



Geometryczne aspekty przekształceń zdjęć satelitarnych

JANUSZ JASIŃSKI¹, KRZYSZTOF KROSCZYŃSKI, PAWEŁ KAMIŃSKI,
SŁAWOMIR PIETREK¹, IRENEUSZ WINNICKI¹

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii i Geodezji,
Zakład Geomatyki Stosowanej, ¹Zakład Systemów Informacji Geograficznej,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono analizę dokładności przekształceń zdjęć satelitarnych MSG2 — Meteosat Second Generation, dostarczanych przez Europejską Agencję Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych — EUMETSAT. Do zobrazowania zdjęć w różnych projekcjach kartograficznych użyto programów skonstruowanych w języku MATLAB. Celem pracy jest ocena wpływu zmian parametrów algorytmu zobrazującego na dokładność przekształcanych zdjęć satelitarnych w projekcjach kartograficznych.

Słowa kluczowe: projekcja geostacjonarna, obraz satelitarny, algorytm zobrazowania

Symbole UKD: 528.7

1. Wstęp

Dane satelitarne dostarczane przez EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*) wspierają zarówno operacyjne prognozowanie pogody, jak i śledzenie zmian zachodzących w środowisku naturalnym. EUMETSAT poprzez satelity geostacjonarne Meteosat-9,7¹ umieszczone w płaszczyźnie południka Greenwich (0°) i południka 57° E oraz satelitę orbitującego MetOp (*European Polar — Orbiting Meteorological Satellite System*) przekazuje zawarte w obrazach satelitarnych informacje praktycznie w czasie rzeczywistym. Dotyczą one pomiarów temperatury i wilgotności atmosfery dla dowolnych warunków atmosferycznych, przedstawiają

¹ Meteosat — system satelitów geostacjonarnych organizacji EUMETSAT do obserwacji pogody i badań meteorologicznych.

globalne obrazy chmur, oceanów i lądów w zakresie widzialnym i podczerwieni. Dane te pozwalają na szczegółową analizę aktualnego stanu atmosfery. Ich asymilacja do modeli mezoskalowych przekłada się w konsekwencji na odpowiednią poprawę prognozy pogody. Podstawowym celem EUMETSAT-u jest również dostarczanie danych klimatycznych związanych z profilami temperatury, wilgotności, ozonu, gazów cieplarnianych atmosfery czy pokrywy lodu morskiego.

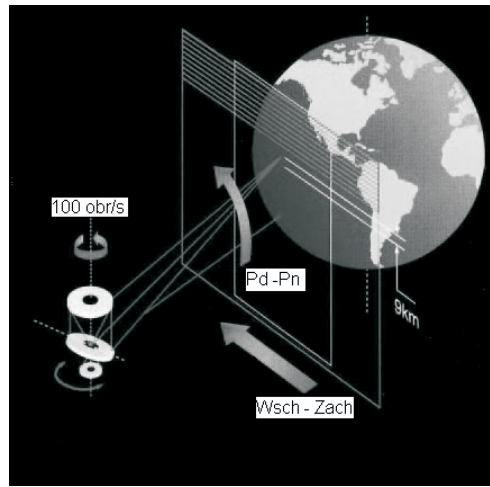
Z punktu widzenia różnych zastosowań celowe wydaje się opracowanie uniwersalnego algorytmu pozwalającego przedstawiać dane satelitarne w dowolnych projekcjach kartograficznych, na przykład takich, które pozwalają na odpowiednie dowiązanie zdjęć do siatek obliczeniowych modelu mezoskalowego. Rozważane w pracy zdjęcia MSG przedstawiają obrazy atmosfery widziane z pokładu satelity. Przy założeniu, że stanowi ona cienką warstwę elipsoidalną, jej zobrazowanie w postaci zdjęcia jest odniesione do zewnętrznego odwzorowania rzutowego z punktem rzutowania znajdującym się na zewnątrz elipsoidy, nazywanego także projekcją geostacjonarną². Ponieważ wiele istotnych aplikacji lub odwzorowań (np. realizacja układu współrzędnych 2000, 1992) związanych jest z elipsoidą WGS84, dane satelitarne powinny być również z nią funkcjonalnie związane. W tym przypadku, ze względu na narzuconą przez EUMETSAT elipsoidę, należałoby wyznaczyć parametry transformacji Helmerta umożliwiające przejście z niej na elipsoidę WGS84. Z inną sytuacją mamy do czynienia, gdy rozważamy prostokątne siatki obliczeniowe mezoskalowych modeli pogody takich jak *Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System* — COAMPS [3]. Siatki te związane są z różnymi odwzorowaniami kartograficznymi, jednakże odniesionymi zwykle do sfery, a nie elipsoidy. Z tego powodu uzasadnione jest pytanie, w jakim stopniu obraz satelitarny zostaje zniekształcony w przypadku wykorzystywania elipsoid innych niż stosowana przez EUMETSAT. W pracy rozważa się także inne geometryczne parametry mające istotny wpływ na przekształcenia zdjęć satelitarnych. Są to ważne z punktu widzenia stosowanego algorytmu: kąt obrotu radiometru skanującego oraz współrzędne określające położenie osi kartezyjskiego układu odniesienia zapewniające zgranie zdjęcia z siatką geograficzną reprezentowanego przez nie obszaru.

2. Zdjęcia satelitarne MSG

Obrazy z satelity geostacjonarnego MSG są wynikiem obróbki danych pomiarowych (tzw. poziomu 1.0) skanera SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared*

² Coordination Group for Meteorological Satellites. LRPT/AHRPT Global Specification: http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEUMETSAT/InternationalRelations/CGMS/groups/cps/documents/document/pdf_cgms_03.pdf, http://www.wmo.ch/pages/prog/sat/documents/CGMS-04-LRPT-HRPT_v1.pdf.

Imager) wykorzystującego ruch obrotowy satelity (100 obr/min) i ruch krokowy (125,8 μ rad) w kierunku południe–północ (rys. 1). Dane te są transmitowane do stacji naziemnej, gdzie po przetworzeniu (tzw. poziom 1.5 — korekcja radiometryczna i geometryczna, standardowe dowiązanie geograficzne) są dostarczane użytkownikom. Skaner generuje obrazy atmosfery Ziemi w 12 różnych kanałach spektralnych³, podczerwonych (IR3.9, IR6.2, IR7.3, IR8.7, IR9.7, IR10.8, IR12.0, IR13.4 μ m) i widzialnych: kanał HRV (High Resolution Visible), VIS0.6, VIS0.8, NIR1.6 μ m (tab. 1).



Rys. 1. Proces skanowania atmosfery

TABELA 1

Kanały spektralne SEVIRI

Kanał		Pasma (μ m)	
1	VIS 0.6	VIS	0,56-0,71
2	VIS 0.8	VIS	0,74-0,88
4	IR 1.6	NIR	1,50-1,78
5	IR 3.9	IR	3,48-4,36
6	IR 8.7	IR	8,30-9,10
7	IR 10.8	IR	9,80-11,80
8	IR 12.0	IR	11,00-13,00
9	IR 6.2	H2O	5,35-7,15
10	IR 7.3	H2O	6,85-7,85

³ http://www.eumetsat.int/Home/Main/Access_to_Data/index.htm

cd. tabeli 1

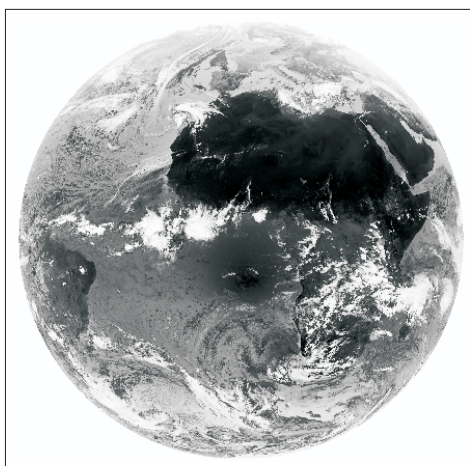
11	IR 9.7	O3	9,38-9,94
12	IR 13.4	C02	12,40-14,40
	HRV	VIS	0,6-0,9

Dla kanału HRV wymiarowi macierzy obrazu odpowiada 11 136 linii i 5568 kolumn. Rozdzielczość liniowa tych zdjęć w punkcie podsatelitarnym to 1 km. Obrazy pozostałych kanałów mają 3712 wierszy i 3712 kolumn, a odpowiadająca im rozdzielczość to 3 km w punkcie podsatelitarnym — przecięcie równika i południka Greenwich (Zatoka Gwinejska).

Informacje o stanie atmosfery przekazywane przez radiometr SEVIRI numerycznym modelom pogody przyczyniają się do poprawy jakości asymilacji danych, tj. wypracowania warunków początkowych prognozy. Osiem kanałów podczerwieni dostarcza między innymi dane o temperaturze chmur, powierzchni lądów i oceanów. Kanały ozonu, pary wodnej i dwutlenku węgla pozwalają także analizować charakterystyki masowe atmosfery, umożliwiając rekonstrukcję jej trójwymiarowej struktury.

3. Odwzorowanie geostacjonarne

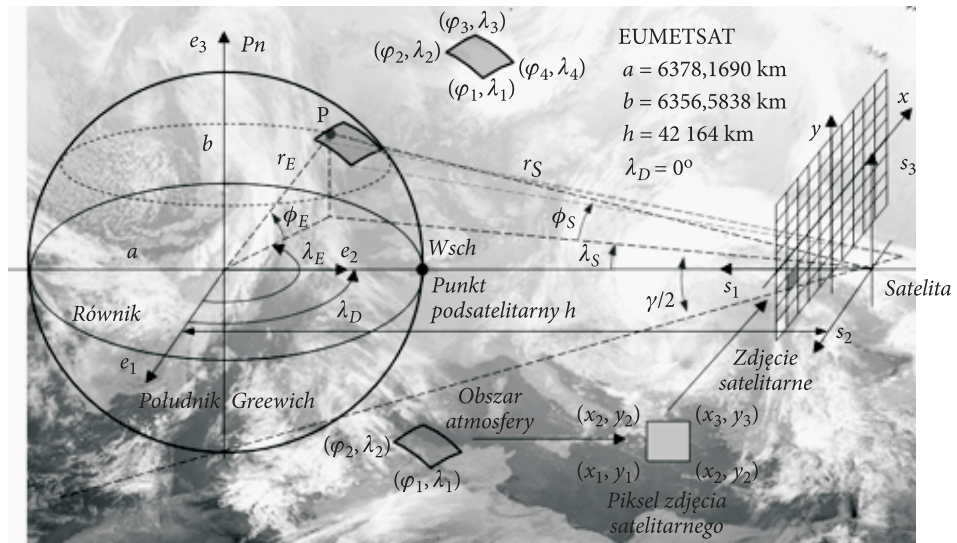
Dostarczane przez EUMESAT zdjęcia satelitarne są przedstawione w odwzorowaniu geostacjonarnym (rys. 2). Są one wynikiem przekształcenia danych pierwotnych radiometru SEVIRI. Tak jak dane pierwotne, algorytmy tych przekształceń nie są ogólnie dostępne. Nie jest dostarczana również (np. zdjęcia z archiwum



Rys. 2. Obraz atmosfery w projekcji geostacjonarnej

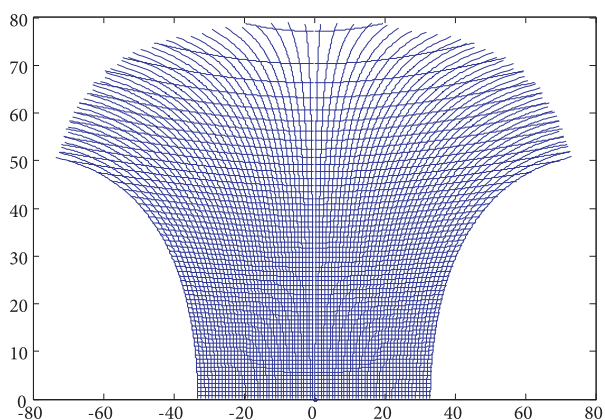
Dundee) informacja o współrzędnych pikseli zdjęć w odniesieniu do elipsoidy. Z tego powodu trudno jest przedstawić obrazy satelitarne w innych projekcjach kartograficznych.

Wyjściem z tej sytuacji może być proponowany w [1] algorytm skanowania atmosfery (rys. 3) umożliwiający przyporządkowanie pikselom zdjęcia satelitarnego „wykonywanego z pokładu satelity” obszarów atmosfery położonych na elipsoidzie EUMETSAT.



Rys. 3. Ilustracja procesu skanowania atmosfery. Geometria projekcji geostacjonarnej — wersory \vec{e}_3 , \vec{s}_3 (oś obrotu satelity) skierowane są na północ, \vec{e}_1 i \vec{s}_2 w kierunku południka Greenwich, natomiast \vec{s}_1 do środka Ziemi

Obszary te mogą być traktowane w przybliżeniu jako płaskie czworokąty o bokach wyznaczonych odcinkami prostych. Wierzchołkom tych czworokątów można przypisać współrzędne geograficzne (φ, λ) , które są wzajemnie jednoznacznie związane ze współrzędnymi prostokątnymi (x, y) każdego pikselu obrazu. Zasadniczym problemem jest tutaj określenie współrzędnych (φ, λ) , które powinny wynikać z procesu skanowania atmosfery przez instrument SEVIRI (rys. 1). Proces ten można w przybliżeniu zrealizować (1), wyznaczając punkty przecięcia elipsoidy i prostych \vec{r}_S wyznaczonych położeniem osi (φ_S, λ_S) skanera i jego kąta obrotu $k\alpha$ ($k \in N$) w kierunku południe — północ. Wartość α wynika z szerokości kątowej γ i liczby linii N obrazu atmosfery widzianego z satelity (rys. 1, 3). Dla zdjęć MSG kanałów podczerwieni $\alpha \approx 8,38 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$. W ten sposób dla $(n\alpha, m\alpha)$, $n, m \in N$ można otrzymać zbiór punktów na elipsoidzie, który można nazwać siatką $(\lambda_{m,n}, \varphi_{m,n})$ odwzorowania geostacjonarnego (rys. 4).



Rys. 4. Siatka odwzorowania geostacjonarnego (jednostki na osiach umowne)

Siatka ta umożliwia zobrazowanie zdjęć MSG w dowolnym odwzorowaniu kartograficznym (rys. 5) poprzez wykorzystanie zależności między współrzędnymi geograficznymi elipsoidy (λ, φ) a współrzędnymi (x, y) wybranego odwzorowania kartograficznego — P :

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

gdzie: $(x_{n,m}, y_{n,m})$ współrzędne pikseli obrazu satelitarnego w wybranej projekcji kartograficznej, $N \times M$ — wymiar macierzy siatki obrazu satelitarnego.



Rys. 5. Zdjęcie satelitarne (16.04.2008) — kanał IR 9 w projekcji konforemnej Lamberta

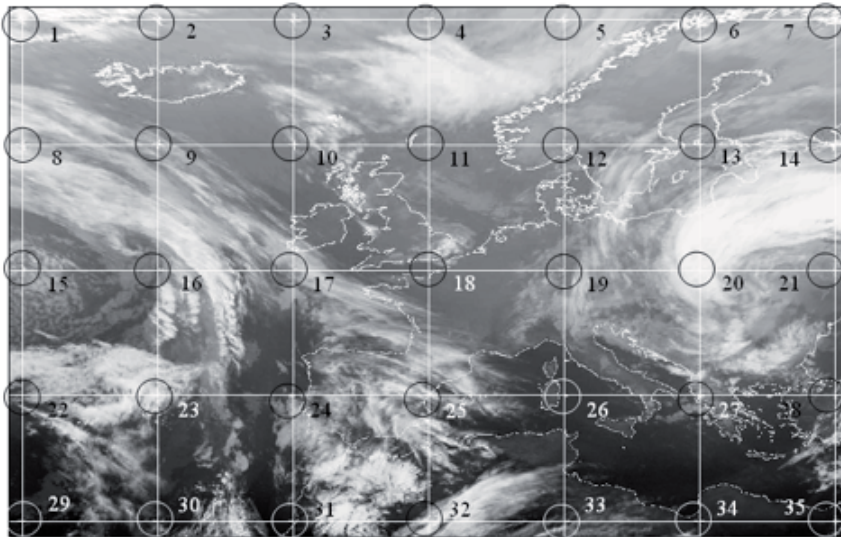
4. Wpływ parametrów algorytmu na dokładność zobrazowań zdjęć satelitarnych

Skonstruowany algorytm przekształceń zdjęć satelitarnych [1] opiera się na związku:

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

gdzie: współrzędne całkowite (i, j) piksela obrazu, współrzędne $(x_{n,m}, y_{n,m})$ węzłów siatki kartograficznej, współczynniki skalowania $c, q \in R$ i przesunięć $k, l \in N$, int — operator zaokrąglania.

Z zależności (2) wynika, że komórki siatki obrazu, które oddalone są od równika (rys. 4), posiadają większe rozmiary liniowe niż leżące w jego pobliżu. Przykładowo, jeśli pikselowi punktu podsatelitarnego zdjęcia (rys. 2) odpowiada rozmiar liniowy oczka siatki 3 km, to pikselowi przyporządkowanemu oczku siatki, które leży na obszarze Polski, odpowiada już ~ 8 km. Jest to proces naturalny, wynikający z geometrii, tj. położenia satelity geostacjonarnego. Między innymi z tego powodu należy rozważyć kwestię dokładności zobrazowania przekształcanych zdjęć satelitarnych. Błędy stosowanych algorytmów powinny uwidocznić się przede wszystkim w obszarach dużych zniekształceń, tj. dla komórek siatek oddalonych od równika. W przypadku zdjęć MSG dostarczanych przez EUMETSAT analizę dokładności ich przekształceń można przeprowadzić w oparciu o naniesione na nie markery⁴ (rys. 6).

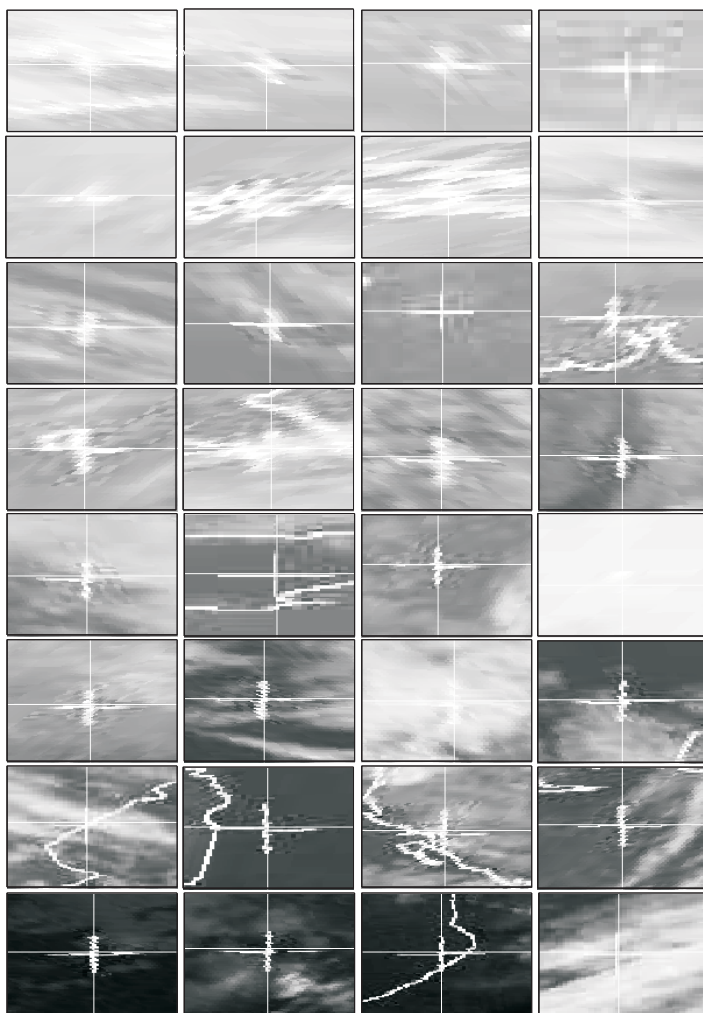


Rys. 6. Zdjęcie satelitarne 2008_4_16_0_MSG2_9_S1_grid, z naniesionymi markerami

⁴ Zdjęcia dostarczane są w wersji bez markerów i z markerami.

4.1. Test algorytmu zobrazowania dla standardowej projekcji geograficznej

Do testu wybrano standardową projekcję geograficzną prostokątną (λ, φ). W tym odwzorowaniu naniesione na zdjęcie testowe równoleżniki i południki są prostymi prostopadłymi. W przypadku idealnego przekształcenia powinny się one przecinać w punktach odpowiadających środkom markerów. Uzyskane wyniki prezentuje (rys. 7). Przedstawiono na nim powiększenia obszarów zawierających



Rys. 7. Test dokładności zobrazowania. Nanoszone przez EUMETSAT na zdjęcia w projekcji geostacjonarnej markery (1-36) zamieszczono w wierszach macierzy obrazów

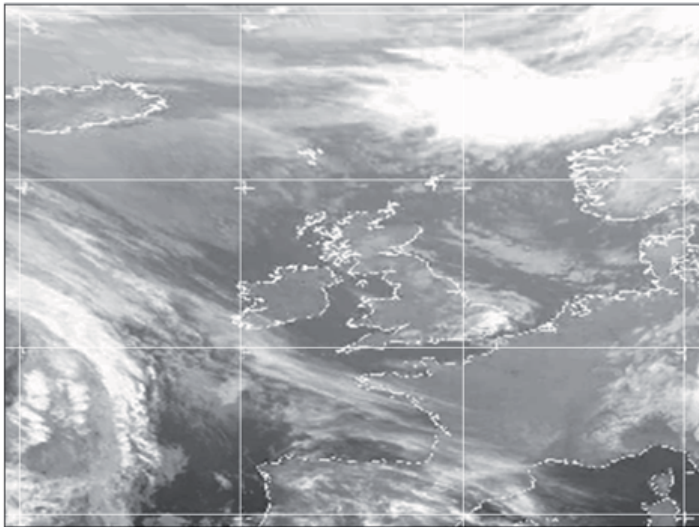
markery otoczone na rysunku 6 okręgami. Można zauważyć, że w wyniku działania skonstruowanego w pracy programu osiągnięto praktycznie dokładność pikselową, nawet w przypadku wysokich szerokości geograficznych. Markery są tutaj zdeformowane, co jest skutkiem procesu rozciągania zdjęcia i stosowania algorytmu (2) opartego na procedurze zaokrąglania.

4.2. Test wpływu rodzaju powierzchni odniesienia

Przeprowadzony test miał na celu zbadanie wpływu przyjęcia za powierzchnię odniesienia sfery o promieniu 6371,2290 km, z którą związane są siatki obliczeniowe uruchomionego w Zakładzie Geomatyki Stosowanej niehydrostatycznego modelu mezoskalowego COAMPS.

Na zdjęciu (rys. 8) można zauważyć, zwłaszcza w wysokich szerokościach geograficznych, kilkupikselowe przemieszczenia markerów. W rzeczywistości odpowiadają one przemieszczeniom kilkudziesięciokilometrowym. Ponieważ rozmiary liniowe oczek siatki wykorzystywanych w pracy operacyjnej modeli mezoskalowych odpowiadają kilkunastu kilometrom (dla modelu COAMPS w ZGS jest to 13 km), to asymilacja danych w oparciu o tak przekształcone zdjęcie zamiast wpłynąć na poprawę prognozy pogody może spowodować skutek przeciwny, tj. jej znaczne pogorszenie.

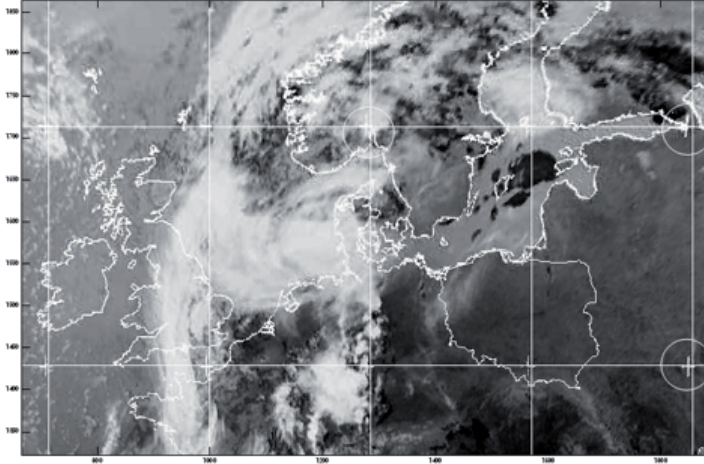
Testy przeprowadzone dla powierzchni odniesienia w postaci elipsoidy WGS84 wykazały, że deformacje obrazu mieszczą się w zakresie ± 1 piksel, tj. w granicach błędu odwzorowania uzyskanego dla powierzchni odniesienia EUMETSAT. Nie są one tak znaczne jak w rozważanym przypadku sfery modelu COAMPS.



Rys. 8. Test dla odwzorowania modelu mezoskalowego COAMPS

4.3. Test wpływu niedopasowania zdjęcia do siatki kartograficznej

Widoczny na (rys. 9) efekt niedopasowania zdjęcia do siatki kartograficznej wynika z niepoprawnego wyboru jego fragmentu (podmacierzy obrazu), który został użyty w przekształcaniu. Markery obrazu przesunięte są w stosunku do naniesionych na nie linii południków i równoleżników.



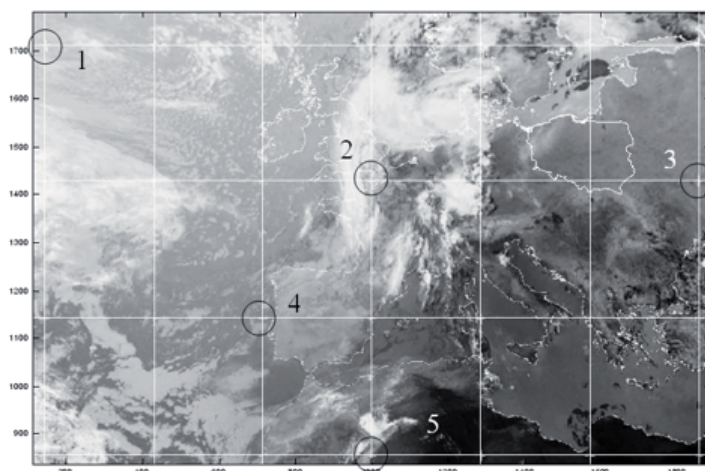
Rys. 9. Efekt niedopasowania zdjęcia do siatki odwzorowania kartograficznego

W skonstruowanym algorytmie osie układu odniesienia związane są z południkiem Greenwich i równikiem i odpowiadają środkowym liniom zdjęć satelitarnych. Fragmenty zdjęć powinny być odpowiednio zorientowane względem tych linii.

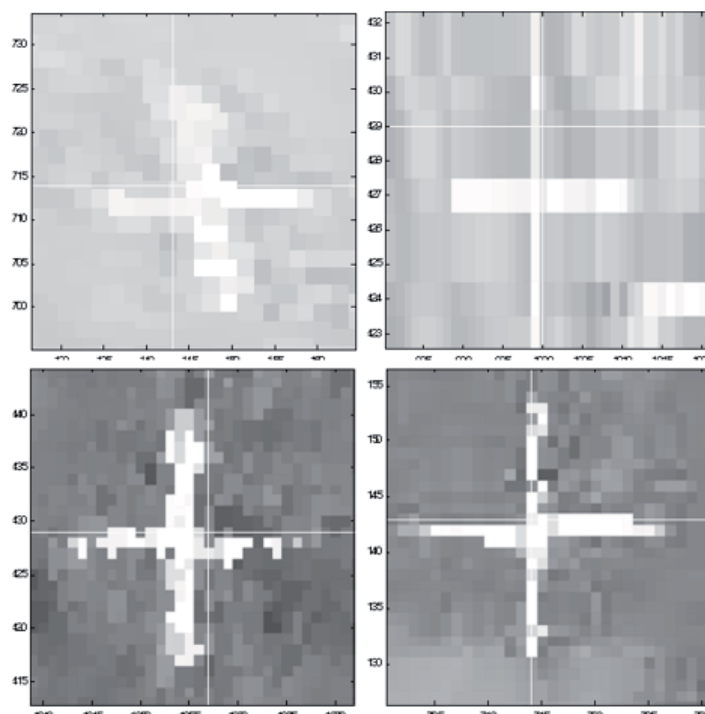
4.4. Test wpływu kąta skanowania α

Z przeprowadzonych badań wynika, że algorytmy konstruowanych zobrazowań są bardzo czułe na zaburzenia parametru kąta skanowania atmosfery α . Rysunki 10 i 11 pokazują sytuację dla przypadku zmiany: $\delta\alpha = 2 \cdot 10^{-8} \text{ rad} \approx 0.004''$.

Podobne deformacje zdjęć związane są ze zmianami odległości satelity od środka Ziemi.



Rys. 10. Efekt zmiany wartości kąta skanowania α



Rys. 11. Przesunięcia markerów (1-4), zdjęcia spowodowane zmianą kąta skanowania α

5. Posumowanie

Rozważane w pracy algorytmy mogą być stosowane zarówno w pracy operacyjnej (możliwość lokalizacji i śledzenia rozwoju niebezpiecznych zjawisk pogody), jak i badawczej. Zapewniając pikselową dokładność przekształcanych zdjęć w odniesieniu do zdjęć testowych EUMETSAT, umożliwiają prowadzenie badań związanych z wrażliwością odwzorowań na zmiany ich parametrów wejściowych. Ze względu na uzyskiwane dokładności zobrazowań mogą być one wykorzystane w procesie asymilacji informacji zawartych w obrazach satelitarnych do siatek modeli mezoskalowych — pracujący w ZGS w trybie operacyjnym model COAMPS wykorzystuje siatki o kroku 39, 13, 43 i 14 km.

Mogą one znaleźć również zastosowanie w przypadku wprowadzenia odpowiedniej parametryzacji modeli mezoskalowych, która związana jest na przykład ze zwiększeniem rozdzielczości przestrzennej stosowanych w nich numerycznych modeli terenu. Zmiana rozdzielczości wymusza między innymi jednoczesną zmianę takich parametrów, jak albedo i szorstkość podłoża, związanych ściśle z rodzajem gleb i stanem roślinności. Dziś dane te mają zwykle charakter klimatyczny i małą rozdzielczość przestrzenną i nie zawsze odzwierciedlają warunki rzeczywiste. Konstruowane algorytmy zobrazowań satelitarnych umożliwiają ich systematyczne pozyskiwanie i odpowiednie dowiązanie geograficzne.

Praca sponsorowana przez Ministerstwo Edukacji Narodowej — Grant Nr N N526 2307 33 oraz projekt badawczy O N306003333.

Artykuł wpłynął do redakcji 1.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano we wrześniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] *Przekształcenia zdjęć satelitarnych Meteosat do projekcji modelu COAMPS*, http://www.geosystems.com.pl/upload/zalaczniki/KNT_2008
- [2] *Coordination Group for Meteorological Satellites*. LRPT/AHRPT Global Specification
- [3] http://www.wmo.ch/pages/prog/sat/documents/CGMS-04-LRPT-HRPT_v1.pdf
- [4] R. M. Hodur, *The Naval Research Laboratory's Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS)*, Mon. Wea. Rev., 135, 1997, 1414-1430.

J. JASIŃSKI, K. KROSZCZYŃSKI, P. KAMIŃSKI, S. PIETREK, I. WINNICKI

Geometric aspects of satellite images transformation

Abstract. The paper presents accuracy analysis of satellite images transformation. The Meteosat Second Generation (MSG2) images are provided by EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites). Software for transforming the satellite images to various

cartographic projections was developed in MATLAB. The purpose of the analysis was to examine the influence of changes of geometrical parameters of the imaging algorithm on the accuracy of the images in the cartographic projections.

Keywords: geostationary projection, satellite image, imaging algorithm

Universal Decimal Classification: 528.7

