

JERZY WYSOCKI*

ZAGADNIENIE METODY OCENY DOKŁADNOŚCI CYFROWYCH MODELI TERENU W ASPEKCIE IMPLEMENTACJI EUROPEJSKIEJ DYREKTYWY INSPIRE

PROBLEM OF METHOD OF ESTIMATION OF ACCURACY OF THE DIGITAL TERRAIN MODELS WITH RESPECT TO EUROPEAN INSPIRE DIRECTIVE

Streszczenie

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 artykule przedstawiono opracowaną przez autora metodę oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni terenu, którą porównano z wynikami innych badań w tym zakresie. Przeprowadzone badania wskazały, że proponowana metoda może być rekomendowana przy ustanawianiu infrastruktury informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE).

Słowa kluczowe: numeryczny model terenu

Abstract

In the paper are presented problem of estimation of the accuracy of digital approximation of the land surface and question of its 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.

Keywords: digital model of the land surface

* Dr hab. inż. Jerzy Wysocki, prof. SGGW, Katedra Budownictwa i Geodezji, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.

1. Wstęp

Szybki rozwój gospodarczy powoduje, że coraz więcej zagadnień planistycznych i projektowych ma charakter przestrzenny, wymagający informacji 3D. Obecnie wiele dostępnych programów komputerowych pozwala użytkownikowi na dość łatwe generowanie cyfrowego modelu powierzchni terenu na podstawie bazowego zbioru NMT oraz generowania obiektów przestrzennych odniesionych do tej powierzchni. Dokładność generowania informacji 3D będzie tym samym związana w podstawowym stopniu z dokładnością aproksymacji i obrazowania powierzchni terenu na podstawie zbioru punktów NMT. Naprzeciw tym potrzebom wychodzi dyrektywa INSPIRE (*Infrastructure for Spatial Information In the European Community*) ustanawiająca Infrastrukturę Informacji Przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej. 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 w niniejszym artykule omawia problem implementacji dyrektywy INSPIRE w zakresie metody oceny dokładności cyfrowych modeli powierzchni terenu.

2. Zagadnienie oceny dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu za pomocą modeli numerycznych/cyfrowych

Na podstawie prowadzonych badań oraz opierając się na literaturze podanej w opracowaniach zagranicznych, autor zaproponował metodę oceny dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu za pomocą siatki punktów NMT [3], która w postaci ogólnej została zapisana następująco

$$m_h^2 = p_1 A^2 + p_2 (D \operatorname{tg} \alpha)^2 + C^2 \quad (1)$$

gdzie:

- m_h – średni błąd wysokości wyznaczanego (interpolowanego) punktu powierzchni terenu, określający również dokładność aproksymacji powierzchni terenu na podstawie punktów odniesienia (punktów NMT),
- p_1 – współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji powierzchniowej,
- A – parametr charakteryzujący za pomocą błędu średniego dokładność określenia (pomiaru) wysokości punktów odniesienia (punktów NMT),
- p_2 – współczynnik wynikający z wpływu kąta α występującego tutaj jako parametr związany z oddziaływaniem warunków terenowych (chropowatość terenu),
- D – przeciętna odległość punktów siatki odniesienia (NMT),
- α – przeciętny kąt nachylenia terenu na opracowywanym obszarze,
- $C = D t$ – wpływ chropowatości terenu na dokładność aproksymacji jego powierzchni przy małych (bliskich zera) wartościach kąta nachylenia terenu α i różnych wielkościach D , charakteryzowany za pomocą współczynnika t .

Wartości współczynników w powyższej formule wyznaczono dzięki badaniu przeprowadzonemu przez autora na obiektach doświadczalnych. Temu zagadnieniu autor poświęcił oddzielne opracowania podane w [5]. Wyznaczone wartości współczynników do-

brze spełniają 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 ok. 2° oraz NMT tworzonych na podstawie tachimetrii, gdzie dokładność pomiaru wysokości punktów można oszacować na ok. $\pm 0,05$ m, przy przeciętnej wzajemnej odległości mierzonych punktów NMT, $D = 40 - 60$ m. Zakres możliwości rozszerzenia takich badań jest w dużym stopniu zdeterminowany 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.

Dla potrzeb prowadzonych badań opracowano równania matematyczne $Z(H) = f(X, Y)$ przedstawiające powierzchnie o dość zróżnicowanych, ale jednostajnych stokach, o różnych średnich kątach nachylenia terenu α . Tworząc równanie matematyczne powierzchni, starano się przybliżyć jej ogólny kształt do naturalnej powierzchni terenu na wspomnianych wyżej obiektach doświadczalnych. Należy zauważyć, że wygenerowane powierzchnie nie zawierały jednak elementów naturalnej chropowatości 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 [2]. 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 (50×50 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 (1) 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 poniższej formule

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

Opracowaną formułę porównano z metodą oceny dokładności cyfrowego modelu powierzchni terenu opracowaną przez prof. F. Ackermanna [1], która została zapisana w postaci

$$m_{\text{NMT}}^2 = m_z^2 + (\alpha d)^2 \quad (3)$$

gdzie:

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

- m_z – błąd średni wyznaczenia (pomiaru) wysokości punktów NMT,
- α – parametr opisujący charakter terenu,
- d – średnia odległość pomiędzy punktami NMT,
- $\alpha_1 = 0,004 - 0,007$ – dla terenów łatwych o gładkich powierzchniach,
- $\alpha_2 = 0,010 - 0,020$ – dla terenów o średniej trudności,
- $\alpha_3 = 0,022 - 0,044$ – dla terenów trudnych (o nieregularnych i stromych powierzchniach).

Analizę porównawczą przeprowadzono na podstawie przedstawionych wyżej modeli powierzchni terenu wygenerowanych za pomocą komputera. Dla potrzeb badawczych wygenerowano dwa rodzaje modeli, dla których przyjęto średnie kąty nachylenia terenu wynoszące, odpowiednio, 2^g i 6^g . Przyjmując podany zakres spadków, starano się uwzględnić najbardziej reprezentatywne tereny na obszarze Europy. Dla obydwu wariantów wygenerowano siatki „pomierzonych” punktów NMT o gęstości co: $D = 25$ m, $D = 50$ m, $D = 75$ m oraz $D = 100$ m. W celu uwzględnienia wpływu dokładności określenia (pomiaru) wysokości punktów NMT, wysokości tych punktów „ubłędniono” przez wylosowanie za pomocą programu statystycznego błędów pomiaru dla każdego punktu, przy założeniu normalności rozkładu wprowadzonych błędów. Do wszystkich powyższych wariantów wprowadzono oddzielnie dwa warianty błędów pomiaru: $A = \pm 0,5$ m oraz $A = \pm 1,0$ m. W ten sposób dzięki odpowiednim kombinacjom powyższych różnych wariantów otrzymano 20 modeli – „obiektów”, które przedstawiono w tab. 1. Na podstawie tak otrzymanych numerycznych modeli terenu (NMT) wygenerowano cyfrowe modele powierzchni terenu (CMT), które poddano następnie ocenie dokładności. CMT wygenerowano za pomocą pakietu C-GEO, stosując „metodę funkcji sklepanych”, uznawaną za jedną z lepszych przy tego typu zadaniach interpolacyjnych dla terenów o niezbyt skomplikowanych powierzchniach. Dla potrzeb oceny dokładności utworzonych cyfrowych modeli terenu (CMT) obliczono dla każdego z tych modeli wysokości (H_{CMT}) odpowiednich zbiorów punktów kontrolnych, które wykorzystano do oceny dokładności aproksymacji powierzchni terenu dla każdego modelu. W tym celu na podstawie zbudowanych modeli NMT tworzących „prawdziwe” modele powierzchni obliczono „prawdziwe” wysokości powierzchni terenu w punktach kontrolnych (H_K). Na podstawie błędów wysokości (dh) w punktach kontrolnych dla każdego modelu obliczono średni błąd M_h określający dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu wg formuły

$$M_h = \pm \sqrt{\frac{\sum dh^2}{n}} \quad (4)$$

$$dh = H_m - H_K$$

gdzie:

- H_{CMT} – wysokości punktów kontrolnych cyfrowego modelu powierzchni terenu,
- H_K – „prawdziwe” wysokości punktów kontrolnych,
- N – liczba punktów kontrolnych.

W tabeli 1 wartość błędu M_h porównano z błędami określającymi dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu obliczonymi wg (2) i (3).

Dla poszczególnych modeli CMT podano różnice (Δ_h) pomiędzy wartościami błędów M_h określających dokładności tych modeli wyznaczone na podstawie przedstawionych wyżej badań eksperymentalnych a błędami (m_h , m_{NMT}) tych samych modeli obliczonymi wg (2) i (3).

Tabela 1

Dokładność cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu (wartości liniowe podane w metrach)

| Nr modelu | α [g] | A m_z | D d | M_h | Wg (2) | | Wg (3) | |
|-----------|----------------|--------------|------------|-------|--------|------------|-----------|------------|
| | | | | | m_h | Δ_h | m_{NMT} | Δ_h |
| 1 | 2 ^g | 0,05 | 25 | 0,15 | 0,10 | -0,05 | 0,18 | +0,03 |
| 2 | | 0,50 | 25 | 0,46 | 0,38 | -0,08 | 0,53 | +0,07 |
| 3 | | 1,00 | 25 | 0,78 | 0,75 | -0,03 | 1,02 | +0,24 |
| 4 | | 0,05 | 50 | 0,24 | 0,32 | +0,08 | 0,35 | +0,11 |
| 5 | | 0,50 | 50 | 0,48 | 0,49 | +0,01 | 0,61 | +0,13 |
| 6 | | 1,00 | 50 | 0,89 | 0,81 | -0,08 | 1,06 | +0,17 |
| 7 | | 0,50 | 75 | 0,81 | 0,79 | -0,02 | 0,72 | -0,09 |
| 8 | | 1,00 | 75 | 1,01 | 1,02 | +0,01 | 1,13 | +0,12 |
| 9 | | 0,05 | 100 | 1,24 | 1,23 | -0,01 | 0,70 | -0,54 |
| 10 | | 0,50 | 100 | 1,28 | 1,29 | +0,01 | 0,86 | -0,42 |
| 11 | | 1,00 | 100 | 1,42 | 1,44 | +0,02 | 1,22 | -0,22 |
| 12 | 6 ^g | 0,05 | 25 | 0,46 | 0,23 | -0,23 | 0,50 | +0,04 |
| 13 | | 0,50 | 25 | 0,65 | 0,44 | -0,21 | 0,71 | +0,06 |
| 14 | | 1,00 | 25 | 1,00 | 0,78 | -0,22 | 1,12 | +0,12 |
| 15 | | 0,50 | 50 | 0,88 | 0,99 | +0,11 | 1,18 | +0,30 |
| 16 | | 1,00 | 50 | 1,13 | 1,18 | +0,05 | 1,41 | +0,28 |
| 17 | | 0,50 | 75 | 2,04 | 2,11 | +0,07 | 1,58 | -0,46 |
| 18 | | 1,00 | 75 | 2,10 | 2,20 | +0,10 | 1,80 | -0,30 |
| 19 | | 0,50 | 100 | 3,75 | 3,68 | -0,07 | 2,06 | -1,69 |
| 20 | | 1,00 | 100 | 3,82 | 3,74 | -0,08 | 2,24 | -1,58 |

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 (2) jest bardziej uniwersalna, ponieważ określa charakter terenu przez obiektywny parametr, jakim jest kąt nachylenia, zamiast subiektywnego doboru parametru α w (3). Formuła (2) ma również współczynnik zależny od zastosowanej metody interpolacji powierzchniowej. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano metodę „funkcji sklejaných” uznawaną za jedną z najlepszych przy tego typu zadaniach interpolacyjnych. Wykonanie powyższych opracowań z zastosowaniem innych metod interpolacyjnych może dać w takich terenach trochę inne wyniki, na co wskazują wstępne badania przeprowadzone przez autora w tym zakresie. Formuła (2) dała trochę lepsze wyniki w ocenie dokładności cyfrowego modelu terenu niż formuła (3), co wskazuje na celowość rekomendowania tej metody w badaniach przy ustanawianiu infrastruktury informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE). Należy jednak dodać, że bardziej szczegółowe porównanie powyższych metod zapisanych za pomocą formuł (2) i (3) wymagałoby przeprowadzenia szerszych badań i analiz.

3. 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 artykule 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 w postaci formuły (2) jest bardziej uniwersalna, ponieważ określa charakter terenu poprzez obiektywny parametr, jakim jest kąt nachylenia zamiast subiektywnego doboru parametru α w formule (3). 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 nachyleń terenu na rozpatrywanym obszarze,
- pogładowej oceny przez użytkownika dokładności cyfrowej aproksymacji powierzchni terenu, jaką może oszacować na podstawie posiadanej siatki punktów NMT, spełniającej założone, wyższe warunki.

Przeprowadzone badania wykazały, że proponowana metoda może być rekomendowana przy ustanawianiu infrastruktury informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE).

Literatura

- [1] Ackermann F., *Technique and strategies for DEM generation*, Digital photogrammetry: an addendum to the manual photogrammetry, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1996, 135-141.
- [2] Mandelbrot B.B., *The fractal geometry of nature*, W.H. Freeman and Co., New York 1982.
- [3] Wysocki J., *Numeryczny model terenu jako baza danych dla przestrzennego urządzania zlewni i potrzeb konstrukcji inżynierskich*, Konf., SGGW, PAN „Problemy kształtowania środowiska obszarów wiejskich”, Przegł. Nauk. Wydz. IiKŚ, z. 15, Warszawa 1998, 66-72.
- [4] Wysocki J., *Geodezja z fotogrametrią dla inżynierii środowiska i budownictwa*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000.
- [5] Wysocki J., *Dokładność cyfrowych modeli terenu w aspekcie badań eksperymentalnych*, Przegład Geodezyjny 6, Warszawa 2005, 3-7.