

**Jerzy WYSOCKI**

Katedra Budownictwa i Geodezji SGGW  
Zakład Geodezji i Fotogrametrii  
Department of Civil Engineering and Geodesy WULS  
Division of Geodesy and Photogrammetry

## **Europejska dyrektywa INSPIRE i problematyka jej implementacji w zakresie dokładności cyfrowych modeli powierzchni terenu**

### **Problem of accuracy of the digital terrain models with respect to European INSPIRE directive**

**Słowa kluczowe:** europejska dyrektywa INSPIRE, cyfrowe modele powierzchni terenu  
**Key words:** Infrastructure for Spatial Informations in the European Community, digital models of the land surface

#### **Wprowadzenie**

W związku z przyjęciem przez Parlament Europejski i Radę dyrektywy ustanawiającej Infrastrukturę Informacji Przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (Infrastructure for Spatial Information in the European Community – INSPIRE), która ma się opierać na infrastrukturach informacji przestrzennej ustanowionych i prowadzonych przez państwa członkowskie, Polska została zobowiązana terminowo do utworzenia Polskiej Infrastruktury Informacji Przestrzennej, która będzie stanowiła część INSPIRE. Jest to zadanie pilne, ponie-

waż – jak wynika z uwarunkowań formalnych – przepisy ustawowe powinny wejść w Polsce w życie nie później niż w trzecim kwartale 2008 roku (Gaździcki 2007).

Jednym z głównych tematów danych przestrzennych określonych w dyrektywie jest ukształtowanie terenu – cyfrowe modele powierzchni. Ponieważ autor od dłuższego czasu zajmuje się zagadnieniem dokładności cyfrowych modeli powierzchni terenu, to pozwolił sobie podjąć problem implementacji dyrektywy INSPIRE w tym zakresie.

#### **Zagadnienie dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu za pomocą modeli numerycznych/cyfrowych**

Uniwersalny model cyfrowy (CMT) przedstawiany jest najczęściej w postaci

regularnej siatki punktów aproksymujących powierzchnię terenu, uzyskiwanej na podstawie pomierzonych punktów odniesienia (punktów NMT). Regularna siatka punktów może być tworzona już w trakcie pomiaru (najczęściej metodami fotogrametrycznymi), stanowiąc jednocześnie punkty odniesienia, lub uzyskiwana na podstawie interpolacji powierzchniowej innych siatek punktów odniesienia (Schut 1976, Sunkieli 1980, Piasek i in. 1981, Wysocki 1987, 2000, Sierbieniuk 1990). W ogólności siatki punktów odniesienia mogą być uzyskiwane: za pomocą tachimetrów elektronicznych, pomiarów GPS, metodami fotogrametrycznymi, za pomocą skanera laserowego (lidar) lub radarowego czy też poprzez digitalizację map warstwicznych.

W zagadnieniach badawczych i projektowych z zastosowaniem interaktywnych metod komputerowych dokładność aproksymacji powierzchni terenu za pomocą modeli numerycznych/cyfrowych będzie miała zasadnicze znaczenie. Użytkownicy tych modeli będą musieli mieć możliwość korzystania z metod pozwalających na prostą i szybką ocenę ich dokładności, podobnie jak dotychczas użytkownicy map warstwicznych. W metodach NMT ma miejsce inna geneza aproksymacji powierzchni terenu niż przy opracowywaniu klasycznych map warstwicznych i do niej w związku z tym muszą być dostosowane metody oceny dokładności tej aproksymacji.

Jak już wskazano w innych pracach autora (np. Wysocki 1987, 1997, 2000), główne, stosowane obecnie metody NMT uwzględniają korelacje pomiędzy punktami modelu (dotyczy to przede wszystkim terenów równinnych o nie-

dużej liczbie fragmentów nieciągłości powierzchni terenu, które jednak trzeba z odpowiednią dokładnością pomierzyć i wprowadzić do NMT). Traktują one aproksymację jako proces stochastyczny o charakterze stacjonarnym, tzn. kowariancja zmiennych zależy tu od odległości punktów odniesienia. Jeżeli mamy  $n$  punktów odniesienia, to do aproksymacji z wyrównaniem metodą najmniejszych kwadratów można użyć  $n$  równań błędów, co w zapisie macierzowym można zapisać jako:

$$Z = H + h = BX + h \quad (1)$$

gdzie:

$Z$  – wysokości punktów odniesienia,

$H$  – składowe decydujące, opisane wielomianem ( $BX$ ), określające charakterystyczne formy terenu,

$h$  – różnice wysokości pomiędzy pomierzonymi wysokościami punktów odniesienia a wyznaczonymi na podstawie wielomianu.

W każdym punkcie odniesienia  $i$  wartość  $h_i$  będąca funkcją obserwacji, może być podzielona na składowe:

$$h_i = s_i + r_i \quad (2)$$

gdzie:

$s_i$  – składowe współzależne, tj. formy terenowe, które z powodu swej różnorodności nie mogą być opisane funkcją matematyczną (wielomianami) i dlatego wyznaczane są metodami statystycznymi z użyciem wariancji i kowariancji,  $r_i$  – błąd pomiaru, tj. „szum”, czyli błędy przypadkowe pomiaru, oraz wielkości związane z rodzajem terenu.

Można wydzielić dwie podstawowe grupy błędów związanych z rodzajem terenu i mających istotny wpływ na do-

kładność przedstawienia jego rzeźby (Wysocki 1979):

1. Błędy spowodowane szorstkością powierzchni terenu. Wynika ona z bardzo drobnych form naturalnych, powstałych pod wpływem warunków atmosferycznych oraz działalności człowieka. Wielkość błędów nie zależy w zasadzie od odległości (gęstości) pomierzonych punktów terenu. Wartość błędu można na podstawie badań eksperymentalnych oszacować w przeciętnych warunkach terenowych na około  $\pm 0,05$  m.
2. Błędy spowodowane „chropowatością” rzeźby. Jest ona zaczątkiem morfologii terenu i przejawia się małymi nierównościami (małymi formami) oraz niejednostajnymi spadkami pomiędzy punktami terenu. Wartość błędów jest uzależniona od odległości (gęstości) pomierzonych punktów aproksymujących powierzchnię terenu na danym obszarze – punktów odniesienia (punktów NMT).

Jak z powyższego wynika, błędy spowodowane szorstkością powierzchni terenu można zaliczyć do „szumu”. Błędy przypadkowe pomiaru mogą więc mieć wpływ, jeżeli będą istotnie większe od tych błędów.

Natomiast błędy spowodowane chropowatością wejdą do składowej współzależnej. Zasadniczy wpływ na ich wielkość będzie miała gęstość i poprawność rozmieszczenia mierzonych punktów odniesienia.

Na podstawie powyższych rozważań oraz podanych w literaturze opracowań zagranicznych autor zaproponował metodę oceny dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu za pomocą siatki punktów NMT (Wysocki 1998),

która w postaci ogólnej została zapisana jako:

$$m_h^2 = p_1 A^2 + p_2 (D \operatorname{tg} \alpha)^2 + C^2 \quad (3)$$

gdzie:

$m_h$  – średni błąd wysokości wyznaczonego (interpolowanego) punktu powierzchni terenu, określający również dokładność aproksymacji powierzchni terenu na podstawie punktów odniesienia,

$p_1$  – współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji powierzchniowej,

$A$  – parametr, charakteryzujący za pomocą błędu średniego dokładność określenia (pomiaru) wysokości punktów odniesienia,

$p_2$  – współczynnik wynikający z wpływu kąta  $\alpha$ , występującego tutaj jako parametr związany z oddziaływaniem warunków terenowych (chropowatości terenu),

$D$  – przeciętna odległość punktów siatki odniesienia,

$\alpha$  – przeciętny kąt nachylenia terenu na opracowywanym obszarze,

$C = D t$  – parametr, charakteryzujący za pomocą współczynnika  $t$  wpływ chropowatości terenu na dokładność aproksymacji jego powierzchni przy małych (bliskich zeru) wartościach kąta nachylenia terenu ( $\alpha$ ) i różnych wielkościach  $D$ .

Wartości współczynników w powyższej formule wyznaczono na podstawie badań przeprowadzonych przez autora na obiektach doświadczalnych. Temu zagadnieniu autor poświęcił oddzielne opracowania podane w literaturze (Wysocki 2005). Wyznaczone wartości współczynników dobrze spełniały wyniki badań przeprowadzonych na pięciu naturalnych obiektach doświadczalnych. Należy jednak dodać, że badania

dotyczyły głównie terenów nizinnych o przeciętnych spadkach do kilku stopni i średnim kącie nachylenia terenu wynoszącym około  $2^\circ$  oraz NMT tworzonych na podstawie tachimetrii, gdzie dokładność pomiaru wysokości punktów można oszacować na około  $\pm 0,05$  m, przy przeciętnej wzajemnej odległości mierzonych punktów NMT  $D = 40\text{--}60$  m.

Zakres możliwości rozszerzenia takich badań jest w dużym stopniu zderterminowany ich dużą pracochłonnością i kosztami. Prace prowadzone przez autora nad tym zagadnieniem wskazały, że dobrym uzupełnieniem i rozszerzeniem badań terenowych mogą być badania na symulowanych modelach powierzchni terenu, generowanych za pomocą komputera.

Na potrzeby prowadzonych badań opracowano równanie matematyczne  $Z(H) = f(X, Y)$  przedstawiające powierzchnię o dość zróżnicowanych, ale jednostajnych stokach, której średni kąt nachylenia ( $\alpha$ ) jest równy około  $2^\circ$ . Tworząc równanie matematyczne tej powierzchni, starano się przybliżyć jej ogólny kształt do naturalnej powierzchni terenu na wspomnianych wyżej obiektach doświadczalnych.

Należy zauważyć, że wygenerowana powierzchnia nie zawierała jednak elementów naturalnej chropowatości powierzchni terenu. Uwzględnienie tej chropowatości tak, żeby generowana powierzchnia przedstawiała ciągły obraz powierzchni obiektu naturalnego, okazało się dość trudne.

Ewentualne rozwiązanie tego problemu na drodze statystycznej uznano za niecelowe, ponieważ z teorii geostatystyki wynika, że w przypadku powierzchni

terenu zróżnicowanie wartości zmiennych przestrzennych z reguły jest duże, a metody statystyczne ignorują strukturę przestrzeni.

W związku z tym w celu rozwiązania tego problemu wykorzystano założenia teorii fraktali (Mandelbrot 1982). Benoit Mandelbrot zaproponował, by za fraktal uważać obiekt zbudowany z części podobnych do całości. W związku z tym w badaniach zastosowano procedurę polegającą na tym, że przez odpowiednie przeskalowanie powierzchni modelu całego obiektu otrzymano zróżnicowaną (chropowatą) powierzchnię części ( $50 \times 50$  m) obiektu eksperymentalnego, tworzącą fraktal, podobną do powierzchni całego obiektu i jednocześnie zbliżoną charakterem do powierzchni terenu na wspomnianych wyżej naturalnych obiektach doświadczalnych. Następnie otrzymaną powierzchnię, tworzącą fraktal, „dodano” w odpowiedni sposób do fragmentów powierzchni obiektu wygenerowanych na podstawie równania, otrzymując w ten sposób ciągły obraz powierzchni chropowatej dla całego obiektu.

W związku z powyższym wartości współczynników formuły (3) wyznaczono na podstawie badań przeprowadzonych przez autora na obiektach naturalnych oraz badań eksperymentalnych na modelach powierzchni terenu generowanych za pomocą komputera z wykorzystaniem założeń teorii fraktali. Wyznaczone wartości współczynników przedstawiono w postaci:

$$m_h^2 = 0,55 A^2 + 0,000015 (D^2 \operatorname{tg} \alpha)^2 + (D 0,0020)^2 \quad (4)$$

Opracowana formuła dobrze spełnia również kryteria dokładności przyjęte dla mapy zasadniczej w warunkach

polskich. Na potrzeby porównawcze przyjęto przeciętną dokładność określenia wysokości punktów NMT jako  $A = \pm 0,05$  m, a ich przeciętną odległość jako  $D = 50$  m. Należy zauważyć, że praktycznie stosowane zasadnicze cięcia warstwowe ( $h$ ) na mapach wielkoskalowych, wykorzystywanych do projektowania technicznego, wynoszą najczęściej: 0,5 m dla przedziału ( $\alpha \leq 2^\circ$ ) oraz 1 m dla przedziału ( $2^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$ ).

Dla przedziału ( $\alpha \leq 2^\circ$ ) i  $h = 0,5$  m oraz dla:

- średniego kąta nachylenia terenu w tym przedziale ( $\alpha = 1^\circ$ ) średni błąd wysokości punktów ( $m_h$ ) dla mapy zasadniczej będzie równy  $\pm 1/3h$ , czyli  $\pm 0,17$  m, a wartość tego błędu obliczona według formuły (3) będzie równa  $\pm 0,20$  m,
- maksymalnego kąta nachylenia terenu w tym przedziale ( $\alpha = 2^\circ$ ) średni błąd wysokości punktów ( $m_h$ ) dla mapy zasadniczej będzie równy  $\pm 2/3h$ , czyli  $\pm 0,33$  m, a według formuły (3) będzie to  $\pm 0,35$  m.

Dla przedziału ( $2^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$ ) i  $h = 1,0$  m oraz dla:

- średniego kąta nachylenia terenu w tym przedziale ( $\alpha = 4^\circ$ ) średni błąd wysokości punktów ( $m_h$ ) dla mapy zasadniczej będzie równy  $\pm 2/3h$ , czyli  $\pm 0,66$  m, a wartość tego błędu obliczona według formuły (3) będzie równa  $\pm 0,68$  m,
- najmniejszego kąta nachylenia terenu w tym przedziale ( $\alpha = 2^\circ$ ) średni błąd wysokości punktów ( $m_h$ ) dla mapy zasadniczej będzie równy  $\pm 1/3h$ , czyli  $\pm 0,33$  m, a wartość tego błędu obliczona według formuły (3) będzie równa  $\pm 0,35$  m,
- maksymalnego kąta nachylenia terenu w tym przedziale ( $\alpha = 6^\circ$ ) średni błąd wysokości punktów ( $m_h$ ) dla mapy zasadniczej będzie równy  $\pm 1h$ , czyli  $\pm 1,0$  m, a według formuły (3) będzie to  $\pm 1,02$  m.

Dane z powyższych analiz zestawiono w tabeli 1.

Najszerzej znana metoda oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni

TABELA 1. Dokładność aproksymacji powierzchni terenu  
TABLE 1. The accuracy of approximation of the land surface

Przedział według mapy zasadniczej Interval according to basic map	Kąt nachylenia terenu Slope of the terrain [°]	Średni błąd wysokości cyfrowego modelu powierzchni terenu Standard deviation of height of the digital terrain model $m_h = m_{NMT}$ [m] dla $D = d = 50$ m, $A = m_z = \pm 0,05$ m			
		według mapy zasadniczej according to basic map	według formuły (4), $m_h$ according to formula (4)	według formuły (5) according to formula (5)	
				parametr $\alpha$ parameter	$m_{NMT}$
$(\alpha \leq 2^\circ)$	0	$\pm 0, \dots$	$\pm 0,11$	0,004	$\pm 0,21$
	1	0,17	0,20	0,005	0,28
	2	0,33	0,35	0,007	0,35
$(2^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ)$	2	0,33	0,35	0,010	0,50
	4	0,66	0,68	0,015	0,75
	6	1,00	1,02	0,200	1,00

ni terenu opracowana przez prof. F. Ackermanna (1996) została zapisana za pomocą formuły:

$$m_{\text{NMT}}^2 = m_z^2 + (\alpha d)^2 \quad (5)$$

gdzie:

$m_{\text{NMT}}$  – błąd średni wyznaczenia interpolowanej wysokości punktu terenu na podstawie znanych punktów NMT (dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu),

$m_z$  – błąd średni wyznaczenia (pomiaru) wysokości punktów NMT,

$\alpha$  – parametr opisujący charakter terenu,

$d$  – średnia odległość pomiędzy punktami NMT,

$\alpha_1 = 0,004\text{--}0,007$  dla terenów ławych o gładkich powierzchniach,

$\alpha_2 = 0,010\text{--}0,020$  dla terenów o średniej trudności,

$\alpha_3 = 0,022\text{--}0,044$  dla terenów trudnych (o nieregularnych i stromych powierzchniach).

Wyniki oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni terenu (cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu) na podstawie formuły (5) porównano z danymi powyższych analiz i zestawiono w tabeli 1. W tym celu przyjęto założenie, że parametrowi  $\alpha_1$  w formule (5) odpowiada zakres przedziału ( $\alpha \leq 2^\circ$ ), a parametrowi  $\alpha_2$  odpowiada zakres przedziału ( $2^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$ ). Należy zauważyć, że są to najbardziej reprezentatywne tereny na obszarze Europy.

Jak wynika z tabeli 1, otrzymano dobrą zbieżność wyników na podstawie porównywanych metod. Wskazuje to na spójność podstawowych założeń przyjętych przy opracowywaniu tych metod. Należy jednak dodać, że formuła (4) jest bardziej uniwersalna, ponieważ określa charakter terenu poprzez obiektywny

parametr, jakim jest kąt nachylenia, zamiast subiektywnego doboru parametru  $\alpha$  w formule (5). Formuła (4) posiada również współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji powierzchniowej. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano metodę „funkcji sklejanых”, uznawaną za jedną z najlepszych przy tego typu zadaniach interpolacyjnych, obejmujących przede wszystkim tereny z przedziału ( $\alpha \leq 2^\circ$ ) i ( $2^\circ \leq \alpha \leq 6^\circ$ ). Wykonanie powyższych opracowań z wykorzystaniem innych metod interpolacyjnych może dać w takich terenach trochę inne (trochę gorsze) wyniki, na co wskazują wstępne badania przeprowadzone przez autora w tym zakresie.

## Podsumowanie

Szybki rozwój gospodarczy powoduje, że coraz więcej zagadnień badawczych, planistycznych i projektowych ma charakter przestrzenny, wymagający informacji 3D. W zagadnieniach tych dokładność aproksymacji powierzchni terenu za pomocą modeli numerycznych/cyfrowych będzie miała zasadnicze znaczenie. W pracy przedstawiono opracowaną przez autora metodę oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni terenu, którą porównano z wynikami innych badań w tym zakresie. Otrzymano dobrą zbieżność analizowanych wyników. Należy jednak dodać, że proponowana metoda zapisana za pomocą formuły (4) jest bardziej uniwersalna, ponieważ określa charakter terenu poprzez obiektywny parametr, jakim jest kąt nachylenia, zamiast subiektywnego doboru parametru  $\alpha$  w formule (5).

Proponowana metoda oceny dokładności cyfrowych modeli powierzchni terenu może znaleźć zastosowanie do:

- prognozowania dokładności numerycznej/cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu w zależności od dokładności wyznaczenia wysokości punktów NMT, przeciętnej odległości tych punktów oraz nachylenia terenu na rozpatrywanym obszarze,
- pogładowej oceny przez użytkownika dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu, jaką może oszacować na podstawie posiadanej siatki punktów NMT, spełniającej założone powyższe warunki.

Można sądzić, że proponowana metoda może być rekomendowana w badaniach przy ustanawianiu infrastruktury informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE).

## Literatura

- ACKERMANN F. 1996: Technique and strategies for DEM generation. Digital photogrammetry: an addendum to the manual photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing: 135–141.
- GAŹDZICKI J. 2007: Problematyka transpozycji dyrektywy INSPIRE do prawa polskiego. *Przegląd Geodezyjny* 5: 14–18.
- MANDELBROT B.B. 1982: The fractal geometry of nature. W.H. Freeman and Co., New York.
- PIASEK Z., MILBERT S., PIERZCHAŁA H. 1981: Przegląd numerycznych modeli terenu. *Zesz. Nauk. AGH, Geodez.* 62: 36–47.
- SCHUT G.H. 1976: Review of interpolation methods for digital terrain models. XIIth Congress of the International Society for Photogrammetry, Helsinki.
- SIERBIENIUK G.H. i inni 1990: Metody modelowania geopoliej po danym w nieregularnie rozłożonych toczkach. *Geodezja i Kartografia* 11: 37–49.
- SUNKIEL K. 1980: General Surface representation Model Design for Geodesy. *The Ohio State University* 292.
- WYSOCKI J. 1979: Analiza dokładności opracowań warstwicowych do projektowania drenowania użytków rolnych. *Zesz. Nauk. SGGW-AR, Melioracje Rolne* 18: 51–61.
- WYSOCKI J. 1987: Problemy dokładności nowoczesnych technik opracowania wielkoskalowych map warstwicowych pod kątem potrzeb wodnomelioracyjnych. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa.
- WYSOCKI J. 1997: On the approximation of the land surface in the computerised methods of working out contour lines. *Ann. Wars. Agricult. Univ. SGGW, Land Reclam.* 28: 71–76.
- WYSOCKI J. 1998: Numeryczny model terenu (NMT) jako baza danych dla przestrzennego zarządzania zlewni i potrzeb konstrukcji inżynierskich. Mat. Konf. PAN, SGGW, Warszawa: 66–72.
- WYSOCKI J. 2000: Geodezja z fotogrametrią dla inżynierii środowiska i budownictwa. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- WYSOCKI J. 2005: Dokładność cyfrowych modeli terenu w aspekcie badań eksperymentalnych. *Przegląd Geodezyjny* 6: 3–7.
- WYSOCKI J. 2007a: Cyfrowy model terenu na potrzeby tworzenia katastru trójwymiarowego. *Przegląd Geodezyjny* 11: 15–19.
- WYSOCKI J. 2007b: Wpływ spadków terenu oraz dokładności określenia wysokości punktów NMT na dokładność cyfrowego modelu powierzchni terenu. (*Influence of the land gradient and accuracy of height of DTM points on accuracy of digital model of the land surface*) Międzynarodowa Konferencja „Cadastre, Photogrammetry, Geoinformatics”, Lwów. *Zeszyty Naukowe Politechniki Lwowskiej, Geodezja, kartografija i aerofotogramka* 68: 156–162.

## Summary

**Problem of accuracy of the digital terrain models with respect to European INSPIRE directive.** In the paper are presented problem of estimation of the accuracy of digital approximation of the land surface and question of it transposition to European INSPIRE directive. The method of estimation of accuracy of digital model of the land surface elaborated by author and results of

experimental verification of this method are presented. It is proposed to include this method to European Infrastructure for Spatial Information.

**Author's address:**

Jerzy Wysocki  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego  
Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska  
Katedra Budownictwa i Geodezji  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
Poland