

Wstępne przetwarzanie danych hiperspektralnych Tatr Wysokich

Dane pozyskane bezpośrednio przez skaner lotniczy mają liczne zniekształcenia wynikające z deformacji geometrycznych wywołanych przez ruch samolotu w atmosferze (rejestracja obrazu odbywa się piksel po pikselu i linia po linii) oraz zakłóceń i szumów spowodowanych wpływem atmosfery oraz samego detektora na rejestrowany sygnał. Wszystkie te błędy muszą zostać wyeliminowane podczas wstępnego przetwarzania sygnału.

Dane w trakcie zobrazowania są zapisywane na taśmie magnetycznej w formacie RAW (poziom 0). Pierwszy etap przetwarzania danych polega na ich zgraniu na dysk twardy komputera i konwersji do formatu BSQ; format ten zostaje automatycznie zarchiwizowany na taśmie ADSM. Następuje przejście zobrazowania do celu eliminacji błędów w zapisie. W następnym kroku eliminowane są fragmenty obrazu z nakładającymi się obrazami tego samego zakresu spektrum¹. Następnie przeprowadzana jest analiza szumu generowanego przez układy elektroniczne skanera (*dark current*). Po tym procesie dane obrazowe są kalibrowane przez zastosowanie współczynników kalibracyjnych pozyskanych dla danego detektora podczas kalibracji instrumentu (odniesieniem jest wzorzec czerni – *dark current* – detektora). Kończącym etapem korekcji sensora jest wygenerowanie raportu po kalibracji radiometrycznej wraz z plikami obrazu przetworzonymi do poziomu 1. Integralną częścią raportu są wygenerowane obrazy typu *quicklook*. Służą one prezentacji na stronach www w formacie HTML oraz generalnej wizualizacji jakości danych (np. zachmurzenie, pokrycie terenu). Na każdym etapie korekcji sensora wykonywane są analizy jakości danych. Końcowy raport z wstępnego przetwarzania wraz z danymi obrazowymi (poziom 1) oraz danymi INS (*Inertial Navigation System*) jest dostarczany do klienta (Holzwarth i inni, 2003).

Kolejne etapy przetwarzania obrazów hiperspektralnych obejmują korekcję geometryczną i atmosferyczną (ryc. 13). W zdecydowanej większości przypadków procedurę tę wykonuje zamawiający zobrazowanie, w specjalistycznych pakietach do przetwarzania danych hiperspektralnych (np. ENVI) lub też specjalistycznych programach, np. PARGE lub ATCOR.

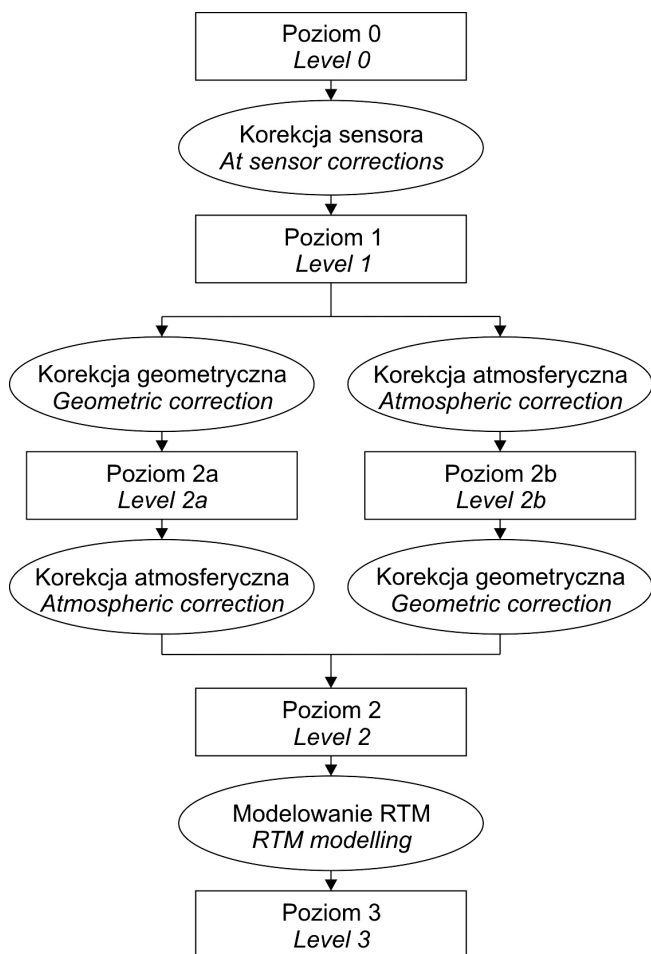
Dane DAIS 7915 wykorzystane w niniejszej pracy zostały skorygowane geometrycznie i atmosferycznie przez autora niniejszej pracy oraz M. Sobczaka podczas pobytu naukowego w DLR Oberpfafenhoffen w styczniu i lutym 2003 r. Do tego celu wykorzystane zostały pakiety ATCOR4 oraz PARGE². Pakiet PARGE (*PARAmetric GEocoding*) został stworzony do parametrycznej geometryzacji cyfrowych danych lotniczych, pozyskanych z detektorów rejestrujących piksel po pikselu lub też linia po linii. Pakiet ATCOR (*ATMospheric CORrection*) służy do korekcji atmosferycznej, normalizacji topograficznej i empirycznego modelowania BRDF³, czyli dwukierunkowości odbicia promieni słonecznych (geometrii słońce–obiekt–detektor)⁴.

² Oprogramowanie to zostało przygotowane przez pracowników RSL (dr Daniel Schlaepfer) oraz DLR (dr Rudolf Richter); dostępnego w firmie ReSe (www.rese.ch). Pakiet ATCORa występuje powszechnie w trzech wersjach: ATCOR2 do korekcji danych satelitarnych bez uwzględnienia NMT, ATCOR3 do korekcji danych satelitarnych z uwzględnieniem NMT oraz ATCOR4 do korekcji obrazów pozyskanych przez detektory szerokokątne (lotnicze).

³ BRDF – *Bidirectional Reflectance Distribution Function* – funkcja dwukierunkowego rozkładu odbicia.

⁴ Warunek ten wymagał takiego doboru punktu początkowego i końcowego, by azymut padania promieni słonecznych pokrywał się z azymutem lotu samolotu. Z tego względu pilotom dostarczono kilkanaście wersji linii nalogu uwzględniających dokładny czas (godzinę z dokładnością do minuty) rozpoczęcia zobrazowania danej linii nalogu, wysokość i azymut Słońca oraz punkt rozpoczęcia i zakończenia zobrazowania każdej linii.

¹ Skanery obrazujące składają się z kilku niezależnych detektorów (np. obrazujących w zakresie VIS, VIS-NIR, SWIR), każdy z detektorów pokrywa niewielką część spektrum zobrazowywanego przez inny skaner. W trakcie wstępnego przetwarzania obrazów należy usunąć pokrywające się przedziały spektrum.



Ryc. 13. Procedura przetwarzania hiperspektralnych, obrazowych danych lotniczych (źródło: Strobl i inni, 1996; Habermeyer i inni, 2003, zmodyfikowane)

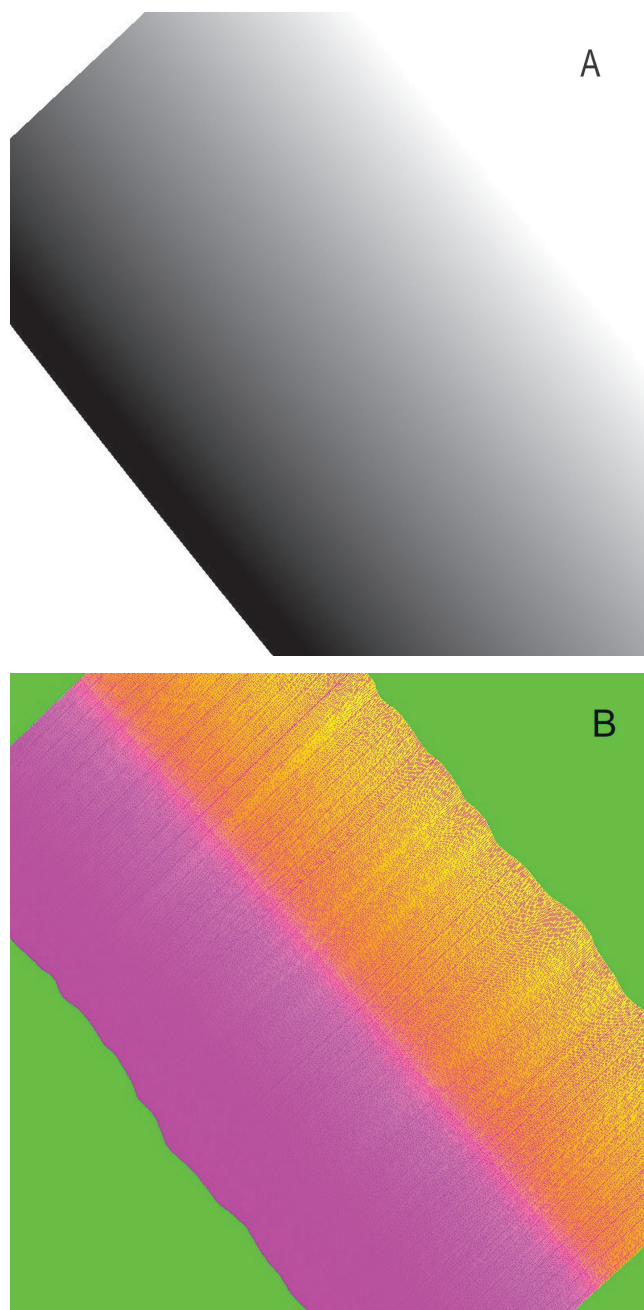
Fig. 13. Procedure of an airborne hyperspectral data processing (source: Strobl et al., 1996; Habermeyer et al., 2003, modified)

W efekcie nalotu nad obszar Tatr Wysokich obrazowaniem zostały pokryte po 4 pasy DAIS 7915 oraz Rosis. Z powodu problemów technicznych nalot na linie nr 1 oraz 3 został powtórzony i w końcowej wersji obrazowania funkcjonują one jako linia obrazowania nr 5 i 6. Na poszczególnych pasach obrazowania widać dobrą jakość obrazu, dzięki m.in. brakowi zachmurzenia (ryc. 15).

Korekcja geometryczna obrazów hiperspektralnych

Parametryczna geometryzacja bazuje na analizie położenia każdego piksela. Procedura wymaga informacji, które są zapisywane podczas lotu samolotu przez wewnętrzny system nawigacji INS. System ten rejestruje położenie samolotu w czasie rzeczywistym (wychylenia we wszystkich płaszczyznach ω , ϕ , κ) oraz różnicowy system pozycjonowania (DGPS), który podaje dokładne położenie samolotu w płaszczyznach x , y , z . Informacje te są uzupełniane dokładnym Numerycznym Modelem Terenu (Schläpfer, Richter, 2002). Na tej pod-

stawie tworzy się plik pozycjonowania każdego piksela. W pierwszym kroku następuje automatyczne wygenerowanie, pliku tzw. *scan angle file* (*.sca), w którym liczba kolumn odpowiada liczbie pikseli rejestrowanych w linii detektora (w przypadku DAIS 7915 jest to 512), natomiast liczba wierszy odpowiada rzeczywistej długości linii obrazowania. Różnicami fototonu przedstawione zostają różnice kąta między położeniem danego piksela, skanerem a rzutem linii lotu samolotu na powierzchnię



Ryc. 14. Plik pozycjonowania każdego piksela obrazu *.sca: A – wygenerowany automatycznie, B – po korekcji rzeczywistego lotu samolotu. Kompozycja barwna R (zmiany wysokości), G (kąt skanowania), B (azymut)

Fig. 14. Scan angle file (*.sca): A – generated automatically, B – after geometric correction according to the real flight parameters. RGB composition presents R (changes of altitudes), G (scan angle), B (azimuth)

terenu. W kolejnym kroku plik ten jest geometryzowany do docelowego układu współrzędnych, co pozwala na włączenie go do systemu zawierającego dane z rzeczywistego lotu samolotu. W efekcie uzyskuje się rzeczywisty obraz pozycjonowania samolotu. Granica pomiędzy barwami różową i pomarańczową a zieloną byłaby prostą, gdyby samolot nie wychylał się od założonej linii lotu w żadnym kierunku (ryc. 14).

Po zakończeniu tego etapu następuje tradycyjna geometryzacja obrazów przy użyciu punktów pomierzonych w terenie za pomocą GPS lub zidentyfikowanych na innych wysokorozdzielczych danych (wielkość błędu geometryzacji nie może być wyższa niż połowa wielkości piksela).

Na potrzeby geometryzacji danych DAIS7915 wykorzystano punkty GPS pomierzone w terenie za pomocą odbiornika DGPS udostępnionego przez TPN oraz Numeryczny Model Terenu opracowany z poziomich map topograficznych w skalach 1:10 000. Docelowym układem współrzędnych jest UTM (*Universal Transverse Mercator*) z elipsoidą WGS84. Poprawność obliczonych współrzędnych była kontrolowana przez porównanie ze zgeometryzowaną mapą topograficzną w skali 1:10 000 oraz pomierzonymi w terenie wybranymi punktami kontrolnymi, zapewniając dokładność pomiaru poniżej 1 metra.

Do przepróbkowania pikseli (*resampling*) wykorzystano metodę najbliższego sąsiada (*Nearest Neighbour*), która zapewnia zachowanie oryginalnych wartości pikseli (ryc. 15).⁵

Korekcja atmosferyczna obrazów hiperspektralnych

O konieczności przeprowadzenia korekcji atmosferycznej świadczy duża absorpcja promieniowania w atmosferze, szczególnie w widzialnym zakresie widma elektromagnetycznego (ryc. 16). Powoduje to duże fluktuacje jaskrawości pikseli (DN^6) poszczególnych kanałów różnych pasów zobrazowań, gdy każda linia nalotu została wykonana o innej porze dnia i przy innym kącie padania promieni słonecznych. Rycina 17 przedstawia przykładową różnicę w rejestracji sygnału przez detektor polowy i lotniczy. Zastosowanie automatycznych algorytmów klasyfikacji obiektów wg cech spektralnych wymagało doprowadzenia odpowiedzi spektralnych tych samych obiektów, zobrazowanych na różnych obszarach, do porównywalnych wartości spektralnych⁷.

W niniejszych pracach korekcja atmosferyczna została wykonana wraz z normalizacją topograficzną, która pozwala wyeliminować wpływ rzeźby (duże zróżnicowanie oświetlenia stoków zorientowanych ku padającemu promieniowi słońca oraz pozostających w cieniu). Elementem dodatkowym, aczkolwiek bardzo ważnym ze względu na lokalizację obszarów testowych w środowiskach górskich, było wykonanie empirycznej korekcji BRDF, czyli korekcji wpływu kierunku padania i odbicia promieni słonecznych, orografii terenu oraz pozycji detektora (Richter, 2004).

Korekcja atmosferyczna bazowała na kodach RTC (*Radiative Transfer Codes*) i modelu stanu atmosfery obszarów górskich wbudowanym do programu ATCOR⁸. Na dane wejściowe do korekcji składały się charakterystyki spektralne najważniejszych obiektów występujących na badanym terenie. Pomierzone one zostały w trakcie zobrazowania przy udziale niemieckich specjalistów (Andreas Mueller oraz Martin Habermeyer) i przy użyciu spektrometru hiperspektralnego GER3700 z DLR. Weryfikacja jakości korekcji atmosferycznej polegała na porównaniu spektrów referencyjnych (nie były one wykorzystane do korekcji) z wygenerowanymi z obrazu po jego korekcji. Na każdy pas zobrazowania wykorzystano 8-9 terenowych pomiarów spektrometrycznych, zarejestrowanych przez naziemne spektrometry hiperspektralne.

Proceduralnie korekcja atmosferyczna składała się z następujących etapów:

- wykonanie pomiarów spektrometrycznych wybranych obiektów w terenie (w czasie trwania zobrazowania lotniczego) za pomocą spektrometru hiperspektralnego GER3700. Każdy pomiar udokumentowany został precyzyjnym pomiarem GPS (o dokładności <1 m),
- konwersja rozdzielczości spektralnej pomiaru terenowego (760 kanałów) do rozdzielczości spektralnej skanera DAIS 7915⁹ (ryc. 18);
- załadowanie do programu ATCOR: skorygowanych geometrycznie obrazów DAIS 7915, spektrów pomierzonych w terenie (wraz z precyzyjną lokalizacją pomiaru), Numerycznego Modelu Terenu, informacji o dniu oraz godzinie wykonania zobrazowania (do obliczenia azymutu oraz kąta padania promieni słonecznych), podstawowych informacji o ciśnieniu atmosferycznym oraz temperaturze termodynamicznej i radiometrycznej wybranych obiektów. Parametry te pozwoliły na dopasowanie RTC oraz modelu atmosfery obszarów górskich zawar-

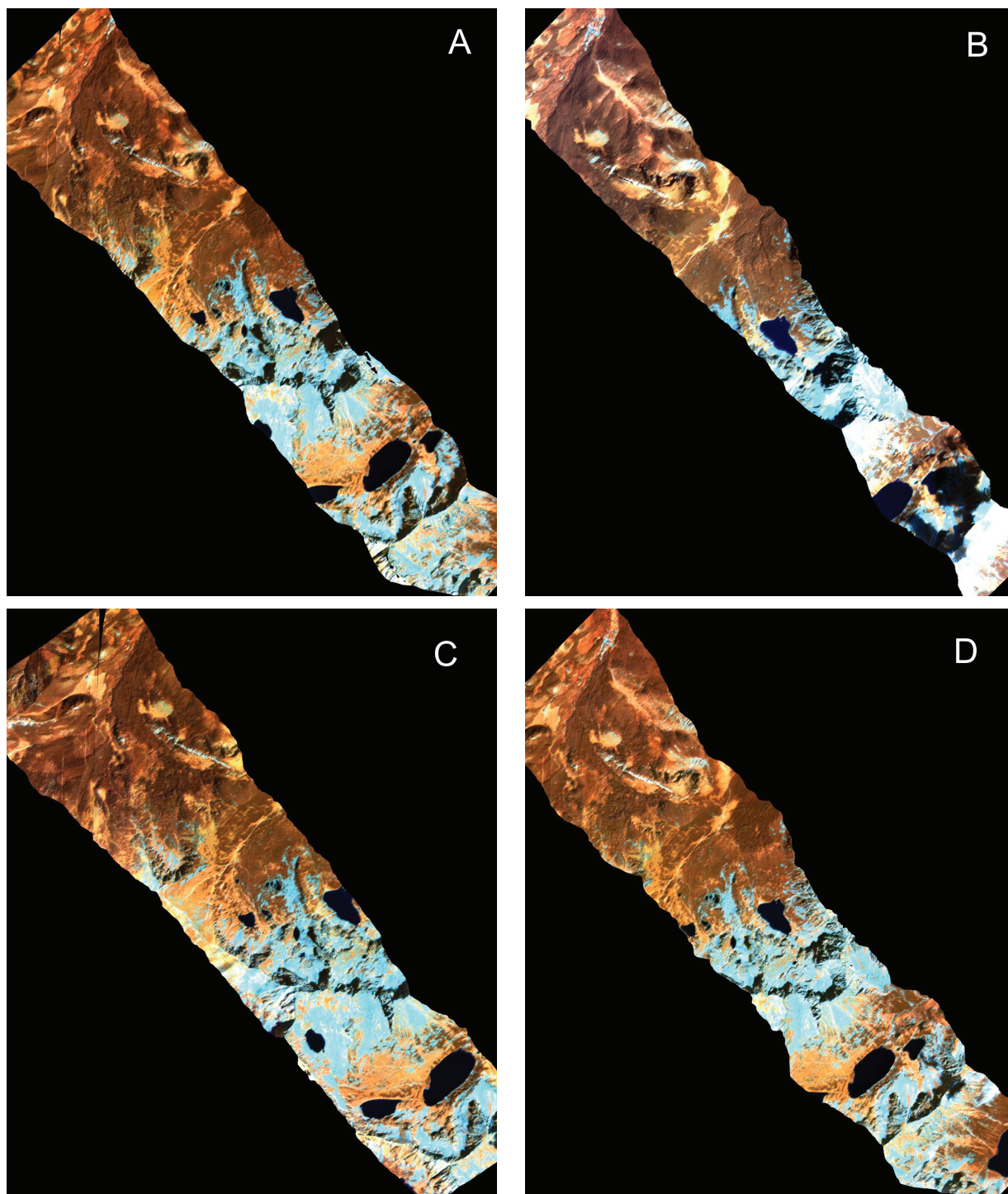
⁵ Wyniki klasyfikacji wraz ze współrzędnymi geograficznymi zaprezentowano na rycinach 28-35.

⁶ DN – *Digital Number* (jasność danego piksela).

⁷ W celu realizacji tego zadania konieczna była precyzyjna rejestracja odpowiedzi spektralnych wybranych obiektów (jasnych i ciemnych spektralnie) z tzw. poligonów kalibracyjnych (Zagajewski, 2009). Jako materiał referencyjny pozyskane były także spektra z pomiaru spektrometrem słonecznym, czyli wielospektralnego spektrometrem rejestrującym widmo Słońca (Klińska, 2004).

⁸ Opisuje on najbardziej typowe stany atmosfery występujące nad obszarami górskimi. Model ten bazuje na modelach transferu promieniowania przez atmosferę w zależności od zadanych parametrów (*Radiative Transfer Codes*, RTC). Niezbędnym elementem do korekcji atmosferycznej był także Numeryczny Model Terenu (Jakomulska, Sobczak, 2002; Richter, Schläpfer, 2002; Schläpfer, Richter, 2002).

⁹ Skaner DAIS 7915 w zakresie 450-2450 nm wykonuje zobrazowanie w 72 kanałach, pozostałe 7 kanałów przypada na zakres 3-5 μm (jeden kanał) oraz 8,7-12,3 μm – 6 kanałów.



Ryc. 15. Kompozycje RGB 22,12,1 (869, 693, 496 nm) poszczególnych linii zobrazowań DAIS 7915 Tatr Wysokich⁵: A – druga, B – czwarta, C – piąta, D – szósta

Fig. 15. RGB 22,12,1 (869, 693, 496 nm) compositions of the DAIS 7915 imagery of paths no.: A – 2nd, B – 4th, C – 5th, D – 6th

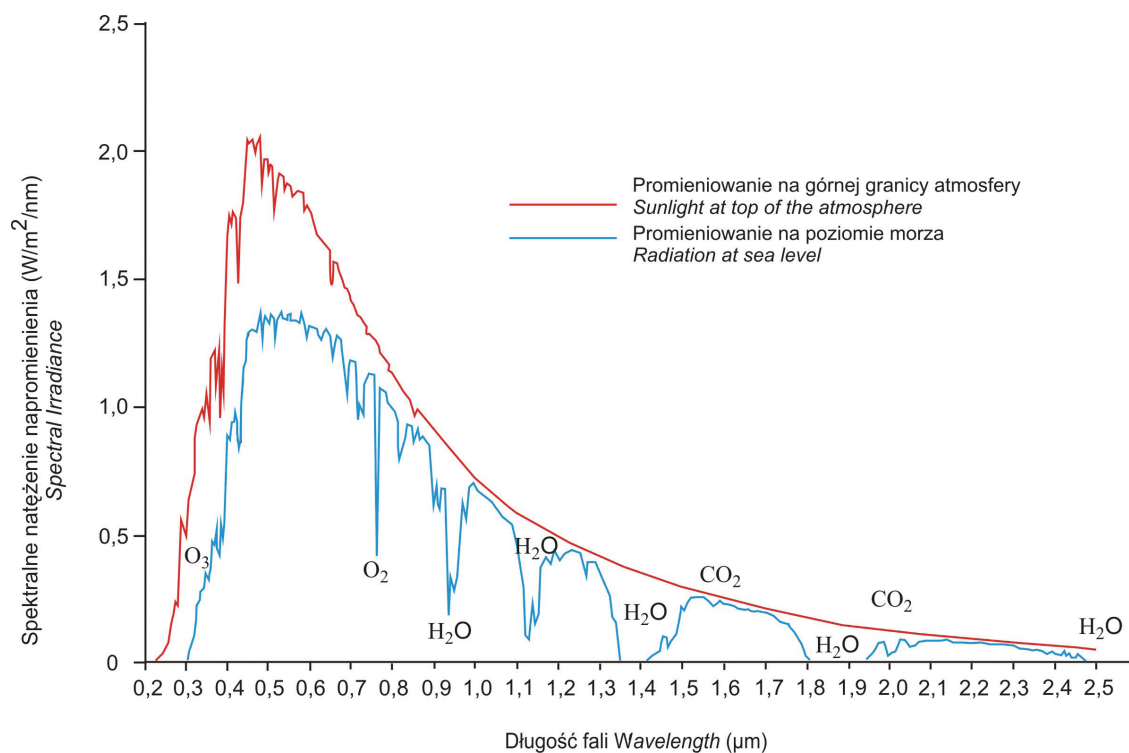
tych w ATCOR do warunków panujących podczas zobrazowania;

- wykonanie modelowania spektrów pozyskanych z pomiarów naziemnych i spektrów z odpowiadających im przestrzennie pikseli (ryc. 19)¹⁰;

¹⁰ Bazując na zaawansowanej bazie danych dotyczącej szacowania transferu promieniowania przez atmosferę MODTRAN, przystąpiono do modelowania składu atmosfery

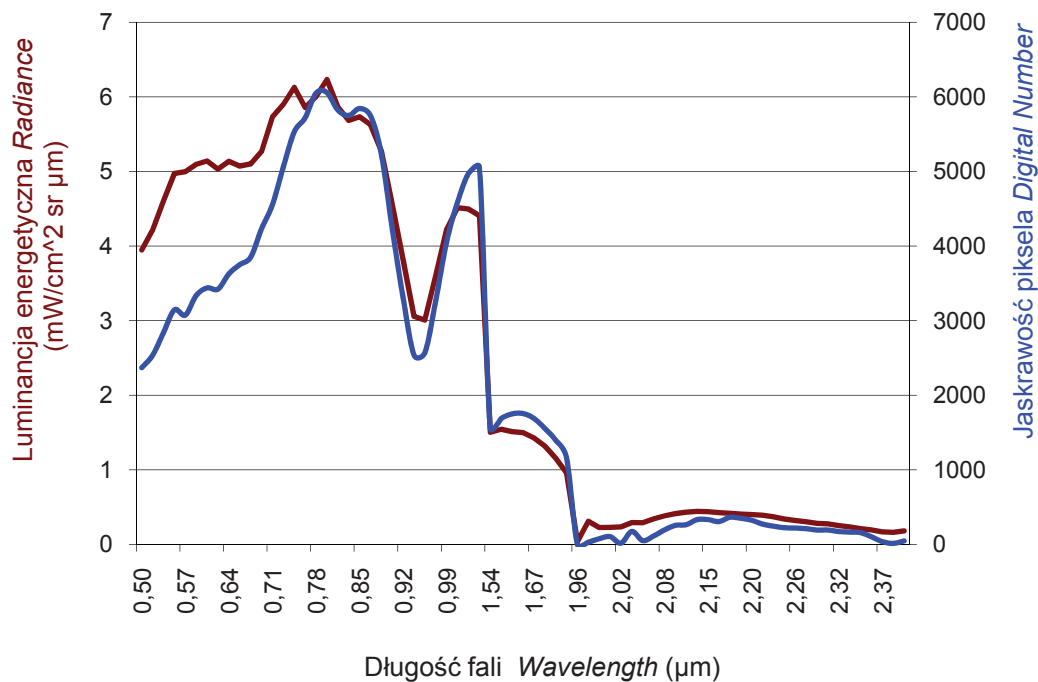
- porównanie uzyskanych wyników (ryc. 20).

i eliminacji jej wpływu na rejestrowany przez sensor obraz. Proces ten polegał na możliwie dokładnym określeniu parametrów meteorologicznych. Dane referencyjne pozyskano z automatycznych stacji pomiarowych zainstalowanych na Stacji Terenowej IGiPZ PAN na Hali Gąsienicowej (dodatkowo wykorzystywane były dane IGiPZ PAN pozyskane lokalnie z przenośnych stacji pomiarowych Hobo).



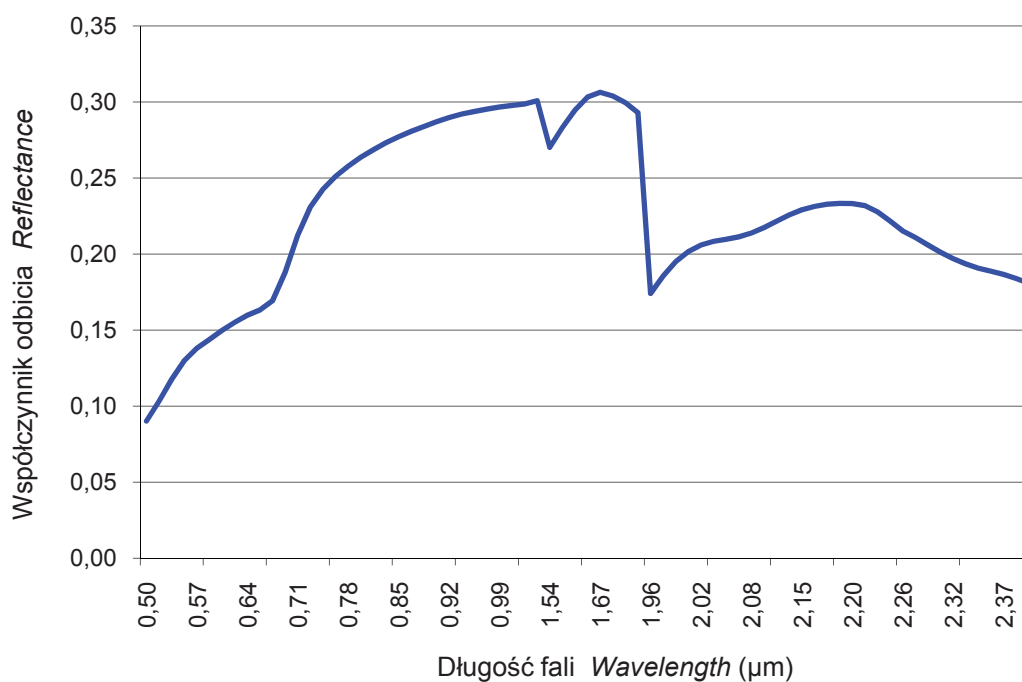
Ryc. 16. Natężenie napromienienia rejestrowanego na górnej warstwie atmosfery oraz na poziomie morza (źródło: Glossary, 2000, zmodyfikowane)

Fig. 16. Spectral irradiance at top of atmosphere and at sea level (source: Glossary, 2000, modified)



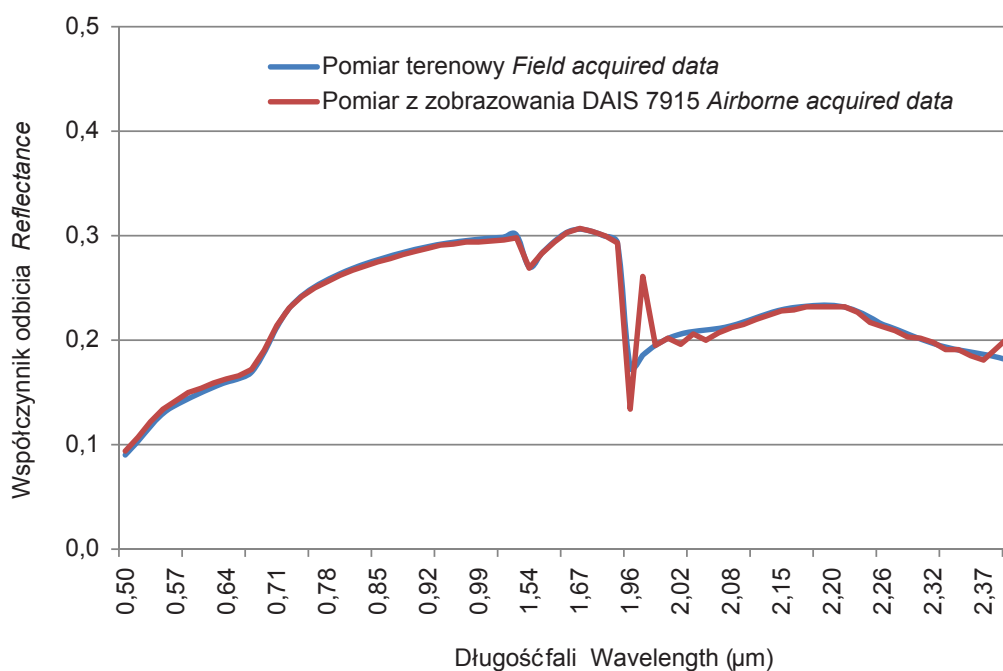
Ryc. 17. Porównanie jaskrawości piksela i luminancji energetycznej poligonu kalibracyjnego pomierzonego w terenie przed wykonaniem korekcji atmosferycznej

Fig. 17. Comparison of pixel's digital number acquired from airborne level (before atmospheric correction) and field measured radiance



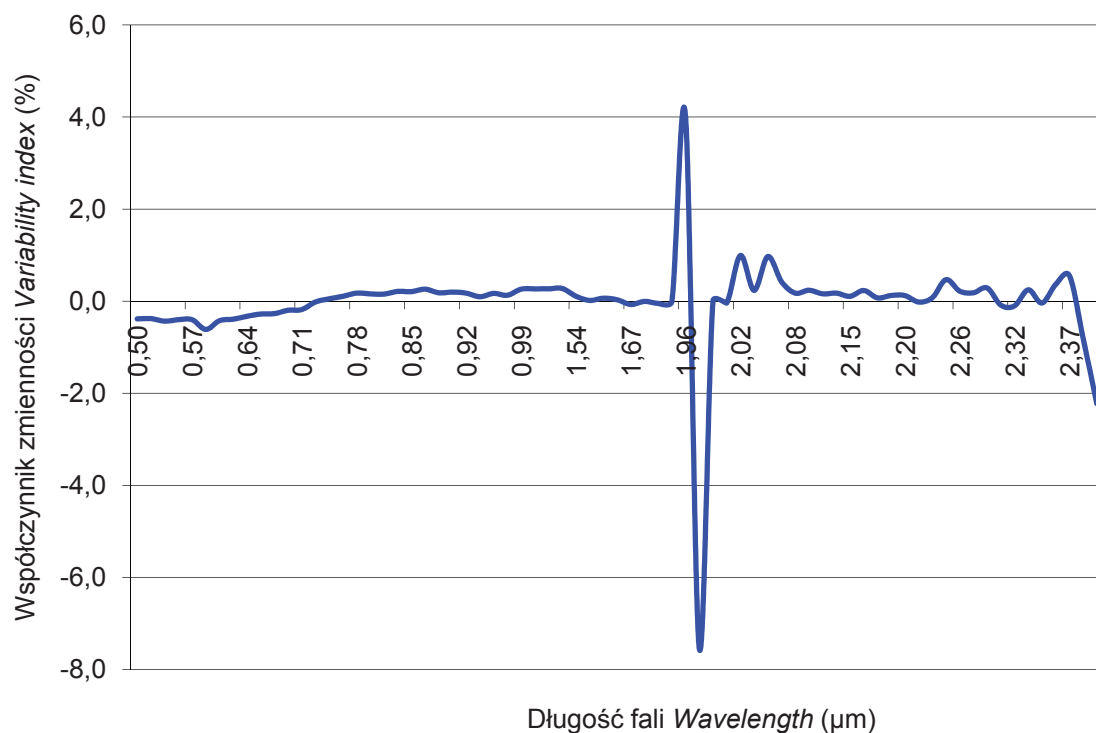
Ryc. 18. Krzywa odbicia spektralnego wybranego poligonu kalibracyjnego pomierzonego w terenie po przetworzeniu do rozdzielczości skanera DAIS 7915

Fig. 18. Field measured spectral characteristic of an atmospheric calibration target after a processing to the spectral resolution of the DAIS 7915 scanner



Ryc. 19. Porównanie charakterystyki spektralnej z pomiaru naziemnego oraz obrazowania po korekcji atmosferycznej

Fig. 19. Comparison of the field and airborne acquired spectral characteristic after the atmospheric correction



Ryc. 20. Współczynnik zmienności charakterystyk pomierzonych w terenie i z obrazu po korekcji atmosferycznej
 Fig. 20. Variability index of field and airborne acquired spectral characteristics after the atmospheric correction

Reasumując należy stwierdzić, że uzyskane wyniki korekcji atmosferycznej są satysfakcjonujące, gdyż charakterystyki spektralne uzyskiwane z różnych pasów zobrazowań po korekcji wahają się o kilka procent

względem pomierzonych w terenie. Na taki wynik niewątpliwie ogromny wpływ miała bardzo dobra pogoda – duża przezroczystość atmosfery i brak jakichkolwiek chmur.