

DOKŁADNOŚĆ AUTOMATYCZNEGO GENEROWANIA NMT NA PODSTAWIE DANYCH HRS SPOT 5 ORAZ HRG SPOT 4

Streszczenie. Autorzy niniejszego referatu zostali zaproszeni do udziału w międzynarodowym programie HRS SAP i w ramach projektu badawczego KBN No 4 T12E 011 26 zbadali przydatność panchromatycznych zobrazowań stereoskopowych HRS SPOT 5 do autokorelacyjnego pomiaru Numerycznego Modelu Terenu dla różnych form ukształtowania powierzchni terenu. Sceny stereoskopowe poziom 1A oraz metadane w formacie DIMAP zostały dostarczone przez CNES. Orientację scen wykonano na podstawie 15 do 36 fotopunktów metodą ścisłą Toutina, która zaimplementowana jest w środowisku oprogramowania PCI Geomatica V.9.1. Uzyskano dokładność orientacji na poziomie $m_{x,y} = \pm 2m$ oraz $m_z = \pm 2m$ niezależnie od typu terenu.

NMT wygenerowano automatycznie w programie Ortho Engine PCI Geomatica bez pomiaru linii szkieletowych, filtracji i edycji z siatką 20m x 20m, która następnie była interpolowana do siatki referencyjnego NMT. Stwierdzono, że 60% pomierzonych punktów mieści się w przedziale dokładności od 1m - 5m.

Niezależnie w ramach projektu badawczego KBN No 5 T12E 033 22 opracowano metodykę pozwalającą wygenerować Numeryczny Model Terenu na podstawie panchromatycznych zobrazowań stereoskopowych HRG SPOT 4 z dokładnością $m_z = \pm 4m$ dla terenów górzystych i pagórkowatych oraz z dokładnością $m_z = \pm 2m$ dla terenów falistych i płaskich.

1. Charakterystyka danych testowych HRS SPOT 5

Dane stereoskopowe SPOT 5 są pozyskiwane z jednej orbity nowym sensorem HRS, który posiada zdolność obrazowania przy wychyleniu od nadiru ± 20 stopni w przód oraz wstecz, dając stosunek bazowy bliski 1. Szerokość pasa skanowania sensora HRS wynosi 120 km, zaś maksymalny zasięg obrazowania na kierunku orbitalnym wynosi 600km. Standardowa scena HRS SPOT 5 posiada 12000 linii, zaś w każdej linii 12000 pikseli, obejmując swym zasięgiem obszar 120km x 60km. Rozdzielczość obrazu HRS SPOT 5 wynosi 10m na kierunku poprzecznym do orbity oraz 5m na kierunku orbitalnym.

W Komisji MTFiT w Denver w 2002 roku zatwierdzono High Resolution Stereo Assessment Program (HRS SAP) jako wspólny projekt MTFiT, CNES oraz Spot Image. Projekt dotyczy oceny dokładności generowania NMT metodą automatyczną na podstawie danych stereoskopowych SPOT 5. Autorzy zostali zaproszeni do udziału w tym programie i opracowali jeden z 9 poligonów testowych "Chiemsee" w południowej Bawarii w Niemczech o powierzchni 40 x 50 km² i deniwelacji od 400m do 2000m, dla którego referencyjne NMT pomierzone zostały metodą laserową oraz na podstawie warstwic z mapy topograficznej. W ramach

poligonu testowego „Chiemsee” wybrano 7 obszarów testowych charakteryzujących się różnymi deniwelacjami i różną dokładnością wyznaczenia referencyjnego NMT (tabela 1).

TABELA 1

Charakterystyka referencyjnych NMT dla poszczególnych obszarów testowych poligonu „Chiemsee”

Obszar testowy	Powierzchnia [km ²]	Wielkość oczka siatki NMT [m]	Dokładność punktów siatki NMT[m]
01	25	5	0.5
02	25	5	0.5
03	25	5	0.5
04	25	5	0.5
05-1	80	25	0.5
05-2	20	25	5
06	1500	50	2

W granicach poligonu testowego zaprojektowano i pomierzono 81 fotopunktów naturalnych techniką GPS z dokładnością $m_x = m_y = m_z = 0.1\text{m}$. Lokalizacja tych punktów na obrazach SPOT 5 odbywała się przy udziale interaktywnej mapy topograficznej „Bayern 3D” w skali 1:25 000.

Dostarczone przez CNES cztery sceny SPOT 5 HRS (2 sceny stereoskopowe) zostały zarejestrowane z jednej orbity 1.10.2002 r. Każda scena zapisana została w 8 bitowej skali szarości w formacie TIFF i reprezentowała poziom przetworzenia 1A. Dane orbitalne zapisane zostały w formacie DIMAP. Fragment sceny SPOT 5 przedstawiony jest na rysunku 1.

2. Charakterystyka danych testowych HRG SPOT 4

Panchromatyczna scena stereoskopowa HRG SPOT 4 poziom przetworzenia 1A, zapisana w 8 bitowej skali szarości, charakteryzowała się stosunkiem bazowym 0.85 i pokrywała obszar Gór Świętokrzyskich, położony w południowo-wschodniej części Polski, dla którego deniwelacje terenu nie przekraczały 550m.

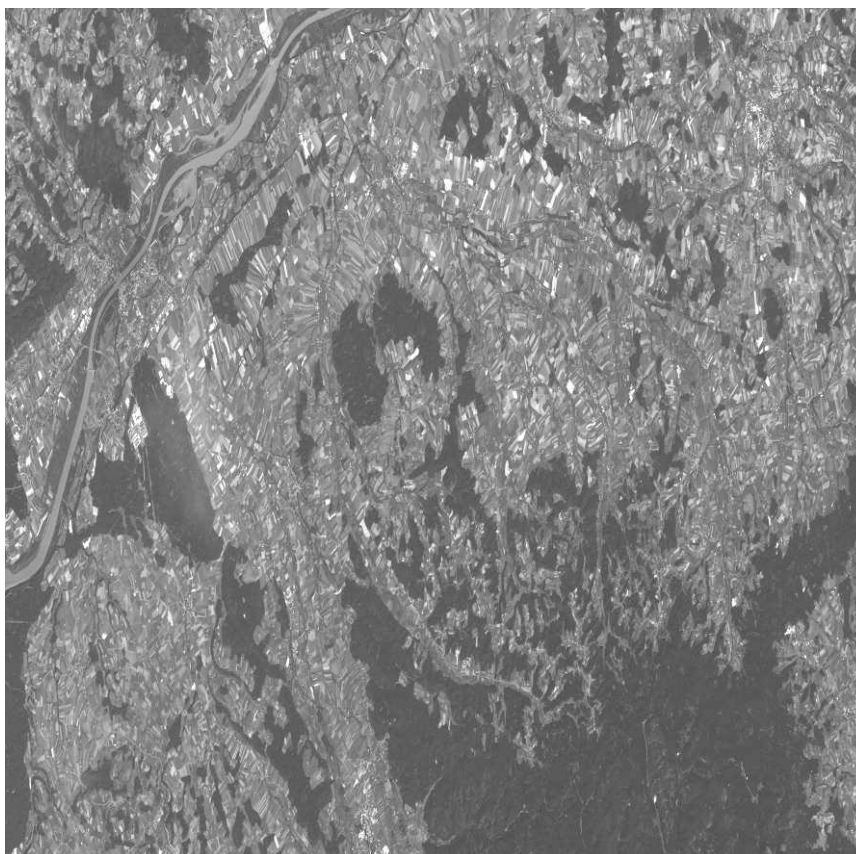
W granicach tego obszaru na mapach topograficznych w skali 1:10 000 zaprojektowano i pomierzono 43 fotopunkty oraz 15 punktów kontrolnych, dla których dokładność pomiaru i identyfikacji wynosiła $m_x = m_y = \pm 3.0\text{m}$ oraz $m_z = \pm 0.1\text{m}$. W pasie pokrycia stereoskopowego scen SPOT 4 wydzielono dodatkowo dwa obszary testowe, przy czym zasięg każdego z nich wyznaczały dwa kolejne modele stereoskopowe zdjęć lotniczych w skali 1:26 000.

Dla obszaru pierwszego reprezentującego teren górzysty i pagórkowaty, techniką GPS, pomierzono osnowę fotogrametryczną, złożoną z 6 fotopunktów, którą

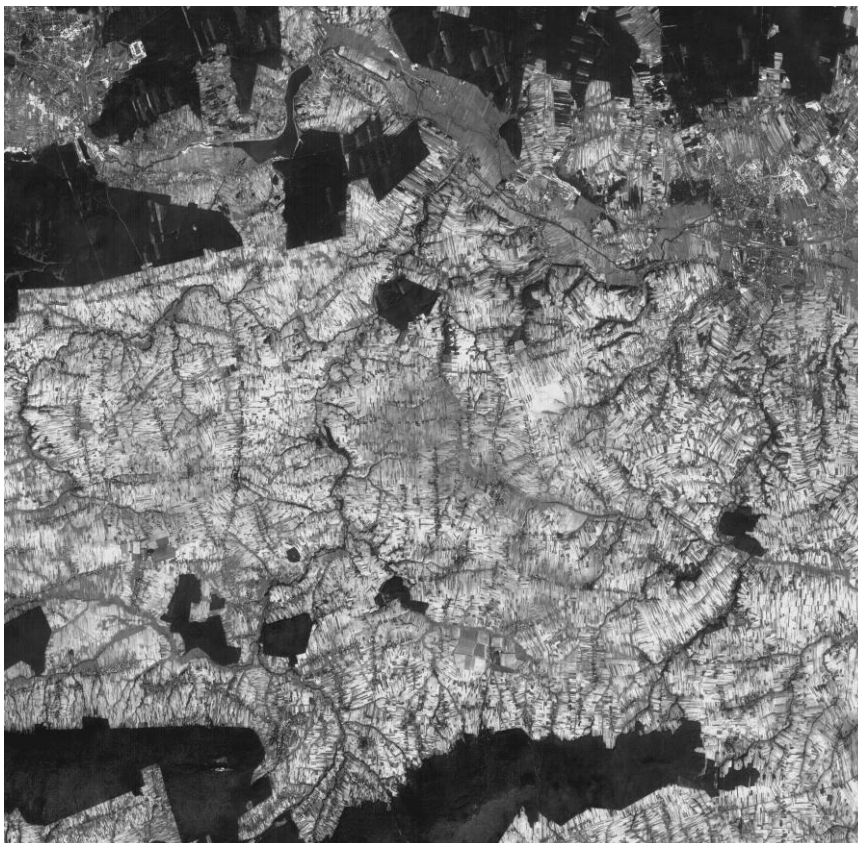
zagęszczono w procesie aerotriangulacji cyfrowej zdjęć lotniczych w skali 1:26 000. W ten sposób wyznaczono współrzędne terenowe 15 punktów wiążących ze statystyczną oceną dokładności $\sigma_x = 0.3\text{m}$, $\sigma_y = 0.3\text{m}$, $\sigma_z = 0.2\text{m}$. Wyznaczone punkty, wraz z punktami GPS stanowiły osnowę fotogrametryczną dla pierwszego obszaru testowego.

Dla obszaru drugiego reprezentującego teren falisty i płaski, techniką GPS, pomierzono osnowę fotogrametryczną, złożoną z 8 fotopunktów, którą zagęszczono analogicznie jak dla pierwszego obszaru testowego. Wyznaczono współrzędne terenowe 21 punktów wiążących z dokładnością statystyczną $\sigma_x = 0.2\text{m}$, $\sigma_y = 0.1\text{m}$, $\sigma_z = 0.2\text{m}$, które wraz z punktami GPS stanowiły osnowę fotogrametryczną dla drugiego obszaru testowego.

Fragment panchromatycznej sceny HRG SPOT 4 z rejonu pola testowego „Góry Świętokrzyskie” przedstawia rysunek 2.



Rys. 1. Fragment sceny panchromatycznej HRS SPOT 5 z rejonu poligonu testowego „Chiemsee” o rozdzielczości GSD = 5m



Rys. 2. Fragment sceny panchromatycznej HRG SPOT 4 z rejonu Gór Świętokrzyskich o rozdzielczości GSD = 10m

3. Dokładność korekcji geometrycznej bloku scen HRS SPOT 5

Orientację przeprowadzono niezależnie dla każdej sceny SPOT 5 wykorzystując model Toutina, będący modulem oprogramowaniu PCI Geomatica wersja 9.1. Dla każdej sceny przygotowano zestaw fotopunktów i punktów kontrolnych, w postaci szczegółów sytuacyjnych, których dokładność pomiaru i identyfikacji oszacowano na poziomie $m_x = m_y = \pm 1.0m$, $m_z = \pm 1.5m$ (Tabela 2).

TABELA 2

Liczba fotopunktów i punktów kontrolnych użyta w procesie orientacji scen HRS SPOT 5

Scena	01 (5 062-252/1 1S)	02 (5 062-252/1 2S)	03 (5 062-253 1S)	04 (5 062-253 2S)
Ground Control Points	15	15	36	36
Check Points	5	5	16	16

Wyniki orientacji dla poszczególnych scen oraz dla bloku złożonego z 4 scen SPOT 5 przedstawia tabela 3.

TABELA 3

Wyniki orientacji dla poszczególnych scen SPOT 5 oraz bloku scen

Scena	Błędy średnie na fotopunktach			Błędy średnie na punktach kontrolnych	
	m_x [m]	m_y [m]	m_z [m]	m_x [m]	m_y [m]
01	± 1.8	± 2.8		± 3.2	± 2.6
02	± 1.9	± 2.5		± 1.1	± 3.2
03	± 1.9	± 2.0		± 1.9	± 1.8
04	± 2.4	± 1.8		± 2.1	± 2.2
Blok scen	± 1.6	± 1.9	± 2.1		

Dokładność orientacji bloku panchromatycznych scen HRS SPOT 5 kształtuje się na poziomie 2m w planimetrii oraz 2m w wysokości, niezależnie od ukształtowania pokrycia terenu.

4. Metodyka korekcji geometrycznej sceny stereoskopowej HRG SPOT 4

Przeprowadzono badania metodyczne mające na celu wskazanie czynników mających bezpośredni wpływ na wynik orientacji sceny stereoskopowej SPOT 4. Uwzględniono takie czynniki jak:

- filtracja oryginalnych obrazów scen w przestrzeni spektralnej oraz częstotliwościowej;
- dokładność pomiaru i identyfikacji punktów osnowy fotogrametrycznej;
- dokładność pomiaru współrzędnych obrazowych;
- dokładność wyznaczenia elementów orbity satelity;
- rozmieszczenie i gęstość punktów osnowy fotogrametrycznej.

Ze względu na specyfikę pomiarów osnowy fotogrametrycznej na zobrazowaniach stereoskopowych SPOT 4 (półautomatyczny pomiar korelacyjny) nie stwierdzono potrzeby szczegółowej analizy wpływu jakości radiometrycznej tych zobrazowań na dokładność orientacji i ograniczono się jedynie do określenia zdolności identyfikacji osnowy fotogrametrycznej na oryginałach i przetworzeniach radiometrycznych.

Dokładność osnowy fotogrametrycznej zależy od dokładności pomiaru oraz dokładności identyfikacji na obrazie. Biorąc pod uwagę wymiar terenowy piksela oraz maksymalny stosunek bazowy dla testowanej sceny stereoskopowej SPOT 4 stwierdzono, że błąd średni identyfikacji osnowy fotogrametrycznej kształtuje się na poziomie $\frac{1}{4}$ piksela, któremu odpowiadają terenowe błędy średnie $m_x = m_y = \pm 2.5m$, $m_z = \pm 3.0m$.

Współrzędne obrazowe fotopunktów, punktów kontrolnych oraz punktów wiążących pomierzono techniką korelacji obrazów cyfrowych z wykorzystaniem

oprogramowania Image Station Digital Meansuration – SPOT firmy ZI Imaging zainstalowanego na stacji roboczej SSK Pro. Analiza wyników wyrównania pokazała, że istnieje zakres szacowanych dokładności pomiaru fotogrametrycznego, dla którego statystyczna ocena wyrównania σ_0 ma tą samą wartość. Przyjęcie dokładności pomiaru spoza tego zakresu osłabia wiarygodność wspomnianej oceny. Dla testowanej sceny stereoskopowej SPOT 4 dokładność pomiaru fotogrametrycznego wyznaczono w przedziale od 4 μ m do 6 μ m.

Zachowując warunek symetrycznego rozmieszczenia osnowy fotogrametrycznej na scenie stereoskopowej, określono ścisły związek pomiędzy liczbą fotopunktów a dokładnością orientacji, wyrażoną za pomocą błędów średnich liczonych z poprawek do współrzędnych fotopunktów i punktów kontrolnych po wyrównaniu. Stwierdzono, że do orientacji sceny stereoskopowej SPOT 4 wystarczy 12 fotopunktów.

Przy założonej konstrukcji wiązań, określającej ilość i rozmieszczenie punktów wiążących, fotopunktów oraz punktów kontrolnych na scenie stereoskopowej SPOT 4, zbadano wpływ dokładności wyznaczenia parametrów sensora satelity na wyniki orientacji stereoskopowej pary scen. Miarą tych dokładności były odchylenia standardowe. Stwierdzono, że wyniki wyrównania będące funkcją wspomnianych odchyleń standardowych nie zmieniają się znacząco, dlatego też, do orientacji sceny stereoskopowej SPOT 4 użyto przybliżonych wartości parametrów sensora.

Na podstawie powyższych analiz otrzymano rezultaty korekcji geometrycznej panchromatycznej sceny stereoskopowej HRG SPOT 4, w odniesieniu do pełnej sceny stereoskopowej oraz wydzielonych jej fragmentów, które zestawiono w tabeli 4.

TABELA 4

Dokładność orientacji sceny stereoskopowej SPOT 4 dla różnych zakresów opracowania

Zakres opracowania sceny	Liczba fotopunktów	Liczba punktów kontrolnych	Błędy średnie na punktach osnowy po wyrównaniu [m]					
			Fotopunkty			Punkty kontrolne		
			m_x	m_y	m_z	m_x	m_y	m_z
Pełna scena	12	15	± 2.2	± 2.3	± 1.1	± 5.0	± 2.9	± 4.7
Obszar I	14	7	± 2.1	± 1.7	± 1.2	± 4.4	± 3.3	± 3.4
Obszar II	16	13	± 1.6	± 1.5	± 0.9	± 3.0	± 3.0	± 3.1

Włączenie do procesu orientacji, poza przybliżonymi parametrami orbity, punktów osnowy fotogrametrycznej pomierzonych na mapie topograficznej w skali 1:10 000 pozwala zorientować panchromatyczną scenę stereoskopową HRG SPOT 4 z dokładnością poniżej 1/2 piksela. Zastosowanie punktów osnowy fotogrametrycznej, pomierzonych w terenie techniką GPS, bądź wyznaczonych na podstawie aerotriangulacji zdjęć lotniczych w skali 1:26 000, pozwala zwiększyć dokładność orientacji do poziomu poniżej 1/3 piksela.

5. Dokładność NMT wygenerowanych na podstawie panchromatycznych zobrażeń HRS SPOT 5

Dla każdej z dwóch scen stereoskopowych HRS SPOT 5 wygenerowano obrazy epipolarne, które w systemie PCI Ortho Engine były niezbędne do przeprowadzenia korelacyjnych pomiarów NMT.

Pomiary NMT wykonano dla 7 obszarów testowych, charakteryzujących różne formy ukształtowania terenu. Produktem pomiaru były 16-bitowe obrazy zapisane w formacie GeoTiff z rozdzielczością terenową 20m, które następnie były interpolowane do rozdzielczości 5m, odpowiadającej rozdzielczości referencyjnych NMT. Wygenerowane modele nie były weryfikowane pod kątem występowania grubych błędów pomiarowych, ani też nie były filtrowane i edytowane. Analizy porównawcze wygenerowanych i referencyjnych NMT zestawiono w tabeli 5.

TABELA 5

Dokładność NMT dla obszarów testowych (NMT pomierzony z oczkiem siatki 20m interpolowanym do oczka referencyjnego NMT)

Obszar testowy DLR-DEM	Udział procentowy pomiarów charakteryzujących dokładność NMT na poziomie				Procent błędnej korelacji	Uwagi
	1m	2m	5m	10m		
01	17.0	16.1	30.8	15.2	20.8	
02	20.1	17.2	25.9	14.1	22.7	
03	20.9	18.0	30.7	15.9	14.4	
04	19.7	16.7	27.4	13.6	22.6	
05-1	4.9	4.6	10.2	14.3	66.0	błędna korelacja
05-2	8.0	7.1	16.1	13.8	55.0	błędna korelacja
06	14.9	14.1	31.7	21.1	18.2	

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, iż dla większości obszarów testowych 60% wyników mieści się w przedziale od 1m do 5m. Analizy szczegółowe przeprowadzone na histogramach obrazów pozwoliły określić błędy średnie wysokości poszczególnych NMT. Wyniki zestawiono w tabeli 6.

TABELA 6

Błędy średnie NMT wygenerowanych dla poszczególnych obszarów testowych

Ocena dokładności NMT	Obszar testowy DLR-DEM						
	01	02	03	04	05_1	05_2	06
Błąd średni	± 2.6	± 1.8	± 2.4	± 2.5	± 14.2	± 6.7	± 2.8

6. Metodyka generowania Numerycznego Modelu Terenu na podstawie panchromatycznej sceny stereoskopowej HRG SPOT 4

Opracowano metodykę pomiaru NMT bazującą wyłącznie na korelacji panchromatycznych obrazów cyfrowych HRG SPOT 4. Do pomiarów wykorzystano moduły oprogramowania fotogrametrycznego MATCH-T firmy Inpho oraz Image Station Automatic Elevation Collection (ISAE) firmy Z/I Imaging.

W badaniach metodycznych wskazano podstawowe czynniki mające wpływ na wynik autokorelacyjnego pomiaru NMT, których wnikliwą analizę przeprowadzono niezależnie w grupach metodycznych wydzielonych ze względu na sposób orientacji sceny stereoskopowej. Do najważniejszych czynników zaliczono:

- dokładność radiometryczną zobrażeń SPOT 4;
- dokładność wyznaczenia współczynników funkcji wymiernej Rational Function Coefficients dla sceny stereoskopowej SPOT 4 Pan;
- metodę pomiaru korelacyjnego;
- parametry programu realizującego pomiar punktów wysokościowych.

Znaleziono ścisły związek pomiędzy dokładnością NMT, a dokładnością radiometryczną zobrażeń SPOT 4. Określono optymalny sposób przetworzenia radiometrycznego panchromatycznych scen SPOT 4 z punktu widzenia skuteczności autokorelacyjnego pomiaru.

Wykazano, że dokładność wyznaczenia współczynników funkcji wymiernej (Rational Function Coefficients), odpowiedzialnych za poprawność odtworzenia elementów orientacji zewnętrznej scen SPOT 4 wpływa zasadniczo na dokładność autokorelacyjnego pomiaru NMT.

Wykazano również, że nieumiejętne stosowanie parametrów wsadowych programu realizującego autokorelacyjny pomiar NMT może w znacznym stopniu zdegradować dokładność pomiarów wysokościowych.

Zaproponowano rozwiązanie problemu związanego z ograniczeniami programów MATCH-T oraz ISAE dotyczącymi dopuszczalnej wielkości oczka siatki pomiarowej NMT dla zobrażeń stereoskopowych SPOT 4.

Pomiary Numerycznych Modeli Terenu wykonano na obszarach odpowiadających wydzielonym fragmentom sceny stereoskopowej SPOT 4 (obszar I, obszar II) dla których w niezależnych procesach wyznaczono współczynniki funkcji wymiernej RPC. Dla „obszaru I” wygenerowano siatkę punktów wysokościowych o gęstości 25m, zaś dla „obszaru II” wystarczającą okazała się gęstość 100m. Ocenę dokładności wygenerowanych NMT przeprowadzono na podstawie porównania z referencyjnymi NMT, pomierzonymi technikami autokorelacyjnymi na obrazach zdjęć lotniczych w skali 1: 26 000 przy udziale edycji manualnej. Dokładność modeli referencyjnych oszacowano na poziomie $m_z=0.4m$.

Wyniki analiz dokładności poszczególnych NMT uwzględniające wpływ opisanych powyżej czynników zamieszczono w tabeli 7.

TABELA 7

Wpływ podstawowych czynników na wyniki pomiaru NMT metodą korelacji obrazów panchromatycznych HRG SPOT 4

Czynnik wpływający na podwyższenie dokładności pomiaru korelacyjnego NMT	Błędy średnie wysokości m_z punktów siatki NMT dla wydzielonych obszarów [m]	
	Obszar I	Obszar II
Nie uwzględniono (surowy NMT)	± 8.8	± 4.5
Radiometryczna dokładność zobrażeń	± 8.4	± 4.1
Dokładność wyznaczenia RFC	± 7.6	± 3.4
Dobór parametrów programu pomiarowego	± 6.8	± 2.6
Wielkość oczka siatki pomiarowej NMT	± 4.7	± 2.6

W wyniku zastosowania opracowanej metodyki, pomierzono NMT z dokładnością wyrażoną błędem średnim $m_z = \pm 4.7\text{m}$ dla terenów górzystych i pagórkowatych oraz $m_z = \pm 2.6\text{m}$ dla terenów falistych i płaskich.

Dodatkowo opracowano autorską aplikację umożliwiającą filtrację punktów siatki NMT odstających od terenu oraz interpolację nowych na podstawie analizy otoczenia. Aplikacja powstała na bazie języka programowania Borland Delphi 6.0 dla systemów operacyjnych Windows NT, 2000, XP i dostosowana została do współczesnych standardów fotogrametrii cyfrowej. Zastosowanie niniejszej aplikacji spowodowało dalsze zwiększenie dokładności NMT do poziomu $m_z = \pm 3.9\text{m}$ dla terenów górzystych i pagórkowatych oraz $m_z = \pm 1.8\text{m}$ dla terenów falistych i płaskich.

7. Wnioski

Podniesienie dokładności surowego NMT wygenerowanego na podstawie panchromatycznych zobrażeń HRS SPOT 5 jest możliwe poprzez zastosowanie odpowiednich technik edycyjnych oraz dodatkowych pomiarów uzupełniających (linie nieciągłości, itp.), w szczególności dla terenów górzystych i pagórkowatych. Wobec powyższego, należy stwierdzić, że na podstawie panchromatycznych zobrażeń stereoskopowych HRS SPOT 5 można wygenerować NMT o dokładności nie gorszej niż 2m.

Zastosowanie właściwej metodyki pomiaru korelacyjnego na podstawie panchromatycznych zobrażeń HRG SPOT 4 pozwala uzyskać NMT, którego dokładność odpowiada dokładności surowego NMT wygenerowanego na podstawie zobrażeń HRS SPOT 5.

Literatura

- Angleraud, C., Becek, K., Trinder, J. C., 1992. DEM determination from SPOT. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Washington D. C., USA, Vol. 29/B4, pp. 969-973.
- Baltsavias, E. P., Stallmann, D., 1992. Metric information extraction from SPOT images and the role of polynomial mapping functions. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Washington D. C., USA, Vol. 29/B4, pp. 358-364.
- Chen, L. C., Lee, L. H., Lee, S. C., 1988. DTM generation using SPOT digital data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Kyoto, Japan, Vol. 27/B3, pp. 100-109.
- Ewiak I., 2004. Metodyka generowania Numerycznego Modelu Terenu na podstawie danych SPOT-P Stereo dla opracowań ortofotomap cyfrowych w skalach średnich”. Praca doktorska. IGiK.
- Ewiak, I., 1999. Filtracja NMT obszarów zurbanizowanych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, vol. 9, s. 35-39.
- Krupnik, A., 2000. Accuracy Assessment of Automatically Derived Digital Elevation Models from SPOT Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66 (8), pp. 1017-1023.
- Toutin, Th., 1999. Stereo-Mapping with SPOT-P and ERS-1 SAR Images. *International Journal of Remote Sensing*, 20 (15).
- Westin, T., 1990. Precision Rectification of SPOT Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 56 (2), pp. 247-253.

Recenzował: dr inż. Zdzisław Kurczyński