



Przekształcenia zdjęć satelitarnych Meteosat do projekcji modelu COAMPS

MARIUSZ FIGURSKI, KRZYSZTOF KROSCZYŃSKI, PAWEŁ KAMIŃSKI

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z konstrukcją odwzorowań zdjęć satelitarnych MSG (*Meteosat Second Generation*), zgodnych z projekcjami niehydrostatycznych modeli mezoskalowych typu COAMPS™ (*Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System*) i *Weather Research and Forecasting* (WRF). System odbioru zdjęć MSG i model COAMPS™ zostały uruchomione i pracują w trybie operacyjnym w Zakładzie Geomatyki Stosowanej Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej. Celem prowadzonych prac jest umożliwienie automatyzacji analizy danych pochodzących z różnych źródeł w kontekście wpływu zachmurzenia, wilgotności atmosfery na refrakcję i wartość opóźnienia skośnego GPS. Prezentowana praca stanowi część badań związanych z operacyjnym wyznaczaniem opóźnienia skośnego.

Słowa kluczowe: refrakcja troposferyczna, projekcja geostacjonarna, model mezoskalowy

Symbolne UKD: 528.7

1. Wstęp

Prawidłowa analiza sygnałów GPS powinna uwzględniać korekty związane z oddziaływaniem atmosfery. Wpływ ciśnienia, temperatury i wilgotności zmienia kierunek i spowalnia sygnał. Zjawisko to nazywane jest refrakcją atmosferyczną. Ze względu na rozkład przestrzenny pary wodnej, która występuje w troposferze, przedmiotem obecnych badań jest opóźnienie troposferyczne skośne określane dla sygnałów pochodzących z kierunku satelity. Do niedawna w tym celu stosowano tzw. funkcje odwzorowujące, wyznaczone w oparciu o dane klimatyczne lub pomiary parametrów meteorologicznych na poziomie anteny stacji. Opróżnienia skośne otrzymywane na tej drodze obarczone są jednak dużym błędem. Dotyczy to zwłaszcza satelitów o małych

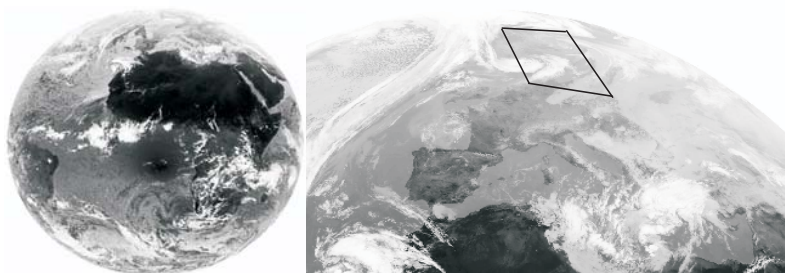
kątach elewacji. Podstawową przyczyną jest tutaj nieuwzględnienie anizotropowego rozkładu wilgotności troposfery na drodze sygnału mikrofalowego. Taki rozkład można wyznaczyć na przykład dysponując danymi dostarczonymi przez modele meteorologiczne. Prekursorem takich badań był A. Niell [1, 2]. Opóźnienia skośne oblicza się zwykle metodą promienia [3]. W prowadzonych w Centrum Geomatyki Stosowanej (CGS) badaniach wykorzystuje się w tym celu niehydrostatyczny, mezoskalowy model COAMPS™ [4], który został uruchomiony na klastrze IA64 Fenix. Planuje się także rozszerzenie prac w oparciu o model WRF [5].

Analiza i prognoza pogody, na którą pozwalają modele mezoskalowe, ma duże znaczenie teoretyczne. Jednakże należy zwrócić uwagę, że w przypadku zastosowań operacyjnych związanych z jednoczesnym prowadzeniem pomiarów i ich obróbką w czasie rzeczywistym, nie zawsze można polegać na danych prognostycznych. Ogólnie wiadomo, że na skuteczność prognoz duży wpływ ma możliwość asymilacji danych dostarczanych przez pracujące w trybie quasi-rzeczywistym systemy satelitarne. W tym celu wykorzystuje się zdjęcia satelitów geostacjonarnych MSG (*Meteosat Second Generation*) [6, 7] i okołobiegunowych, np. NOAA (*The National Oceanic and Atmospheric Administration*). Praca ze zdjęciami z różnych kanałów spektralnych, na przykład analiza kombinacyjna polegająca na łączeniu informacji, umożliwia identyfikację położenia i rodzajów chmur i prowadzi do określenia przestrzennych profili wilgotności atmosfery. Poznanie przebiegów tych profili jest bardzo istotne z punktu widzenia skutecznego modelowania opóźnienia troposferycznego skośnego. Jednym z ważnych etapów asymilacji, pozwalających uwzględnić informacje o aktualnym stanie atmosfery w obliczeniach i ich skorygowanie, jest zapewnienie jedności odwzorowań zdjęć satelitarnych i modelu mezoskalowego. Istniejąca niezgodność projekcji jest powodem utrudnień wzajemnej interpretacji. Rozważane w artykule zdjęcia MSG przedstawiają obraz atmosfery widziany z pokładu satelity. To naturalne odwzorowanie rzutowe (punkt rzutowania znajduje się na zewnątrz elipsoidy) nazywane jest projekcją geostacjonarną [6]. W przypadku modelu COAMPS mamy natomiast do czynienia z możliwością wyboru różnych odwzorowań kartograficznych dodatkowo związanych ze sferą, a nie elipsoidą [4]. Z tego powodu zaistniała potrzeba opracowania algorytmów umożliwiających przedstawianie obrazów satelitarnych w dowolnych projekcjach kartograficznych. Ponieważ w CGS obliczenia modelu wykonywane są rutynowo na siatkach w odwzorowaniu stożkowym, konforemnym Lamberta (*Lambert's Conformal Conic Projection*), w artykule ograniczono się do prezentacji wyników odniesionych do tej projekcji.

2. Obrazy MSG

Widziany z satelity geostacjonarnego MSG obraz dysku ziemskiego jest wynikiem pracy skanera SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*). W tym

celu wykorzystuje się obrót satelity i krokowy ruch płaskiego zwierciadła skanera w kierunku północ–południe. Skaner generuje obrazy atmosfery ziemi w 12 różnych kanałach spektralnych, tzw. podczerwonych (IR 3,9; IR 6,2; IR 7,3; IR 8,7; IR 9,7; IR 10,8; IR 12,0; IR 13,4 μm) i widzialnych: kanał HRV (*High Resolution Visible*), VIS 0,6; VIS 0,8; NIR 1,6 μm . Dla kanału HRV wymiar macierzy obrazu to 11 136 linii i 5568 kolumn. Rozdzielczość liniowa tych zdjęć w punkcie podsatelitarnym to 1 km. Obrazy pozostałych kanałów mają 3712 wierszy i kolumn, z odległością próbkowania odpowiadającą 3 km w punkcie podsatelitarnym.



Rys. 1. Zdjęcia 4. kanału podczerwieni IR 3,9 μm . Obszar ograniczony czarnym konturem odpowiada podobszarowi obliczeniowemu modelu mezoskalowego COAMPS

3. Znormalizowana projekcja geostacjonarna

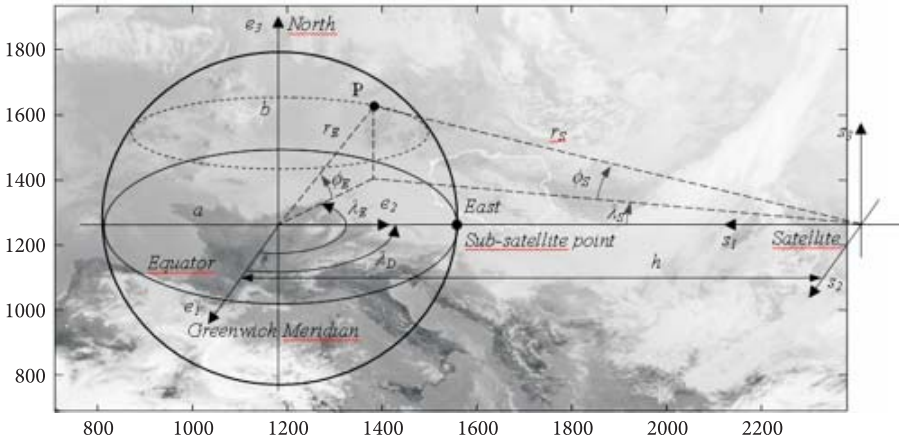
Projekcja ta związana jest z obrazem Ziemi widzianym z satelity geostacjonarnej. Satelita geostacjonarny jest umiejscowiony w płaszczyźnie równika ziemskiego. Odpowiada mu punkt podsatelitarny $\lambda_D = 0^\circ$. Odległość między satelitą i środkiem Ziemi to $h = 42\,164$ km. Modelem powierzchni Ziemi jest elipsoida o promieniu równikowym $a = 6378,1690$ km i biegunowym $b = 6356,5838$ km (*Coordination Group for Meteorological Satellites*. LRPT/AHRPT Global Specification http://www.wmo.ch/pages/prog/sat/documents/CGMS-04-LRPT-HRPT_v1.pdf). Jak można zauważyć, nie jest to elipsoida WGS84.

Projekcja geostacjonarna (rys. 2) może być zdefiniowana przez wprowadzenie dwóch kartezjańskich układów współrzędnych. Układy (e_1, e_2, e_3) i (s_1, s_2, s_3) mają swoje początki w środku Ziemi i w punkcie zawieszenia satelity. Wersory \vec{e}_3, \vec{s}_3 skierowane są na północ, \vec{e}_1 i \vec{s}_2 w kierunku południka Greenwich, \vec{s}_1 wskazuje środek Ziemi. Odniesione do elipsoidy współrzędne geocentryczne (λ_E, ϕ_E) punktu P (rys. 2) można uzyskać, wyznaczając współrzędne kartezjańskie wektora \vec{r}_s wskazującego punkt P w satelitarnym (s_1, s_2, s_3) i elipsoidalnym układzie współrzędnych (e_1, e_2, e_3) :

$$\vec{r}_S = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h - r_E \cos(\phi_E) \cos(\lambda_E - \lambda_D) \\ -r_E \cos(\phi_E) \sin(\lambda_E - \lambda_D) \\ r_E \sin(\phi_E) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\vec{r}_S = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h - r_S \cos(\phi_S) \cos(\lambda_S) \\ r_S \cos(\phi_S) \sin(\lambda_S) \\ r_S \sin(\phi_S) \end{pmatrix},$$

gdzie: (λ, ϕ) , (λ_E, ϕ_E) — geograficzne i geocentryczne współrzędne punktu P .



Rys. 2. Geometria znormalizowanej projekcji geostacjonarnej. Współrzędne elipsoidalne (e_1, e_2, e_3) i satelitarne (s_1, s_2, s_3)

Ponieważ P należy do elipsoidy:

$$\begin{aligned} \frac{e_1^2}{a^2} + \frac{e_2^2}{a^2} + \frac{e_3^2}{b^2} &= \\ &= \frac{(h - r_S \cos(\phi_S) \cos(\lambda_S))^2}{a^2} + \frac{r_S^2 \cos^2(\phi_S) \sin^2(\lambda_S)}{a^2} + \frac{r_S^2 \sin^2(\phi_S)}{b^2} = 1, \end{aligned} \quad (2)$$

to znajomość wartości parametrów (h, ϕ_S, λ_S) pozwala wyznaczyć jego współrzędne (e_1, e_2, e_3) . Zauważmy, że (2) jest równaniem kwadratowym względem r_S , którego rozwiązaniem są określone przecięciem wyznaczonej przez wektor \vec{r}_S prostej z elipsoidą (rys. 2):

$$r_s = h \frac{\cos(\lambda_s) \pm \sqrt{\cos^2(\lambda_s) - (1 + \frac{a^2}{b^2} \operatorname{tg}^2(\phi_s))(1 - \frac{a^2}{h^2})}}{\cos(\phi_s)(1 + \frac{a^2}{b^2} \operatorname{tg}^2(\phi_s))}. \quad (3)$$

Jeśli istnieją pierwiastki rzeczywiste r_s (3), wybierany jest ten o mniejszej wartości (pierwsze widoczne przecięcie). Mając $(r_s, \phi_s, \lambda_s, a, b, h)$, wyznaczamy z (1) współrzędne (e_1, e_2, e_3) , a następnie kąty geocentryczne (λ_E, ϕ_E) i geograficzne (λ, ϕ) :

$$\begin{aligned} \lambda_E &= \arctg(e_2 / e_1) + \lambda_D, \phi_E = \arctg(e_3 / (e_1^2 + e_2^2)) = \\ &= \arctg(b^2 / a^2 \operatorname{tg}(\phi)), \lambda_E = \lambda. \end{aligned} \quad (4)$$

4. Projekcja naturalna

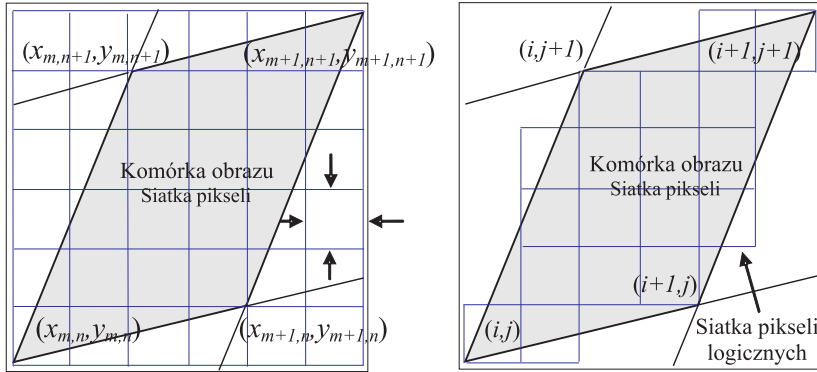
Zależność (4) nie pozwala bezpośrednio zobrazować zdjęcia satelitarnego w wybranym odwzorowaniu kartograficznym. Potrzebne jest w tym przypadku przynajmniej jedno dodatkowe założenie. Dotyczy ono kształtu apertury zwierciadła skanującego. W najprostszym przypadku można założyć, że kształt ten odpowiada kwadratowi, a w bardziej złożonym, że jest on np. sześciokątem. To założenie pozwala skonstruować algorytmy przekształcania zdjęć w oparciu o parametry geometryczne procesu skanowania atmosfery. Podstawowymi są współrzędne położenia osi skanera (ϕ_s, λ_s) i kąt obrotu płaskiego zwierciadła radiometru satelity α . Wartość α można oszacować, znając szerokość kątową γ i liczbę linii (pikseli) N obrazu atmosfery widzianego z satelity (rys. 1). Dla zdjęć MSG kanałów podczerwieni

$$\alpha = \gamma / N \approx 0,0048^\circ \approx 8,38 \cdot 10^{-5} \text{ rad}. \quad (5)$$

Wobec stałości kąta α i założenia wybranego kształtu zwierciadła, można określić współrzędne geograficzne (λ, ϕ) wierzchołków obszarów, z których zbierana jest energia promieniowania atmosfery podczas jej skanowania. Na powierzchni elipsoidy obszary te są na przykład krzywoliniowymi czworokątami, natomiast ich rzuty na zdjęciu satelitarnym są (prostokątnymi) pikselami. Współrzędne (λ, ϕ) wierzchołków rozważanych obszarów tworzą siatkę węzłów $(\lambda_{m,n}, \phi_{m,n})$ związanych z punktami przecięcia elipsoidy i prostej (osi skanera) obracanej o kąt $(n\alpha, m\alpha)$ — n, m liczby naturalne. W ten sposób skonstruowana siatka $(\lambda_{m,n}, \phi_{m,n})$, odtwarzająca w sposób naturalny rzeczywisty proces skanowania, umożliwia zobrazowanie zdjęć satelity geostacjonarnej MSG w dowolnej projekcji kartograficznej. Wykorzystując zależności między współrzędnymi geograficznymi elipsoidy $(\lambda_{m,n}, \phi_{m,n})$ i współrzędnymi $(x_{n,m}, y_{n,m})$ wybranego odwzorowania kartograficznego f , mamy:

$$(x_{n,m}, y_{n,m}) = f(\lambda_{n,m} = n\alpha, \varphi_{n,m} = m\alpha), \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (6)$$

gdzie: $(x_{n,m}, y_{n,m})$ — współrzędne węzłów siatki obrazu satelitarnego w projekcji kartograficznej f modelu mezoskalowego (rys. 3);
 $N \times M$ — wymiar macierzy siatki obrazu satelitarnego.



Rys. 3. Komórki siatki projekcji kartograficznej przekształconego zdjęcia satelitarnego

Ze względu na projekcję modelu COAMPS zdjęcia satelitarne wykorzystywane w badaniach pól zachmurzenia przedstawiane są w konforemnym, stożkowym odwzorowaniu Lamberta. Jest ono zdefiniowane przez następujące wartości parametrów:

$$\lambda_0 = 20,0^0, \varphi_0 = 50,0^0, \varphi_{60} = 60,0^0, \varphi_{20} = 20,0^0,$$

gdzie: λ_0, φ_0 — długość i szerokość geograficzna początku układu współrzędnych obszaru modelu mezoskalowego COAMPS;
 $\varphi_{60}, \varphi_{20}$ — szerokości geograficzne równoleżników, tj. śladów cięć sfery przez stożek dla odwzorowania konforemnego Lamberta.

Ponieważ współrzędne wierzchołków komórek siatki obrazu są liczbami rzeczywistymi (rys. 3), w celu zobrazowania ich na ekranie monitora przekształca się je na liczby całkowite. Związek między współrzędnymi całkowitymi (i, j) i geograficznymi $(x_{n,m}, y_{n,m})$ określony jest przez funkcje:

$$\begin{aligned} g(x_{n,m}, y_{n,m}) &= (\text{int}(x_{n,m} \cdot c) + k, \text{int}(y_{n,m} \cdot q) + l) = \\ &= (i, j), \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad m = 1, 2, \dots, M, \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: c, q — współczynniki skalowe i przesunięcia k, l ;
 int — operator zaokrąglania.

Ze względu na fakt, że pikselowi punktu podsatelitarnego oryginalnego zdjęcia odpowiada rozmiar liniowy 3 km, to przy stałości kąta skanowania α rozmiary linowe komórek wyższych szerokości geograficznych są większe. Przykładowo dla obszaru Polski charakterystycznemu rozmiarowi odpowiada ~ 8 km. Ze względu na zależność (7) dodatkowo należy uwzględnić wartości współczynników skalujących c i q . Jeśli są one większe od jedności, obszar komórki ulega dodatkowemu powiększeniu.

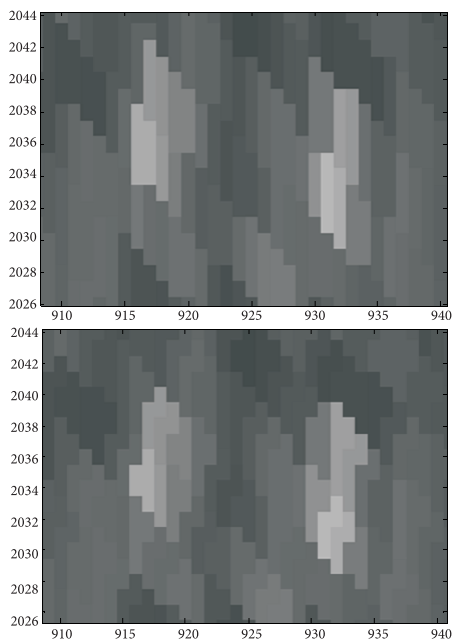
5. Algorytmy zobrazowania

Ponieważ komórki siatki przekształconego zdjęcia satelitarnego nie są prostokątne (rys. 3), ich zobrazowanie wymaga wprowadzenia prostokątnej siatki pomocniczej. To komórki tej siatki (tzw. piksele logiczne) są ostatecznie związane z fizycznymi pikselami tworzonego obrazu.

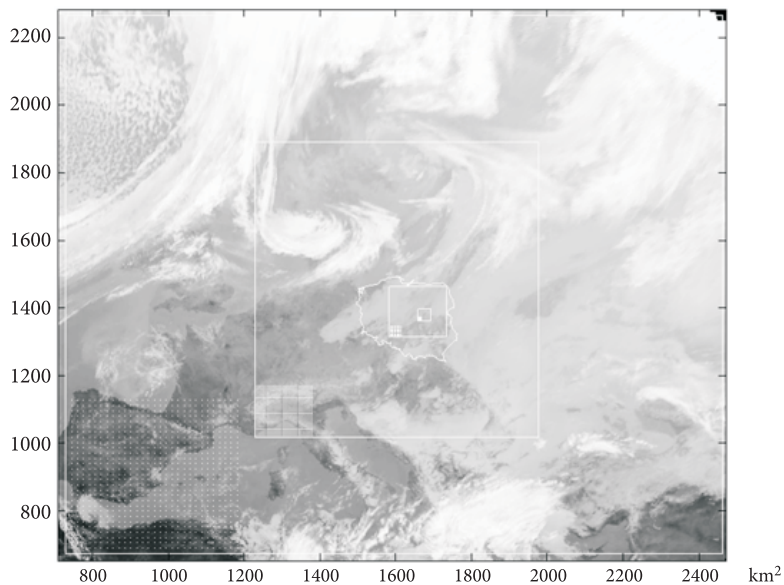
Z rysunku 3 wynika, że dokładność aproksymacji kształtu komórek obrazu zależy przede wszystkim od rozmiarów pikseli logicznych. Zmniejszanie rozmiarów tych pikseli prowadzi do dokładniejszych zobrazowań, ale wzrasta wówczas rozmiar tworzonego obrazu. Dlatego wzięto pod uwagę różne możliwości aproksymacji. W najprostszym przypadku komórka obrazu zamieniana jest prostokątem (rys. 3) wyznaczonym warunkiem minimalnych i maksymalnych wartości współrzędnych (i, j) . Bardziej złożonym, jest algorytm wybierający tylko te piksele logiczne, których środki należą do komórki obrazu. Efekt działania tych algorytmów przedstawiono na rysunku 4. Można zauważyć, że drugi z nich jest bardziej wrażliwy na niejednorodności przestrzenne pola zachmurzenia.

Ostatnim etapem zobrazowania jest nadanie wybranym dla danej komórki pikselom logicznym koloru odpowiadającego kolorowi piksela oryginalnego zdjęcia satelitarnego. Na przykład, gdy środek piksela logicznego należy do rozpatrywanej komórki, wówczas dziedziczy on jej kolor, gdy nie należy, przyjmuje on kolor komórki bezpośrednio z nią sąsiadującej. Zastosowanie algorytmów złożonych ma szczególne uzasadnienie w przypadku pracy z małymi obszarami lub dużymi powiększeniami transformowanych zdjęć, tj. dla dużych wartości parametrów skalowania c , q (7). Z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku analizy pól zachmurzenia obszaru Polski. Rozmiary liniowe komórek przekształconego obrazu są wówczas $\sim 2,7$ -krotnie większe (już dla $c = 1$, $q = 1$) od rozmiarów komórki w punkcie podsatelitarnym.

Możliwość odpowiedniej aproksymacji kształtu komórki obrazu jest istotna w procesie asymilacji danych modeli mezoskalowych. Zwłaszcza że krok przestrzenny teleskopizowanych siatek obliczeniowych tych modeli jest rzędu 1 km. Pracujący w CGS niehydrostatyczny mezoskalowy model COAMPS wykorzystuje siatki o kroku 39, 13, 4,3 i 1,4 km (rys. 5).



Rys. 4. Aproksymacja kształtu komórek przekształconego zdjęcia satelitarne



Rys. 5. Obraz satelitarne (patrz rys. 1) w projekcji konforemnej, stożkowej Lamberta. Wyróżniono używane w CGS podobszary obliczeniowe modelu mezoskalowego COAMPS oraz związane z nimi fragmenty siatek o kroku przestrzennym 39, 13, 4,3 i 1,4 km

6. Podsumowanie

Skonstruowane algorytmy przekształcania zdjęć satelitarnych pozwalają na odpowiednie dowiązanie geograficzne informacji zawartej na zdjęciach do siatek obliczeniowych modeli mezoskalowych. Umożliwia ono pracę ze zdjęciami z różnych kanałów spektralnych (analiza kombinacyjna), pozwalając na dokładniejszą przestrzenną identyfikację położenia i rodzajów chmur, profili prędkości wiatru, wilgotności atmosfery lub temperatur wierzchołków chmur. Poznanie tych pól jest istotne dla procesu asymilacji danych umożliwiające uwzględnienie informacji o stanie atmosfery w obliczeniach modeli i dokonanie odpowiedniej korekcji pól prognostycznych. Odpowiednio dowiązane zdjęcia pozwalają również na precyzyjniejszą lokalizację niebezpiecznych zjawisk pogody.

Praca sponsorowana przez Ministerstwo Edukacji Narodowej, Grant No N N526 2307 33.

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

LITERATURA

- [1] A. E. NIELL, *Preliminary evaluation of atmospheric mapping functions based on numerical weather models*, Physics and Chemistry of the Earth, A(26), 2001, 475-480.
- [2] J. BOEHM, A. E. NIELL, P. TREGONING, H. SCHUH, *Global Mapping Functions (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data*, Geophys. Res. Letters, 33, 2006.
- [3] REIMA ERESMAA, HEIKKI JARVIVEN, *An observation operator for Ground-based GPS slant delays*, Tellus, 58A, 2006, 131-140.
- [4] R. M. HODUR, *The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS)*, Mon. Wea. Rev., 135, 1997, 1414-1430.
- [5] *Weather Research and Forecasting Model*, <http://www.wrf-model.org/index.php>
- [6] *Coordination Group for Meteorological Satellites, LRPT/AHRPT Global Specification*, http://www.wmo.ch/pages/prog/sat/documents/CGMS-04-LRPT-HRPT_v1.pdf
- [7] EUMETSAT, *MSG Level 1.5 Image Data Format Description*, http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/Meteosat_Image_Services

M. FIGURSKI, K. KROSZCZYŃSKI, P. KAMIŃSKI

Transformation of Meteosat satellite images to COAMPS model projection

Abstract. The paper presents the results of research concerning constructing projections of MSG (*Meteosat Second Generation*) satellite images compatible with projections of non-hydrostatic mesoscale models: COAMPS™ (*Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System*) of the Naval Research Laboratory (NRL), and the WRF (*Weather Research and Forecasting*). The MSG imagery acquisition system and COAMPS™ model run in the operational mode in the Applied Geomatics Section of the Faculty of Civil Engineering and Geodesy, Military University of Technology. The research aim is to

develop automated analysis of data originating from various sources for assessment of the impact of cloudiness (humidity) in the atmosphere on refraction and GPS slant delay. This work is a phase of research concerning operational methods of GPS slant delay determination.

Keywords: tropospheric refraction, geostationary projection, mesoscale model

Universal Decimal Classification: 528.7