

**ZNACZENIE KOREKCJI RADIOMETRYCZNEJ W PROCESIE
PRZETWARZANIA ZDJĘĆ SATELITARNYCH**

**THE IMPORTANCE OF RADIOMETRIC CORRECTION IN SATELLITE
IMAGES PROCESSING**

Katarzyna Osińska-Skotak

Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: korekcja radiometryczna, korekcja atmosferyczna

STRESZCZENIE: Korekcja radiometryczna jest wstępnym etapem przetwarzania danych satelitarnych, który ma na celu usunięcie błędów radiometrycznych oraz przede wszystkim przetworzenie obrazu satelitarnego na jednostki radiancji spektralnej, pochodzącej od powierzchni Ziemi lub odbicia spektralnego. Niestety ale w praktyce korekcja radiometryczna obrazów wielospektralnych rzadko kiedy wykonywana jest w pełnym zakresie. Wynika to z kilku różnych przyczyn o charakterze technicznym ale także historycznym, związanych z początkami powstawania technologii przetwarzania danych satelitarnych. I to właśnie te historyczne uwarunkowania wpłynęły na fakt, iż pełen proces korekcji radiometrycznej rzadko jest stosowany przy przetwarzaniu danych wielospektralnych. A przecież wykonanie korekcji radiometrycznej lub jej zaniechanie ma wpływ praktycznie na każdy rodzaj dalszego przetwarzania danych satelitarnych. Artykuł przedstawia ideę korekcji radiometrycznej, omawia jej etapy oraz prezentuje przykłady wpływu korekcji radiometrycznej na efekty różnych podstawowych, najczęściej wykonywanych przetworzeń obrazów satelitarnych.

1. WSTĘP

Korekcja radiometryczna jest wstępnym etapem przetwarzania danych satelitarnych. Ma ona na celu usunięcie błędów radiometrycznych oraz przede wszystkim przetworzenie obrazu satelitarnego na jednostki radiancji spektralnej lub odbicia spektralnego. Niestety w praktyce pełen proces korekcji radiometrycznej, w szczególności w odniesieniu do danych wielospektralnych, rzadko kiedy jest wykonywany. Ponadto często korekcja radiometryczna zdjęć satelitarnych kojarzy się jedynie z usuwaniem błędów radiometrycznych, którymi są np. błędne lub opuszczone linie bądź piksele oraz efekt prążkowania (z ang. *striping*). Wiele osób uważa, iż proces ten sprowadza się jedynie do poprawy jakości wizualnej wyświetlanego obrazu nazywając ten proces wręcz korekcją barwną. A w rzeczywistości istotą korekcji radiometrycznej jest uzyskanie poprawnej radiometrii obrazu, odzwierciedlającej rzeczywiste właściwości obiektów naziemnych bez czynników zakłócających rejestrację danych satelitarnych. Być może, iż na taki stan rzeczy ma również fakt, że dane zarejestrowane przez system satelitarny nazywamy danymi źródłowymi a przecież w rzeczywistości informację źródłową stanowi moc

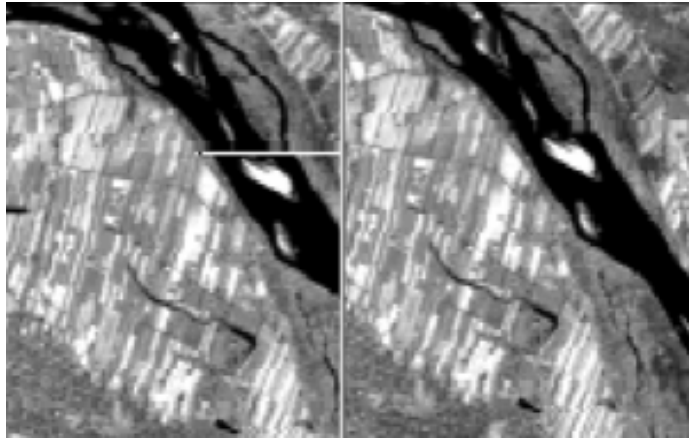
promieniowania odbitego bądź wyemitowanego przez obiekt naziemny, która jest przetwarzana na impuls elektryczny a następnie zamieniana na wartości radiometryczne w zapisie bitowym. Prawdopodobnie – w przypadku danych wielospektralnych – wynika to głównie z uwarunkowań historycznych. Na początku powstawania technik satelitarnego obrazowania powierzchni Ziemi dysponowano technologią na znacznie niższym poziomie rozwoju niż obecnie. Komputery pokładowe i komputery na stacjach naziemnych charakteryzowały się małą pojemnością dysków, dane przechowywano na taśmach magnetycznych a ich przetwarzanie sprowadzało się przede wszystkim do wyświetlenia poszczególnych zakresów spektralnych, stworzenia kompozycji barwnej i wydrukowania efektu końcowego. Dopiero wraz z rozwojem technologii komputerowej oraz metod obliczeniowych stało się realne cyfrowe przetwarzanie danych satelitarnych na coraz wyższych poziomach zaawansowania, ale jednak pewne nawyki przy przetwarzaniu danych wielospektralnych pozostały. Inna sytuacja panuje przy analizach danych hiperspektralnych czy radarowych. Tu nikt nie pokusi się o pracę na danych źródłowych, nie poddanych specjalnym korekcjom radiometrycznym i geometrycznym, mającym na celu odtworzenie rzeczywistego obrazu właściwości powierzchni Ziemi. Można więc sobie zadać pytanie dlaczego dane wielospektralne, mimo rozwoju technologii i wiedzy nadal są przetwarzane jak dawniej? Wielu naukowców stwierdza, że dla większości zastosowań wystarczy usunięcie jedynie najbardziej istotnych błędów radiometrycznych i geometrycznych, natomiast stosowanie bardziej precyzyjnej korekcji jest konieczne jedynie dla niektórych prac (Richards, 1993).

2. KOREKCJA RADIOMETRYCZNA

Korekcja radiometryczna danych satelitarnych jest procesem bardzo złożonym. Moc sygnału odbieranego przez detektor na poziome satelity zależy m.in. od oświetlenia terenu, warunków atmosferycznych, geometrii obserwacji oraz charakterystyki instrumentu (Lillesand, Kiefer, 1987; Jensen, 1997). Głównymi etapami korekcji radiometrycznej są:

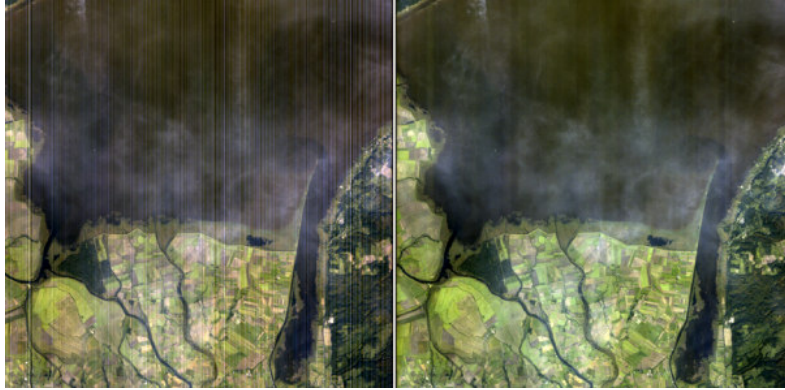
1. usunięcie dystorsji radiometrycznych, wynikających m. in. z niejednakowej funkcji przenoszenia sygnału każdego z detektorów linijki bądź matrycy skanera oraz z błędów w transmisji danych,
2. kalibracja detektorów, określana również mianem konwersji/zamiany wartości radiometrycznych DN na wartości bezwzględne radiancji (Lillesand, Kiefer, 1987),
3. korekcja atmosferyczna,
4. korekcja wpływu położenia Słońca, zwana w niektórych publikacjach (Jakomulska, Sobczak, 2001) korekcją słoneczną,
5. korekcja topograficzna uwzględniająca wpływ deniwelacji terenu i zacinienia.

Pierwszym etapem korekcji radiometrycznej jest usunięcie dystorsji radiometrycznych, które są spowodowane albo błędami w transmisji danych, albo niejednakową funkcją przenoszenia sygnału dla jednego bądź kilku detektorów. Pierwszy czynnik ma charakter przypadkowy i uwidacznia się najczęściej jako tzw. błędne linie (Rys. 1) lub błędne piksele.



Rys. 1. Korekcja radiometryczna obrazu LANDSAT TM – obraz przed i po usunięciu błędnej linii.

Drugi czynnik ma charakter systematyczny i w wyniku daje efekt prążkowania (Rys. 2). Spowodowany on jest niejednakową odpowiedzią jednego lub kilku detektorów w matrycy na odbieraną moc promieniowania. Aby obraz był rejestrowany poprawnie, każdy z elementów linijki bądź matrycy detektorów powinien charakteryzować się identyczną funkcją przenoszenia sygnału. W praktyce jest to trudne do uzyskania a ponadto w miarę eksploatacji systemu satelitarnego niektóre z detektorów szybciej się zużywają, dając inną odpowiedź na tę samą moc padającego na nie promieniowania elektromagnetycznego. W przypadku niektórych systemów satelitarnych (m.in. LANDSAT TM lub ETM+, ASTER) do wyeliminowania efektu prążkowania o charakterze systematycznym można wykorzystać specjalnie dedykowane algorytmy, uwzględniające specyfikę systemu satelitarnego. Czasami do tych błędów dochodzi szum o bardziej złożonym charakterze, którego usunięcie stanowi już duży kłopot (np. dane CHRIS/PROBA). Pionowy szum skanera CHRIS spowodowany jest z jednej strony błędami w równym ustawieniu sensorów w instrumencie, które można uznać za błędy stałe, a z drugiej strony wynika z fluktuacji temperatury powodującej niewielkie zmiany w ustawieniu elementów optycznych, co skutkuje szumem pionowym o zmiennym charakterze (Garcia, Moreno, 2004 za Settle, 2001). W ostatnim roku ESA zamieściła na swoich stronach internetowych aplikację umożliwiającą częściowe wyeliminowanie szumów na obrazach CHRIS/PROBA, opracowany przez Jeffa Settle'a z Uniwersytetu w Reading, ale nie gwarantuje on uzyskania dobrego efektu dla wszystkich rejestrowanych obrazów.



Rys. 2. Obraz przed i po usunięciu błędnych linii, efektu prążkowania i szumów na obrazie satelitarnym CHRIS/PROBA zarejestrowanym 1 kwietnia 2007 r.

Etap drugi korekcji radiometrycznej polega na konwersji bezwymiarowych wartości radiometrycznych DN, zarejestrowanych przez detektory satelitarne, na radiancję spektralną na górnej granicy atmosfery. Zwykle zależność pomiędzy DN a rejestrowaną radiancją jest liniowa ale przeskalowanie jest różne dla różnych zakresów rejestrowanego promieniowania. Numeryczna wartość radiometryczna piksela DN przeliczana jest na wartość radiancji spektralnej L_{sat} rejestrowaną na poziomie satelity według następującej zależności:

$$(1) L_{sat} = c_0 + c_1 DN$$

gdzie c_0 i c_1 to unikalne dla danego skanera i rejestrowanego zakresu spektralnego stałe kalibracyjne, zwane również przesunięciem (z ang. *offset*) i wzmocnieniem (z ang. *gain* lub *bias*), albo według wzoru:

$$(2) L_{sat} = L_{min} + \frac{L_{max} - L_{min}}{DN_{max} - DN_{min}} \cdot DN$$

gdzie L_{min} i L_{max} to odpowiednio najniższa i najwyższa wartość radiancji spektralnej rejestrowanej na poziomie satelity, a DN_{min} i DN_{max} to najniższa i najwyższa wartość radiometryczna. Potrzebne do tej operacji stałe kalibracyjne c_0 i c_1 lub wartości L_{min} i L_{max} znajdują się w metadanych dołączanych do danych satelitarnych lub można je znaleźć na stronach internetowych poszczególnych dystrybutorów danych satelitarnych.

Kolejny etap – najtrudniejszy i najbardziej kłopotliwy do wykonania – to korekcja atmosferyczna, która określa wpływ atmosfery i aerozoli w niej zawartych na sygnał odbierany przez detektory umieszczone na platformie satelitarnej. Atmosfera ma duży wpływ na prawidłowe oddanie obrazu powierzchni terenu z pułapu satelitarnego. Zachodzące w niej zjawiska i procesy oddziałują na moc promieniowania elektromagnetycznego rejestrowanego przez detektory. Korekcja atmosferyczna obrazów

satelitarnych polega na wyeliminowaniu bądź ograniczeniu niekorzystnego wpływu atmosfery. Jest to jednak proces o dużym stopniu skomplikowania, a brak danych do jej wykonania powoduje, iż korekcja atmosferyczna jest najczęściej pomijana w procesie przetwarzania danych satelitarnych. Pominięcie tego etapu korekcji radiometrycznej powoduje przede wszystkim:

- błąd w analizach ilościowych (np. określenie wartości odbicia promieniowania, albedo, temperatury powierzchni, obliczenie wskaźników roślinności),
- utrudnienie porównania serii danych wieloczasowych,
- utrudnienie porównania pomiarów radiometrycznych naziemnych i pomiarów satelitarnych lub lotniczych,
- utrudnienie przy porównywaniu sygnatur spektralnych w czasie i/lub przestrzeni,
- wpływa na dokładność klasyfikacji obrazów wielospektralnych.

Problematyka korekcji atmosferycznej obrazów satelitarnych zajmuje naukowców na całym świecie praktycznie od samego początku teledetekcji satelitarnej. Nieustannie prowadzone są badania pogłębiające wiedzę na ten temat. Powstają kolejne metody i algorytmy korekcji atmosferycznej uwzględniające w różnym stopniu oddziaływanie granicznej warstwy atmosfery na promieniowanie elektromagnetyczne. Wiele metod uproszczonej korekcji atmosferycznej opisuje szereg podręczników z zakresu teledetekcji (Cracknell, Hayes, 1991; Richards, 1993; Jensen, 1997). W obecnej chwili do korekcji atmosferycznej można wykorzystać kilka modeli i aplikacji: ATCOR (Richter, 1998a, 1998b), LOWTRAN (Kneizys i in., 1996), MODTRAN (Kneizys i in., 1996), 6S – Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum (Vermote i in., 1997), WATCOR¹ (The, 2004). Należy jednak pamiętać, że wykorzystują one tzw. modele średnich atmosfer klimatycznych, które prezentują średni stan atmosfery w określonym rejonie klimatycznym, a nie stan panujący w chwili rejestracji danych satelitarnych.

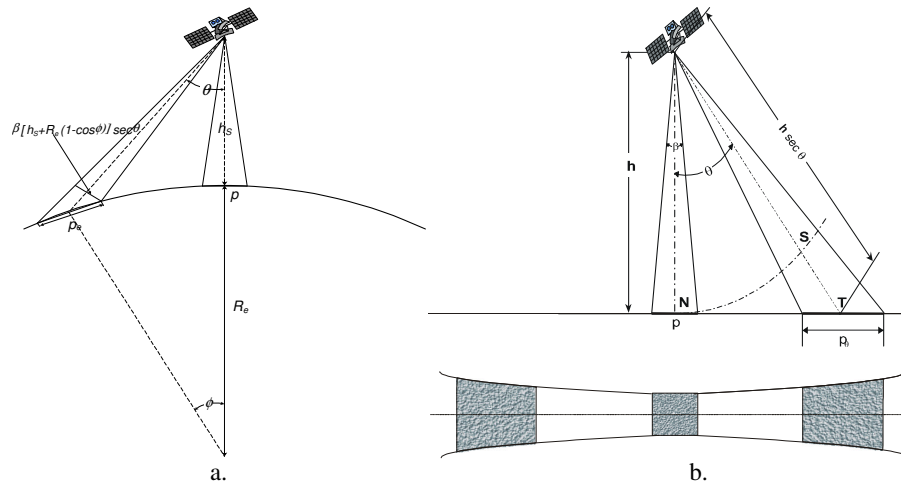
Korekcja wpływu położenia Słońca w momencie rejestracji danych – kolejny etap korekcji radiometrycznej – ma na celu uwzględnienie wpływu zmienności oświetlenia wzdłuż lotu satelity oraz zmian zachodzących w relacji pomiędzy kątem widzenia skanera i kątem padania promieni słonecznych, co pozwala m.in. porównywać dane zarejestrowane w różnych porach roku.

Z kolei korekcja topograficzna uwzględnia wpływ deniwelacji i zacielenia, czyli obszary o zróżnicowanym ukształtowaniu terenu zostają pozbawione wpływu niejednorodnego i niejednorodnego oświetlenia, np. na zboczach gór. Ten etap jest szczególnie istotny przy przetwarzaniu danych dla terenów wyżynnych i górskich, ale może być także ważnym etapem poprzedzającym klasyfikację danych dla obszarów zurbanizowanych. Scena satelitarna po usunięciu wpływu zacielenia jest oczywiście mniej kontrastowa, ale wiele detali niewidocznych na scenie oryginalnej jest lepiej widoczna (Richter, 2006). Ponieważ pozbawia on dane obrazowe niekorzystnego wpływu zacielenia, ułatwia klasyfikację terenów miejskich.

Dodatkowymi przyczynami zmian w radiometrii obrazów satelitarnych są także: zmienność kąta widzenia w poprzek linii skanowania (Rys. 3b), zakrzywienie Ziemi (Rys. 3a), wychylenie platformy teledetekcyjnej (zdjęcia nachylone rejestrowane pod pewnym kątem zarówno wzdłuż, jak i w poprzek linii lotu), zmiany w orientacji platformy

¹ specjalnie dedykowany badaniom morza

urządzeń rejestracyjnych w czasie lotu/skanowania. Wszystkie wymienione tu czynniki mają charakter geometryczny ale wpływają na zmianę wielkości rejestrowanego piksela, czyli powierzchni z jakiej odbierany jest sygnał, rejestrowany przez skaner satelitarnej. Chwilowe pole widzenia w mierze kątowej ma zawsze tą samą wielkość, ale rozmiar wymiarów liniowych piksela ulega zmianie w zależności od wielkości sceny satelitarnej oraz od charakteru obserwacji (nadirowa czy wychylona). Ma to ogromny wpływ na całkowitą moc promieniowania odbieranego przez detektory. Większy rozmiar piksela oznacza rejestrowanie promieniowania pochodzącego od większej powierzchni, czyli odbierana/ rejestrowana moc promieniowania jest również większa. W przypadku scen satelitarnych o niewielkich rozmiarach oraz małym chwilowym polu widzenia, rozmiar pikseli jest praktycznie taki sam na obszarze pojedynczej sceny. Przykładowo dla systemu LANDSAT ETM+ przy obserwacji nadirowej zniekształcenie poprzeczne wynikające z zakrzywienia Ziemi na krawędzi sceny (przy $\theta = 7,5^\circ$) wynosi około 1,1%, czyli wielkość piksela w poprzek skanowania ma zamiast 30 m wymiar 30,3 m. Łączny wpływ kąta skanowania i krzywizny Ziemi sięga maksymalnie 2,1% piksel ma wówczas 30,63 m (Osińska-Skotak K., 2001).



Rys. 3. Wpływ krzywizny Ziemi na rozmiar piksela (a) oraz efekt dystorsji panoramicznej występujący podczas skanowania (b) (opracowano na podstawie Richards J.A., 1993).

R_e – promień Ziemi, ϕ – szerokość geograficzna, θ – kąt skanowania, β – kątowe pole widzenia skanera, h_s – wysokość lotu, p – rozmiar piksela w punkcie podsatelitarnym, p_e – efektywny rozmiar piksela.

Dla satelity SPOT5, którego kąt obserwacji jest mniejszy ($\theta = 2,1^\circ$) wpływ zakrzywienia Ziemi jest znikomy (na skraju sceny 0,08%), zaś łączny wpływ kąta skanowania i krzywizny Ziemi wynosi około 0,15%. Oznacza to, że dla wariantu wielospektralnego wielkość piksela w kierunku poprzecznym wzrasta o 0,015 m. Widać więc, że jest to wielkość niewielka, którą można pominąć. W przypadku maksymalnego wychylenia zwierciadła wpływ krzywizny Ziemi jest znacznie większy. Dla satelity SPOT5

przy maksymalnym odchyleniu zwierciadła ($\pm 27^\circ$) rozmiar piksela obrazu wielospektralnego ulega zwiększeniu o 33% w stosunku do punktu podsatelitarnego, ale w obrębie pojedynczej sceny (szerokość pasa skanowania 60 km) rozmiar piksela ulega zmianie od 12,2 do 13,3 m. Znaczny wpływ krzywizny Ziemi obserwuje się dla systemów o dużo większym pasie skanowania. Dla satelity NOAA, który ma szeroki pas obserwacji (2700 km) i wysokość lotu 833 km, wpływ krzywizny Ziemi silnie rośnie wraz ze wzrostem kąta skanowania. Przy kącie skanowania 16° (240 km od punktu podsatelitarnego) wielkość piksela wzrasta o 10% czyli o 110 m a przy krawędzi sceny aż o blisko 400% (Osińska-Skotak K., 2001).

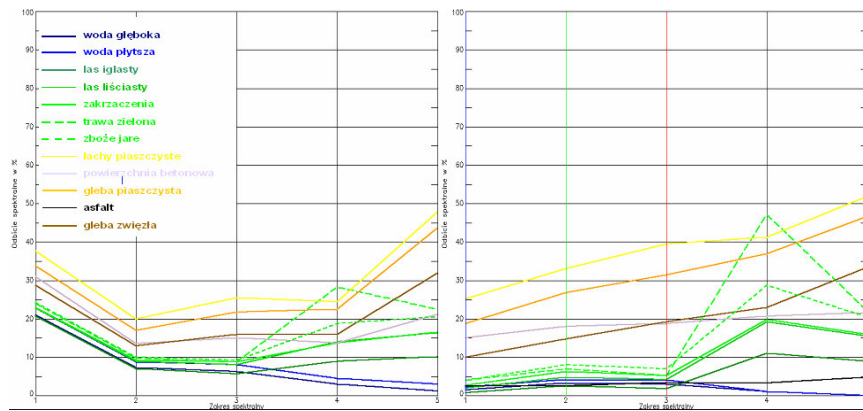
Obecnie, coraz więcej systemów satelitarnych posiada możliwość rejestracji danych przy wychyleniu od nadiru. W przypadku scen satelitarnych o stosunkowo niewielkich rozmiarach można powiedzieć, że w obrębie pojedynczej, nawet odchylonej od nadiru, sceny zmiany rozmiaru piksela są na tyle niewielkie, iż można pominąć jego wpływ na różnego rodzaju analizy. Jeśli jednak rozmiar sceny satelitarnej jest znaczny albo jeśli prowadzimy analizy wieloczasowe wprowadzenie korekcji radiometrycznej z tytułu zmiany wielkości piksela w obrębie sceny satelitarnej może mieć istotny wpływ na prowadzone analizy, szczególnie o charakterze ilościowym.

3. WPŁYW KOREKCJI RADIOMETRYCZNEJ NA DALSZE ETAPY PRZETWARZANIA ZDJĘĆ SATELITARNYCH

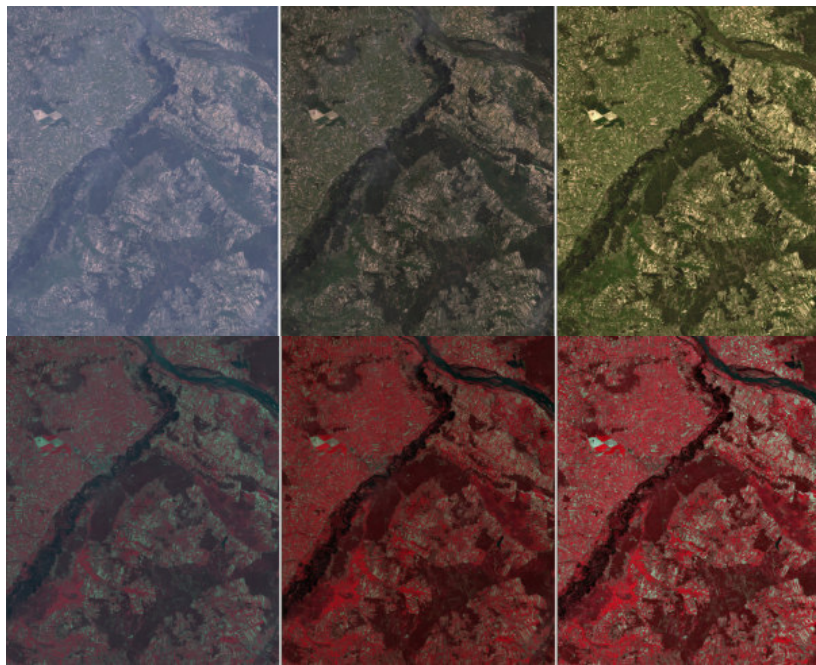
Korekcja radiometryczna, jej poszczególne etapy, rzutuje na dalsze etapy przetwarzania zdjęć satelitarnych. Począwszy od tworzenia kompozycji barwnych, poprzez obliczanie wskaźników roślinności, klasyfikację cyfrową, podwyższanie rozdzielczości zdjęć wielospektralnych z wykorzystaniem zdjęć panchromatycznych a skończywszy na bardzo wyrafinowanych technikach analizy obrazu cyfrowego. Poniżej przedstawione zostaną przykłady ilustrujące wpływ korekcji radiometrycznej na różne, najczęściej wykonywane przetworzenia zdjęć satelitarnych.

3.1. Tworzenie kompozycji barwnych

Rejestrowane zakresy spektralne mają różną szerokość ale także różna jest moc promieniowania o określonej długości fali, a co za tym idzie różne są współczynniki kalibracyjne, i to wpływa na fakt, że konwersja wartości radiometrycznych na radiancję spektralną powoduje zmiany w nasyceniu barw tworzonych kompozycjach barwnych (Rys. 5). Korekcja atmosferyczna – usuwająca m.in. efekt mgiełki atmosferycznej – powoduje, że uzyskujemy obraz, który jeszcze bardziej uwypukla zróżnicowanie poszczególnych obiektów terenowych. Podobny efekt wizualny można uzyskać przy zastosowaniu nieco bardziej wyrafinowanych funkcji rozciągania kontrastu, ale wówczas nie mamy obrazu, który wyrażony jest w jednostkach energetycznych. Rys. 4 prezentuje ilościowo wpływ korekcji atmosferycznej na wartość odbicia spektralnego wybranych obiektów. Można zauważyć, że po korekcji atmosferycznej – poza usunięciem mgiełki atmosferycznej w zakresach widzialnych – występuje większe zróżnicowanie odbicia promieniowania dla różnych typów roślinności czy gleby. Można więc sądzić, iż interpretacja wizualna kompozycji barwnej utworzonej z kanałów spektralnych poddanych korekcji atmosferycznej może być bardziej szczegółowa.



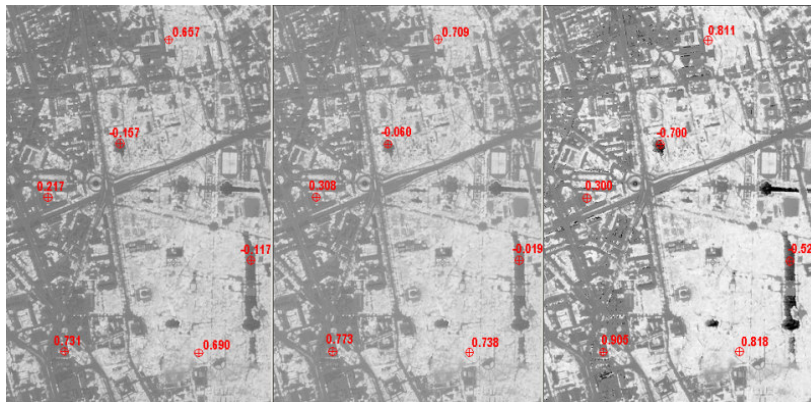
Rys. 4. Charakterystyki spektralne wybranych obiektów opracowane na podstawie danych satelitarnych LANDSAT TM (2 kwietnia) nie poddanych korekcji (wykresy z lewej strony) oraz poddanych korekcji atmosferycznej w module ATCOR (wykresy z prawej strony).



Rys. 5. Kompozycje barwne (RGB=321 oraz RGB=432) utworzone na podstawie oryginalnego obrazu LANDSAT TM (lewa kolumna), obrazu poddanego korekcji radiometrycznej – konwersji bezwymiarowych wartości numerycznych DN na radiancję spektralną (środkowa kolumna) oraz na podstawie obrazu poddanego korekcji atmosferycznej (prawa kolumna). Zastosowano liniową metodę rozciągania kontrastu od wartości minimalnej do maksymalnej.

3.2. Wskaźniki roślinności

Z definicji wskaźnika roślinności NDVI wynika, iż powinien być on obliczany na podstawie wartości odbicia spektralnego w zakresie promieniowania czerwonego i bliskiej podczerwieni. Często się jednak zdarza, że do określenia NDVI wykorzystywane są wartości radiometryczne DN bez żadnej korekcji. Dla pewnego zilustrowania zróżnicowania roślinności na analizowanym obszarze można się pokusić o takie przetworzenie, ale należy mieć na uwadze, iż wartości NDVI będą obciążone znacznym błędem i nie należy wykorzystywać ich np. w prognozowaniu plonów. Mc Donald i in. (1998) wykazali, że różnice między wartością NDVI mierzoną na poziomie górnej granicy atmosfery i wartością uzyskana z pomiaru na powierzchni Ziemi mogą sięgać nawet 50%. Rysunek 6 ilustruje w jaki sposób korekcja radiometryczna wpływa na wartości NDVI. Widać, że dla obszarów pokrytych roślinnością wskaźnik NDVI wzrasta nawet o ok. 0,10-0,15 (np. z 0,657 do 0,811), gdy do obliczeń wykorzystamy dane poddane korekcji atmosferycznej. Problem jest jeszcze większy, gdy porównujemy dane z różnych terminów, zarejestrowane przy różnych warunkach pogodowych albo pod różnymi kątami. Można sobie wyobrazić, jaką możemy uzyskać różnicę w wielkości prognozowanych – na tej podstawie – plonów.



Rys. 6. Wskaźnik roślinności NDVI obliczony na podstawie obrazu źródłowego LANDSAT ETM+ (lewy), obrazu poddanego kalibracji detektorów (środkowy) oraz obrazu po korekcji atmosferycznej (prawy).

3.3. Klasyfikacja danych satelitarnych

Generalnie panuje przekonanie, że korekcja radiometryczna nie ma dużego wpływu na analizy jakościowe, takie jak np. klasyfikacja pokrycia terenu. Doniesień literaturowych na temat wpływu korekcji radiometrycznej na wyniki klasyfikacji wielospektralnej jest bardzo mało. Parlow (1996) stwierdza, że w przypadku wykonywania klasyfikacji lepsze wyniki daje wykorzystanie danych skorygowanych, zarówno pod względem korekcji wpływu oświetlenia (położenia Słońca), jak i korekcji atmosferycznej. Uważa on, że

w przypadku terenów górskich etap korekcji atmosferycznej jest tak samo ważny, jak korekcja geometryczna.

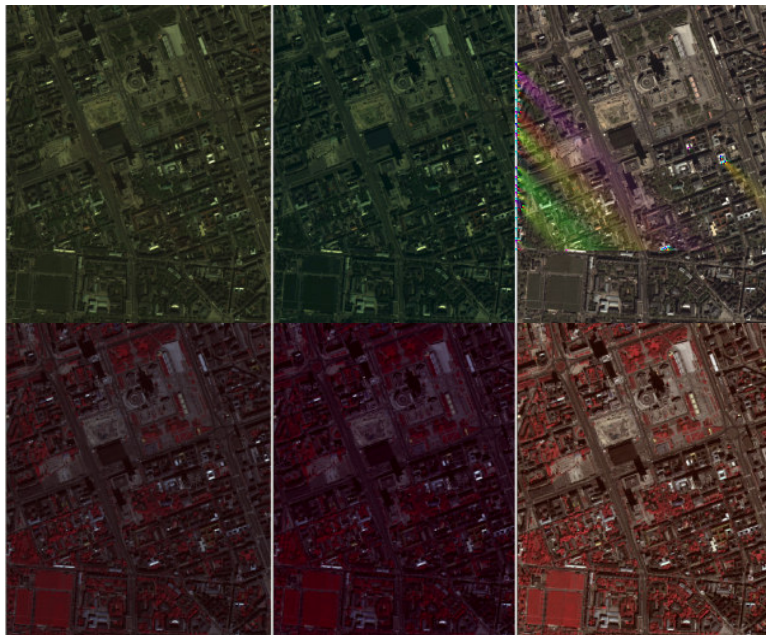
W wyniku badań przeprowadzonych w Laboratorium Teledetekcji i SIP Wydziału Geodezji i Kartografii PW na przykładzie danych satelitarnych LANDSAT oraz SPOT w latach 2003-2005 (Osińska-Skotak, 2005) okazało się, że korekcja atmosferyczna ma dość istotny wpływ na wynik klasyfikacji cyfrowej, ale wpływ ten zależy od stopnia szczegółowości klasyfikacji. Potwierdzenie tych badań znaleziono również w ramach grantu nr 4 T12E 025 28 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, gdzie przeprowadzono ocenę wpływu korekcji atmosferycznej na klasyfikację obrazów wysokorozdzielczych. We wszystkich przypadkach analizę przeprowadzono na trzech poziomach. Najpierw przeanalizowano wpływ korekcji atmosferycznej na sygnatury pól treningowych, następnie porównano wyniki klasyfikacji szczegółowej (ok. 40 klas) a na końcu klasyfikację zagregowaną (15 klas). Praktycznie dla każdego pola treningowego w każdym z zakresów spektralnych zauważyć można zmianę odchylenia standardowego po dokonaniu korekcji danych. Oznacza to, że korekcja atmosferyczna powoduje większe zróżnicowanie różnych typów pokrycia terenu, czyli umożliwia bardziej szczegółową delimitację klas. Dotyczy to w szczególności klas związanych z roślinnością, ale również gleb odkrytych. W przypadku klasyfikacji zagregowanej do kilkunastu klas pokrycia terenu wpływ korekcji radiometrycznej, w tym również korekcji atmosferycznej, jest stosunkowo niewielki.

3.4. Łączenie danych wielospektralnych i panchromatycznych

W ostatnich latach algorytmy łączenia danych wielospektralnych i panchromatycznych (z ang. *image fusion*, *image merging*) ponownie znalazły się w spektrum zainteresowania wielu naukowców na świecie. Około dwadzieścia lat temu opracowano pierwsze algorytmy łączenia danych wielospektralnych i panchromatycznych dedykowane specjalnie dla obrazów SPOT. Od tego czasu wypracowano szereg metod umożliwiających uzyskanie obrazów typu *pan-sharpen*. Obecnie najważniejsze prace skupiają się na opracowaniu metod, które pozwolą na łączenie danych – w tym także wysokorozdzielczych – w taki sposób, aby obraz wynikowy miał zachowaną w jak najlepszy sposób charakterystykę radiometryczną źródłowych danych wielospektralnych i charakterystykę geometryczną danych panchromatycznych.

Na ogół podczas łączenia danych wielospektralnych i panchromatycznych wykorzystuje się obrazy satelitarne, które poddano jedynie procesowi ortorektyfikacji. Rzadko kiedy wykonuje się ich wcześniejszą korekcję radiometryczną i atmosferyczną, a jak ilustruje Rys. 7, każdy etap korekcji radiometrycznej może mieć wpływ na wynik końcowy łączenia danych satelitarnych. Wynika to m.in. z faktu, iż szerokość rejestrowanych zakresów długości fali promieniowania oraz jego moc jest różna w poszczególnych kanałach a dopiero wykonanie etapu kalibracji detektorów pozwala na uzyskanie wartości w jednostkach energetycznych, które mają sens fizyczny. Z kolei korekcja atmosferyczna pozwala na uzyskanie wartości odbicia spektralnego na poziomie Ziemi. Ponieważ coraz częściej tego rodzaju przetworzenia wykorzystywane będą do analiz

ilościowych (np. obliczanie NDVI dla celów rolnictwa precyzyjnego²), to należałoby również i w tym wypadku przywiązywać równie dużą wagę do korekcji radiometrycznej co do korekcji geometrycznej.



Rys. 7. Wpływ korekcji radiometrycznej na wynik łączenia danych wielospektralnych i panchromatycznych QuickBird (3 maja 2004 r.). Po lewej stronie – wynik uzyskany na podstawie danych źródłowych, w środku – wynik po przetworzeniu obrazów poddanych kalibracji detektorów, po prawej – rezultat uzyskany na podstawie obrazów poddanych dodatkowo korekcji atmosferycznej.

3.5. Obliczanie parametrów fizycznych, biologicznych i chemicznych różnych obiektów na podstawie danych satelitarnych

O ile w przypadku wykonywania analiz o charakterze jakościowym stwierdzenie, iż korekcja radiometryczna ma niewielkie znaczenie na wynik, można uznać w pewnym uproszczeniu za prawdziwe, o tyle w odniesieniu do prowadzenia analiz ilościowych korekcja radiometryczna ma istotny wpływ na wynik końcowy. Najczęściej w praktyce teledetekcyjnej wykonuje się obliczenia wskaźników roślinności, temperatury radiacyjnej, temperatury powierzchni czynnej, ale wraz z rozwojem techniki i pojawianiem się większej

² http://www.skmconsulting.com/Markets/spatial/Precision_Agriculture_Image_Products.htm (04.05.2008, 15:34)

liczby systemów super- i hyperspektralnych coraz częściej prowadzi się prace nad ich wykorzystaniem do określenia rozkładu różnego rodzaju parametrów fizycznych (np. temperatura, mętność), biologicznych (np. liczba bakterii Coli w wodzie) i chemicznych (np. zawartość różnych związków w glebie, wodzie itp.). Dane wielo-, super- i hyperspektralne wykorzystywane bywają m.in. do oceny zawartości metali ciężkich w glebie (Zawadzka, 2005) oraz do określenia parametrów fizykochemicznych opisujących jakość wody (Flink i in., 2001; Thiemann, Kaufmann, 2002; Osińska-Skotak i in., 2007).

W przypadku danych super- czy hyperspektralnych korekcja atmosferyczna jest jednym z etapów wstępnego przetwarzania. Poszukując zależności między odbiciem spektralnym a wartościami określonych parametrów najczęściej wykorzystywane są dwa podejścia. W pierwszym prowadzi się analizę charakterystyk spektralnych odbicia promieniowania np. dla różnych składników wody czy gleby, minerałów czy związków chemicznych zawartych w wodzie lub glebie i wskazuje najbardziej właściwe zakresy fal do oszacowania ich zawartości. Wykorzystując te zakresy spektralne budowane są modele do oszacowania wielkości danego parametru. Drugie podejście natomiast stosuje metody statystyczne o różnym stopniu zaawansowania, które pomagają znaleźć zakresy fal najlepsze do obliczania danego parametru fizykochemicznego oraz wskazują formułę empiryczną, która najlepiej opisze poszukiwaną zależność. Są to zarówno proste analizy korelacji, jak również analizy regresji i analizy wielokrotne. Można stwierdzić, że samo znalezienie zależności między danymi naziemnymi i satelitarnymi dla pojedynczego terminu jest dość proste. Problemem jest określenie takiego modelu obliczeniowego, który pozwoli na swego rodzaju unifikację, czyli określanie rozkładu przestrzennego konkretnego parametru fizyko-chemicznego tylko i wyłącznie na podstawie danych satelitarnych lub mocno ograniczy konieczność prowadzenia równoległych pomiarów naziemnych. W przypadku badań mórz i oceanów, w wyniku wieloletnich badań uzyskano uniwersalne dla danego sensora satelitarnego metody obliczania m.in. barwy oceanów, zawartości chlorofilu. W przypadku badań wód lądowych zbyt wiele czynników powoduje, że w obecnej chwili unifikacja formuł obliczeniowych dla konkretnych danych wydaje się wręcz niemożliwa. W moim przekonaniu jednym z takich czynników jest także brak wykonywania kompleksowej, uwzględniającej wszystkie możliwe czynniki, korekcji radiometrycznej danych satelitarnych, co utrudnia analizy wieloczasowe z wykorzystaniem danych rejestrowanych przez różne systemy satelitarne.

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione powyżej przykłady świadczą o wpływie korekcji radiometrycznej na kolejne etapy przetwarzania satelitarnych danych wielospektralnych. Wykonywanie korekcji radiometrycznej w pełnym jej zakresie nie zawsze jest bezwzględnie wymagane, ale zawsze należy mieć świadomość jakie może to mieć znaczenie w dalszych etapach przetwarzania danych satelitarnych.

Różne aspekty przedstawionej problematyki były przedmiotem badań kilku projektów badawczych finansowanych przez Politechnikę Warszawską w ramach tzw. grantów dziekańskich oraz finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego: 5 T12E 006 24, N520 007 31/1412, 4 T12E 025 28.

5. LITERATURA

- Cracknell A.P., Hayes L.W.B., 1991. Introduction to Remote Sensing. Taylor&Francise.
- Flink P., Lindell T., Ostlund C., 2001. Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes. The Science of the Total Environment, vol. 268, 155-169.
- Garcia J.C., Moreno J., 2004, Removal of noises in CHRIS/ PROBA images: application to the SPARC Campaign data. Proc. Of 2nd CHRIS/Proba Workshop, ESA/ESRIN, Frascati, Italy, 28-30 April. ESA SP-578, July 2004.
- Jakomulska A., Sobczak M., 2001. Korekcja radiometryczna obrazów satelitarnych – metodyka i przykłady. Teledetekcja Środowiska, vol. 32, 152-171.
- Jensen J.R., 1996. Introductory Digital Image Processing - A Remote Sensing Perspective. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, second edition.
- Kneizys F.X., Abreu L.W., Anderson G.P., Chetwynd J.H., Shettle E.P., Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.C., Acharya P., Rothman L.S., Selby J.E.A., Gallery W.O., Clough S.A., 1996. The MODTRAN 2/3 Report and LOWTRAN 7 Model. Contract F19628-91-C-0132, prepared by Ontar Corporation for Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, Hanscom AFB, USA.
- Lillesand T. M., Kiefer R.W., 1987. Remote sensing and image interpretation. Second edition. John Wiley & Sons.
- McDonald A.J., Gemmel F.M., Lewis P.E., 1998. Investigation of the utility of spectral vegetation indices for determining information on coniferous forests. Remote Sensing of Environment, no. 66, 250-272.
- Osińska-Skotak K., 2001. Analiza wybranych metod przetwarzania satelitarnych zdjęć termalnych LANDSAT TM. Rozprawa doktorska, Wydział Geodezji i Kartografii PW.
- Osińska-Skotak K., 2005. Wpływ korekcji atmosferycznej zdjęć satelitarnych na wyniki cyfrowej klasyfikacji wielospektralnej. Acta Scientiarum Polonorum Geodesia et Descriptio Terrarum, zeszyt 4 (1), Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, 41-53.
- Osińska-Skotak K., 2007. Korekcja atmosferyczna i jej wpływ na jakość interpretacyjną obrazów. Rozdział w monografii pt. „Wykorzystanie wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych w systemie informacji przestrzennej” pod red. Ireneusza Wyczałka, Wydawnictwa Politechniki Poznańskiej, Poznań, 102-109.
- Osińska-Skotak K., Kruk M., Mróz M., 2007, “*The spatial diversification of lake water quality parameters in Mazurian lakes in summertime*”, w monografii pt. “New Developments and Challenges in Remote Sensing”, MILLPRESS, Rotterdam Netherlands, 2007, 591-602.
- Parlow E., 1996. Correction of Terrain Controlled Illumination Effects in Satellite Data. Proceedings of the 15th EARSeL Symposium, Basel, Switzerland, 4-6.08.1995. „Progress in Environmental Remote Sensing Research and Applications” ed. by E.Parlow, A.A. Balkema, Rotterdam-Brookfield, 1996, 139-145.
- Richards J.A., 1993. Remote Sensing Digital Image Analysis an Introduction. Berlin – Heidelberg.
- Richter R., 1998a. Atmospheric Correction Algorithm for Flat Terrain: Model ATCOR2 (User Manual) ver. 3.0. October 1998, DLR-IB 552-04/98, DLR Institute for Optoelectronics, Germany.
- Richter R., 1998b. Atmospheric and Topographic Correction: Model ATCOR2/3 User Manual ver. 6.2. January 2006, DLR-IB 565-01/06, DLR Institute for Optoelectronics, Germany.

- Richter R., 2006. Atmospheric/Topographic Correction: Model ATCOR3 (User Manual) ver. 3.0. October 1998, DLR-IB 552-05/98, DLR Institute for Optoelectronics, Germany.
- The T. H., 2004. Handleiding WATCOR versie 2. (Metropolis Software, Technical Consultancy. Report for VITO) 31p.
- Thiemann S., Kaufmann H., 2002. Lake water quality monitoring using hyperspectral airborne data - a semiempirical multisensor and multitemporal approach for the Mecklenburg Lake District, Germany. *Remote Sensing of Environment*, vol. 81, 228-237.
- Vermote E.F., Tanre D., Deize J.L., Herman M., Morcrette J.J., 1997. Second Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, 675-686.

THE IMPORTANCE OF RADIOMETRIC CORRECTION IN SATELLITE IMAGES PROCESSING

KEYWORDS: radiometric correction, atmospheric correction

SUMMARY: The radiometric correction is an initial stage in satellite data processing, intended to remove radiometric errors and, primarily, to convert the satellite image to a unit of spectral radiance from Earth surface or spectral reflection. However, in practice the radiometric correction of multi-spectral images is unfortunately rarely performed in the full scope. This is due to various reasons of technical and also historical nature, related to the very beginning of the satellite data processing technologies. It is such historical aspects that have caused the complete radiometric correction process to be rarely performed while processing multi-spectral data. Yet, the performance or failure to perform the radiometric correction affects virtually all further processing of satellite data. The present paper gives an overview of the radiometric correction, describes its stages and presents examples of the effects of radiometric correction on the results of various basic, most frequent processing of satellite images.

dr inż. Katarzyna Osińska-Skotak
e-mail: kos@gik.pw.edu.pl
tel: (0-22) 234-76-90
tel/fax: (0-22) 629-91-82