zestawów grup trzech (lub pięciu) pasów: dwóch (trzech) o niskiej temperaturze radiacyjnej przedzielonych pasem (dwoma pasami) o wysokiej temperaturze radiacyjnej. Minimalna różnica temperatury (ΔT) pomiędzy pasami wynosi 3°C . Im wyższa ΔT , tym większy kontrast pomiędzy pasami.

Aktywne cele kalibracyjne charakteryzują się możliwością zmiany ich emisyjności. Podgrzewanie testu możliwe jest dzięki zastosowaniu elementów grzewczych wewnątrz materiału, z którego wykonane są cele. Uciążliwością tego typu testów jest konieczność dostarczania energii elektrycznej, co stwarza problemy przy wykonywaniu pomiarów polowych.

Wytworzenie tego typu aktywnego celu kalibracyjnego jest kosztowne, ponieważ wymaga się od producenta wykonania systemu grzewczego, który będzie dawał użytkownikowi nie tylko żadaną temperaturę, ale również zapewniał jednolity rozkład temperatury na całej jego powierzchni. Utrzymanie stałej temperatury radiacyjnej w warunkach polowych jest sprawą niezwykle złożoną.

Ciekawym rozwiązaniem są cele aktywne wykonane przez zespoły rosyjskie. Zbudowane zostały z ruchomych płytek stalowych, które są zamocowane do ramy w sposób umożliwiający zmianę kąta padania na cel promieni słonecznych. Taka budowa celu umożliwia ustawienie każdego elementu celu tak, aby odpowiednia ilość promieniowania była kierowana w kierunku sensora.

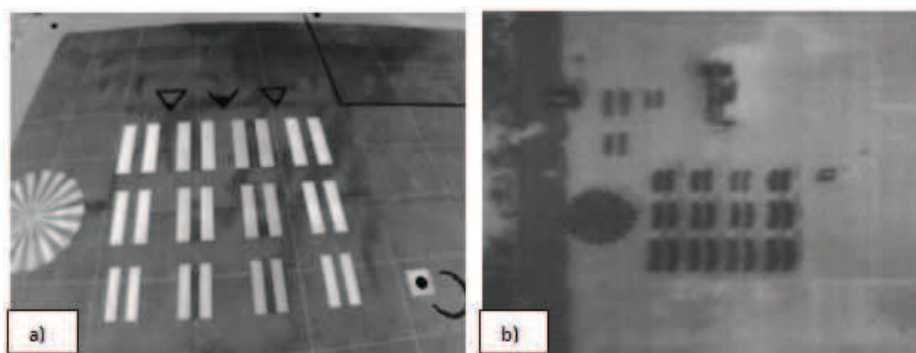
Z uwagi na skomplikowaną budowę celi aktywnych i duże trudności w ich wykorzystywaniu, autorzy skupili się na ocenie możliwościach wykorzystania celów pasywnych.

3.2. Pasywne termalne cele kalibracyjne

Konstrukcyjnie najprostszym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie drewnianych paneli pokrytych różnobarwnymi farbami. Podczas eksperymentów z wykorzystaniem celów drewnianych okazało się jednak, iż cele te dają mały kontrast radiacyjny pomiędzy

poszczególnymi elementami celu a tłem, niezależnie od rodzaju i kolorystyki wykorzystanych pokryć. Dlatego też prowadzono badania nad wykorzystaniem celów metalowych o bardzo niskich współczynnikach emisyjności, wykonanych z płyt aluminiowych ($AlMgSiO_5$) pomalowanych farbami o różnych odcieniach szarości.

Pomiary temperatury radiacyjnej wykonywane były równocześnie z pułapu lotniczego, za pomocą skanera typu *whiskbroom*, oraz za pomocą kamery usytuowanej na wysięgniku 10m nad badanymi celami. Na rysunek (rys. 2) przedstawiono zobrazenia pozyskane obiema metodami.

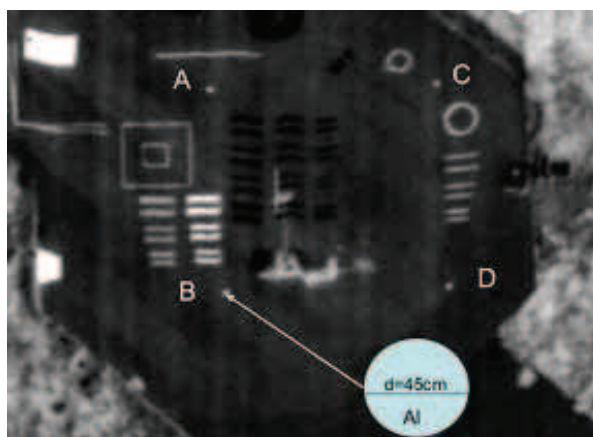


Rys. 2. Zobrazenie celi kalibracyjnych pozyskane za pomocą a) kamery termalnej, umieszczonej 10m nad terenem i b) skanera termalnego z pułapu 360m podczas eksperymentu w Turcji

W 2006r. przeprowadzono międzynarodowy eksperyment w ramach Traktatu *Open Skies* w Turcji. Celem eksperymentu była między innymi homologacja sensora termalnego AAD-5. Z pomiarów własnych pozyskanych podczas badań w Turcji wynika, że największe kontrasty uzyskuje się pomiędzy gładkimi panelami metalowymi (aluminiowych) pomalowanymi czarną farbą, a betonowym podłożem.

Podczas opisanych badań celów pasywnych jak i aktywnych prowadzonych przez grupę ekspertów do spraw sensorów *Open Skies*, wykorzystywane były do badań zdolności rozdzielczych cele trój- i pięcio-paskowe. Równolegle prowadzono również badania, które wymagały wykorzystania innych rodzajów testów kalibracyjnych. Między innymi, zespół polski prowadził badania nad opracowaniem obiektywnej metody wyznaczania podstawowych parametrów lotu i pracy skanera termalnego na podstawie zmodyfikowanego testu kalibracyjnego.

Konstrukcja celu polega na umieszczeniu w badanym rejonie czterech dysków o średnicy 45 cm wykonanych z materiału o emisyjności zapewniającej uzyskanie na zobrazeniu różnicy temperatury radiacyjnej pomiędzy dyskami a tłem, na którym będą położone. Na podstawie pomiaru współrzędnych poszczególnych dysków na obrazie termalnym możliwe jest określenie parametrów lotu oraz pracy skanera. Metodykę ich wyznaczania szczegółowo opisano w publikacji (Dębski *et al.*, 2008b).



Rys. 3. Zobrazowanie pozyskane za pomocą skanera termalnego podczas pomiarów w Decimomannu przedstawiające rozmieszczenie elementów polskiego celu kalibracyjnego

W Traktacie ustalono że cele powinny się składać z grup trój- lub pięciopaskowych celów o rozmiarach 40 cm, 50 cm i 60 cm. W celu wyznaczenia wartości H_{min} , czyli najniższej dopuszczalnej wysokości lotu, przy której nie zostanie przekroczona dopuszczalna zdolność rozdzielcza, wykonywane są loty nad wyłożonymi celami kalibracyjnymi na różnych wysokościach lotu co 50 m. Pozyskane zobrazowania są następnie analizowane przez grupę dziesięciu ekspertów. Analiza polega na ocenie widoczności poszczególnych elementów celu. Cel uznawany jest za widoczny, jeśli wszystkie jego elementy (panele) można rozróżnić jako oddzielne w danej grupie. Jeśli najmniejszą rozróżnialną grupą jest grupa 50 cm, rozdzielczość danego zobrazowania wykonanego na danej wysokości, ustalana jest na 50 cm. Taka wysokość lotu spełnia wymogi Traktatu i określana jest jako H_{min} . Jeżeli jednak rozróżnialne są cele o szerokości 40 cm, rozdzielczość zobrazowania jest za wysoka, więc zobrazowania wykonane na tej wysokości nie spełniałyby wymogów Traktatu. Ocena wizualna uzależniona jest od percepcji obserwatora, więc jest to metoda subiektywna.

4. PROJEKTOWANIE NOWEGO TERMALNEGO CELU KALIBRACYJNEGO

Postanowiono stworzyć nowy cel kalibracyjny, który mógłby być wykorzystany do określenia zdolności rozdzielczej sensora termalnego na dowolnym pułapie lotu. Zanim stworzono nowy cel kalibracyjny, przeprowadzono badania, które umożliwiły dokonanie wyboru rodzaju celu, oraz materiału, z którego zostanie wykonany.

4.1. Dobór rodzaju termalnego testu kalibracyjnego

Autorzy zdecydowali się na wykorzystanie dwóch rodzajów testów kalibracyjnych 16-to sektorowej gwiazdy Siemens (Rys. 1c) oraz przekoszonej krawędzi (Rys. 1d). Oba te testy mogą być wykorzystane do precyzyjnego wyznaczenia zdolności rozdzielczej przy zachowaniu względnie małych rozmiarów testów. Wyznaczenie terenowej rozdzielczości poniżej jednego metra dla sensorów możliwe jest przy

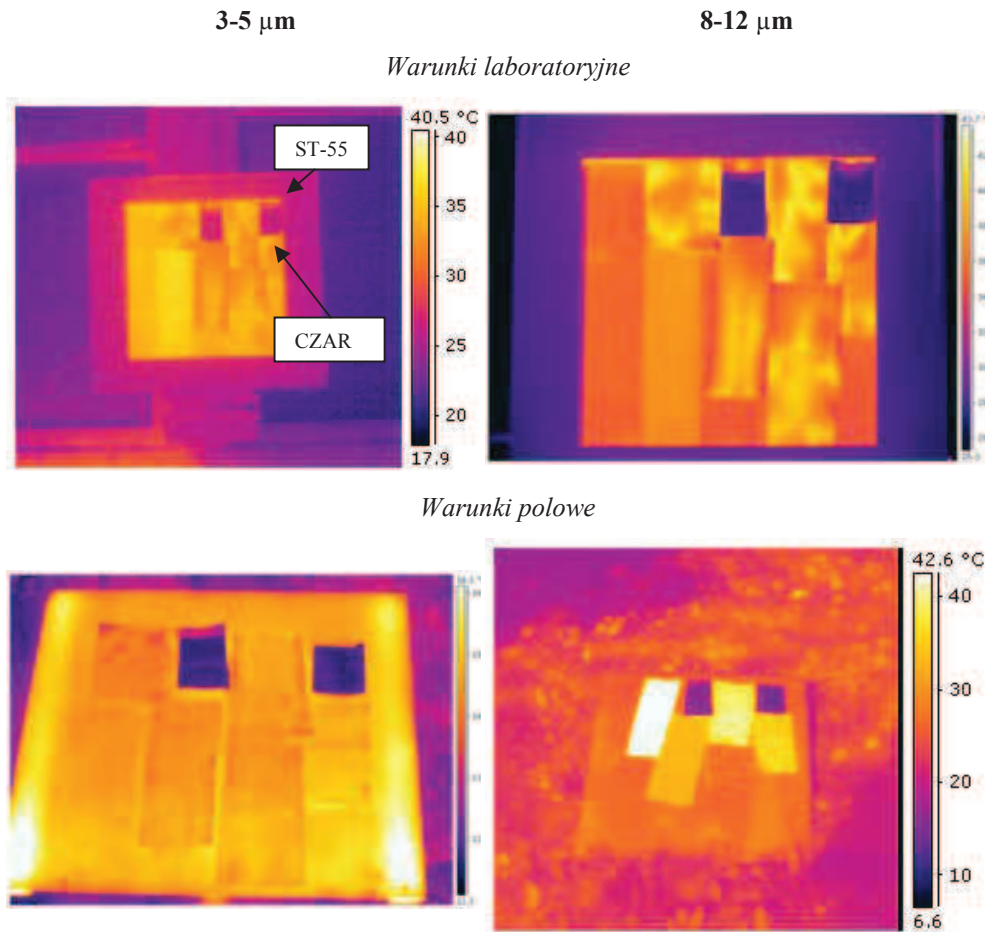
zastosowaniu gwiazdy Siemens'a o cięciwie każdego sektora równej 1 metr, czyli o średnicy okręgu ponad 5m.

Na podstawie testów laboratoryjnych stworzono program wykorzystujący funkcję przenoszenia modulacji (MTF) do określania rozdzielczości na podstawie zeskanowanych analogowych zobrazowań termalnych. Program działa na zasadzie porównywania kontrastów pomiędzy segmentami białymi a czarnymi gwiazdy Siemens'a wzdłuż dwóch jego promieni. Założeniem jest porównanie wyników otrzymanych naszą proponowaną metodą obiektywną, z wynikami, pozyskanymi przez dziesięciu ekspertów metodą subiektywną podczas badań w Turcji. Eksperyment ten jest w trakcie realizacji, ale wstępne wyniki potwierdzają nasze założenia.

4.2. Dobór materiałów na termalny cel kalibracyjny

Kolejnym etapem badań był dobór materiałów, które zapewniałyby maksymalnie duży kontrast w obu zakresach termalnych. Przebadano w zakresie termalnym szeroki asortyment materiałów takich jak tekstylia, podłoża drewniane, stalowe i aluminiowe o różnych wykończeniach oraz pokryte farbami o różnych współczynnikach emisyjności. (Dębski *et al.* 2008a).

Najbardziej zadowalające wyniki otrzymano dla tkanin aluminizowanych, takich jak np. tkanina ST 55 o grubości ok 0,3 mm i gramaturze ok 130 g/m². Jest to tkanina tkana z przędzy szklanej z przyklejoną jednostronnie folią aluminiową. Materiał ten został przebadany za pomocą kamer termowizyjnych w zakresach 3-5 μm i 8-12 μm zarówno w warunkach laboratoryjnych i polowych. Równocześnie przebadano również tkaniny o innych współczynnikach emisyjności, w celu zapewnienia odpowiedniego kontrastu z próbką aluminiowaną. W warunkach laboratoryjnych, aby zapewnić jednakową temperaturę dla wszystkich próbek, materiały umieszczone zostały na podgrzewanej płycie i osiągnęły temperaturę 44.1°C. Tak podgrzany cel nadal uważany jest za pasywny, ponieważ konstrukcja celu aktywnego polega na podgrzewaniu poszczególnych elementów celu do różnych temperatur kinetycznych. W tym przypadku, w warunkach laboratoryjnych, podgrzano wszystkie materiały do tej samej temperatury kinetycznej, jedynie po to by zapewnić ich jednakową temperaturę w pomieszczeniu. Temperatura otoczenia wynosiła 27.1°C. Podczas pomiarów polowych, wykonanych z odległości 5m, występował całkowity brak zachmurzenia, silne nasłonecznienie a temperatura powietrza wynosiła 15°C. Pomiar w obu warunkach wykazały, że wszystkie tkaniny nie-aluminizowane, mają bardzo zbliżony współczynnik emisyjności. Dlatego też skupiono się na jednym materiale, który spełniał założone wymagania podczas procesu produkcyjnego celu kalibracyjnego – czarna bawełna matowa. Rysunek (Rys. 4) przedstawia termogramy badanych próbek w warunkach laboratoryjnych i polowych, pozyskane za pomocą kamer w zakresach 3-5 i 8-12 μm a wyniki zamieszczono w tabeli 1.



Rys.4. Termogramy próbek pozyskane w zakresach 3-5 i 8-12 μm

Tabela 1. Pozyskane wartości temperatury kinetycznej (T_K) i temperatury radiacyjnej (T_R) dla wybranych próbek materiałów w warunkach laboratoryjnych i polowych

Obszar	Warunki laboratoryjne				Warunki polowe			
	3-5μm		8-12μm		3-5μm		8-12μm	
	T_K	T_R	T_K	T_R	T_K	T_R	T_K	T_R
ST-55	44,1	26,8	44,1	27,5	15,1	14,1	15,1	-10,4
CZARNY	44,1	35,2	44,1	37,4	15,1	36,5	15,1	30,0
	$\Delta T_{rad} = 8,4$		$\Delta T_{rad} = 9,9$		$\Delta T_{rad} = 22,4$		$\Delta T_{rad} = 40,4$	

Na podstawie wyników pomiarów termowizyjnych można stwierdzić, że materiał aluminizowany jest idealny do wytworzenia celu kalibracyjnego, zwłaszcza w połączeniu z czarną tkaniną bawełnianą. Materiały te mogą być wykorzystane do kalibracji sensorów zarówno w zakresie 3-5 jak i 8-12 μm.

5. WNIOSKI

Na podstawie wstępnych pomiarów laboratoryjnych opracowano metodykę, która pozwoli na zastąpienie dotychczas stosowanej subiektywnej metody wyznaczania zdolności rozdzielczej, metodą numeryczną, obiektywną. Metoda ta wymaga jednak skonstruowania specjalnych celów o odpowiednich parametrach geometrycznych oraz wystarczającym kontrastem pomiędzy jego elementami na pozyskanych termogramach.

Wytypowano parę materiałów pomiędzy którymi występuje bardzo wysoki kontrast ($\Delta T_{\text{radiacyjna}}$) w obu badanych zakresach termalnych – 3-5 i 8-12 μm . Materiały te zostaną wykorzystane do konstrukcji zaprojektowanych celów. Stworzone zostaną dwa testy kalibracyjne – gwiazda Siemens, o promieniu 2,56 m oraz przekoszona krawędź, o rozmiarach 6,35 x 8,46, zapewniające możliwość pomiaru rozdzielczości do 1m. Dodatkowo, na bazie tych materiałów wykonane będą nowe cele do pomiarów geometrii pozyskiwanych obrazowań.

Przewidywane są badania naziemne oraz w locie nowych celów z użyciem skanera termalnego AAD-5, podczas homologacji samolotu CASA w ramach Traktatu *Open Skies* w Antalyi (Turcja) w marcu 2009r.

6. LITERATURA

W.Dębski, J.Jasiński, P.Walczkowski, 2006. *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>.

W.Dębski, J.Jasiński, P.Walczkowski, 2007a. *Selected issues of geometrical quality assessment of thermal images acquired by means of whiskbroom scanner*, Polish Journal of Environmental Studies Vol. 16, No 2B, 2007. The 2nd conference on Application of Modern Satellite, Aerial and Ground Images for Needs of Country Defense and National Economy, 14-15.06, Podlesie.

W. Dębski, P.Walczkowski, A.Orych, 2008a. *Selected problems with determining the ground resolution of thermal sensors*, Polish Journal of Environmental Studies Vol. 17 No. 1C. 2008r The 3rd conference on Application of Modern Satellite, Aerial and Ground Images for Needs of Country Defense and National Economy, 11-13.06, Serock.

W.Dębski, P.Walczkowski, 2008b. *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, 3-11.06, Pekin.

Z.Kurczyński, 2006. *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

**SELECTION OF MATERIALS FOR THE DEVELOPMENT OF PASSIVE
CALIBRATION TARGETS AND THE METHODOLOGY USED
IN DETERMINING THE SPATIAL RESOLUTION OF THERMAL CAMERAS
AND SCANNERS**

Key words: thermal sensors, calibration targets, resolving power, MTF

Summary

Precise determination of the resolving power of thermal sensors is of a key importance when acquiring imagery from the air. The resolving power defines the value of such imagery in many applications. The paper describes possibilities of determining the resolving power of thermal sensors based on especially designed calibration tests.

The existing thermal calibration targets are presented. The paper describes and analyses two basic methods of determining the resolving power based on calibration targets: a subjective method of multiple observations and an objective method, which uses the modulation transfer function (MTF).

The existing passive thermal targets used by international Open Skies Treaty groups were analysed. The targets, which comply to the rigorous requirements of the Treaty, are usually made of large metal panels, which makes them difficult to transport. Therefore research is in progress on the selection of adequate materials for the production of calibration targets.

In the experimental section, a large array of materials such as textiles as well as panels made out of wood, steel and aluminium of different finishes and covered with paints of different emissivities, were examined in the thermal range.

Analysis of the authors' own measurements as well as those taken by Open Skies groups allows to conclude that the use of textiles is the most convenient solution for developing a thermal calibration target. Such a target is easy to transport and very convenient to experiment with in the field. Furthermore, development of such a target is simple and does not require any complex, specialised production methods.

Calibration targets used by the Open Skies Treaty members make it possible to only subjectively establish the flight altitude, for which the resolving power of the sensor will not exceed 40, 50 or 60cm. They do not, however, allow to determine the resolving power of the sensor for any given flight altitude.

The paper presents also an objective method for determining the resolving power of thermal sensors for any flight altitude based on the modulation transfer function used on two textile targets: a Siemens star and slanted edge test.

dr hab. inż. Wiesław Dębski,
wdebski@wat.edu.pl,
tel./fax: +4822 6839296

dr inż. Piotr Walczykowski,
pwalczykowski@wat.edu.pl,
tel./fax: +4822 6839021

mgr inż. Agata Orych
aorych@wat.edu.pl,
tel./fax: +4822 837148