

**Jerzy WYSOCKI**

Katedra Geodezji i Fotogrametrii SGGW

Department of Geodesy and Photogrammetry WAU

## **Metody GPS i możliwości ich zastosowania do tworzenia numerycznego modelu terenu (NMT) dla inżynierii środowiska GPS methods and possibilities of their application for creation of the digital terrain model (DTM) for environmental engineering**

### **Wprowadzenie**

Coraz szersze zastosowanie dla tworzenia osnów geodezyjnych znajdują metody GPS (Śledziński 1990, Oszczak 1993, Cacoń 1995b, Czarnecki 1997). Proces pomiaru jest całkowicie zautomatyzowany, a dane współrzędne X,Y,Z otrzymuje się w postaci cyfrowej, gotowej do dalszego opracowania komputerowego.

Dynamiczny rozwój tego systemu (Oszczak 1993, Czarnecki 1997, Cacoń 1998) wskazuje na możliwość coraz szerszego stosowania metod GPS do pomiaru punktów szczegółowych. Główny aspekt prowadzonych w tym zakresie badań dotyczy zagadnienia określania współrzędnych płaskich (X,Y). Jednak specyfiką numerycznych modeli terenu i map warstwicznych opracowywanych dla inżynierii środowiska (np. Wysocki 1981, 1987, 1997, 1998a, 1998b) są stosunko-

wo duże wymagania odnośnie szczegółowości i dokładności wysokościowej tych opracowań.

W Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie są prowadzone między innymi badania w zakresie dokładności i oceny możliwości zastosowania metod GPS do tworzenia NMT dla potrzeb inżynierii środowiska (Wysocki i Karaszkievicz 1998).

### **Metody GPS do pomiaru punktów NMT oraz badania eksperymentalne**

Na podstawie badań prowadzonych w Katedrze Geodezji i Fotogrametrii SGGW w zakresie opracowań wysokościowych dla potrzeb inżynierskich (Wysocki 1981, 1987, 1998) oraz odnośnej literatury można sformułować następujące, ogólne postulaty co do optymalnych

metod pomiaru punktów NMT dla inżynierii środowiska:

- Ze względu na masowy charakter pomiarów (na ogół duża ilość mierzonych punktów NMT) metoda powinna zapewniać wysoki stopień automatyzacji w pozyskiwaniu i przetwarzaniu danych.
- Ze względu na ekonomikę wykonywanych pomiarów terenowych metoda powinna zapewniać możliwie dużą szybkość i jednocześnie odpowiednią (dla danych potrzeb) dokładność pomiarów.
- Metoda powinna być możliwie najtańsza w stosunku do innych stosowanych obecnie metod.

Jest to szeroki zakres zagadnień. W tym miejscu ograniczymy się do uwagi, że znaczny wpływ mają koszty instrumentów zarówno:

- przy tachimetrii elektronicznej (stacje total station),
- fotogrametrii (autografy analityczne, fotogrametryczne stacje cyfrowe),
- jak i przy metodach GPS (odbiorniki GPS z oprzyrządowaniem).

Niektóre metody GPS wydają się spełniać wszystkie powyższe postulaty. Jednak w obecnej fazie ich dynamicznego rozwoju istnieje pilna potrzeba prowadzenia w tym zakresie odpowiednich badań.

Na podstawie dotychczasowych opracowań w zakresie metod GPS (Oszczak 1993, Wysocki i Karaszewicz 1998, Cacoń 1995) można sformułować następujące ogólne wnioski w aspekcie zastosowania tych metod do pomiaru punktów NMT:

1. Mało przydatna wydaje się metoda statyczna ze względu na długi, co naj-

mniej godzinny czas obserwacji na każdym mierzonym punkcie.

2. Mało przydatna wydaje się metoda pseudostatyczna, wymagająca dwukrotnych obserwacji (w pewnym odstępie czasu) na każdym punkcie, co przy pomiarach NMT byłoby uciążliwe.
3. Szybka i efektywna jest metoda kinematyczna. Podstawowym jednak warunkiem jest zachowanie łączności co najmniej z czterema tymi samymi satelitami w czasie ruchu odbiornika. W warunkach krajowych, przy pomiarze punktów NMT obejmujących równomiernie całą powierzchnię wycinka terenu, spełnienie tego postulatu wydaje się dość trudne. W przypadku przerwania łączności trzeba dokonywać nowej inicjalizacji pomiaru.

W ostatnim czasie nastąpił szybki rozwój metod kinematycznych DGPS oraz RTK (Cacoń 1998). Metoda DGPS (Differential Global Positioning System) polega na różnicowych pomiarach GPS w czasie rzeczywistym i oparta jest na równoczesnych pomiarach kodowych. Jednak dość mała dokładność pomiaru tą metodą może ograniczać jej szersze zastosowanie dla inżynierii środowiska.

Metoda RTK (Real Time Kinematic) pozwala na określanie współrzędnych punktów przez wykorzystanie fazowych pomiarów różnicowych GPS oraz uzyskiwanie szybkich wyników w czasie rzeczywistym.

Należy jednak dodać, że dokładność pomiaru metodą kinematyczną (tak jak i statyczną) zależy w dużym stopniu od klasy odbiorników GPS. Jest oczywiste, że lepsze dokładności zapewniają wyso-

kiej klasy (i w związku z tym znacznie droższe) odbiorniki.

W warunkach krajowych zagadnienie dokładności metod GPS jest dobrze zbadane dla potrzeb tworzenia osnów geodezyjnych (Śledziński 1990, Oszczak 1993, Czarniecki 1997), gdzie są stosowane wysokiej klasy odbiorniki oraz długie czasy obserwacji. W niniejszej pracy przedstawiono badania przeprowadzone niższej klasy odbiornikami, dobierając czas obserwacji, który może jeszcze być realnie brany pod uwagę przy pomiarze punktów NMT.

W pomiarach zostały zastosowane dwa jednakowe zestawy odbiorników GPS Pathfinder ProXL. W skład jednego zestawu wchodziły:

- precyzyjny 12 kanałowy odbiornik GPS,
- lekka antena odbiorcza typu compact,
- terminal do wprowadzania i rejestracji danych TDC1, 4Mb pamięci RAM,
- plecak do przenoszenia zestawu,
- seryjne oprogramowanie PFINDER.

Głównym celem przeprowadzonych badań była ocena dokładności pomiaru punktów NMT, a w szczególności dokładności określania wysokości tych punktów, z wykorzystaniem zastosowanych odbiorników GPS i przyjętych czasów obserwacji.

Podczas pomiarów jeden odbiornik (jego antena) został usytuowany nad punktem osnowy geodezyjnej t650 i pełnił rolę stacji bazowej w trakcie całego cyklu pomiarowego. Drugi odbiornik był przemieszczany na punkty, których pozycje względem stacji bazowej miały być wyznaczone. Konfiguracja obydwu odbior-

ników zapewniała synchroniczne obserwacje sygnałów satelitarnych w interwale co 5 sekund.

Na wyznaczonych punktach prowadzone były jednocześnie obserwacje fazowe (czas obserwacji 10 minut) oraz obserwacje kodowe. Pomiaru te zaplanowano, starając się zróżnicować warunki obserwacji GPS:

- ok. 50% wszystkich zaobserwowanych punktów było położonych w terenie odkrytym,
- ok. 30% punktów było położonych na terenie wsi, o niskiej zabudowie i rzadko rosnących drzewach,
- ok. 20% punktów było zasłoniętych przynajmniej z jednej strony przez drzewa, na ogół liściaste, ale bez liści,
- ok. 50% ze wszystkich zaobserwowanych punktów pomierzono w dzień, a drugą połowę wieczorem, w nocy oraz rano.

Na obiekcie ok. 3 x 10 km, w okolicach Rajgrodu (częściowo teren BPN) określono współrzędne geodezyjne x, y siedmiu punktów oraz wysokości 45 punktów przy pomocy niwelacji geometrycznej. Nie są znane charakterystyki dokładności współrzędnych płaskich – były to dwa punkty triangulacji III klasy, dwa punkty poligonowe wyższej klasy oraz trzy punkty wyznaczone za pomocą tachimetru elektronicznego, w nawiązaniu do wymienionych punktów. Dokładność wysokości kontrolnych punktów niwelacyjnych oszacowano na  $2 \pm \text{cm}$ .

Po przeprowadzeniu procesu korekcji zbiorów obserwacji uzyskanych za pomocą odbiornika ruchomego na podstawie obserwacji stacji bazowej otrzymano współrzędne wyznaczanych

punktów w układzie UTM (Universal Transvers Mercator). Współrzędne płaskie UTM zostały przetransformowane na Układ 1965. Dla celów porównawczych zastosowano dwa rodzaje transformacji: afiniczną oraz Helmerta.

Po transformacji afinicznej przy czterech punktach łącznych otrzymano wartość średniego błędu położenia punktu równą:

dla pomiarów kodowych  $m_p = \pm 0,24$  m

dla pomiarów fazowych  $m_p = \pm 0,20$  m

zaś po transformacji Helmerta otrzymano:

dla pomiarów kodowych  $m_p = \pm 0,39$  m

dla pomiarów fazowych  $m_p = \pm 0,38$  m

Współrzędne wysokościowe zostały przeliczone do państwowego układu wysokości. W tym celu dla wysokości każdego punktu wyznaczonej na podstawie obserwacji GPS została obliczona poprawka  $N_i$  według równania:

$$N_i = N_0 + aX_i + bY_i$$

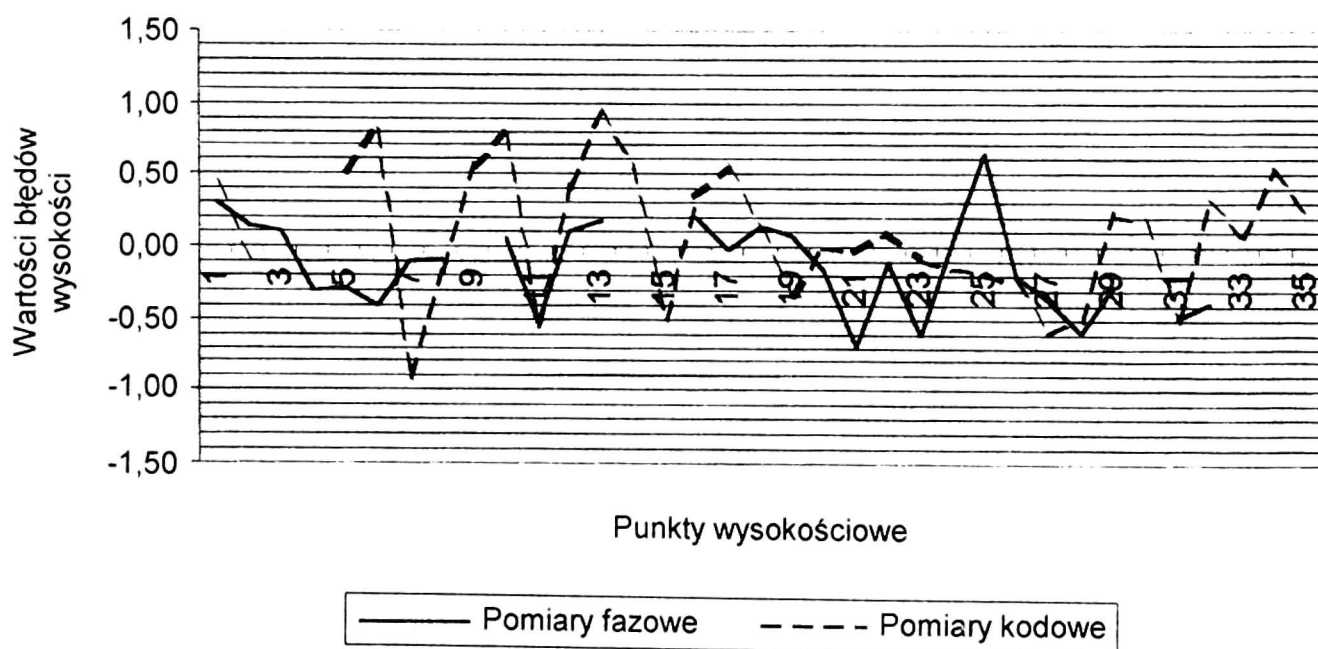
Współczynniki transformacji  $N_0$ ,  $a$ ,  $b$  zostały wyznaczone na podstawie sześciu

punktów dostosowania o znanych wysokościach w układzie państwowym. Niezbyt duża liczba (35) zaobserwowanych punktów nie pozwala na statystyczne zróżnicowanie wpływu warunków obserwacji na dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów. W związku z tym obliczone błędy średnie odzwierciedlają przeciętne warunki obserwacji, w różnych sytuacjach terenowych.

Obliczone wartości błędów średnich i przeciętnych wyznaczonych wysokości punktów (rys.) wyniosły:

- pomiary fazowe  $m_H = \pm 0,33$  m,  $t_H = 0,27$  m
- pomiary kodowe  $m_H = \pm 0,45$  m,  $t_H = 0,38$  m

Dla fragmentu terenu dokonano wyboru oraz pomiaru punktów NMT metodą GPS i równocześnie pomiar tych samych punktów tachimetrem elektronicznym. Na ich podstawie opracowano przy pomocy programu C-GEO warstwice o cięciu 1 m. Dokładność opracowanych warstwic można oszacować na ok.  $\pm 0,3 + 0,5$  m.



RYSUNEK. Wykres wartości błędów wysokości punktów GPS



## Podsumowanie

Zastosowanie metod GPS umożliwia wysoki stopień automatyzacji pomiaru punktów NMT. Szersze wykorzystanie metod GPS dla potrzeb inżynierii środowiska determinuje potrzebę prowadzenia badań w tym zakresie.

W pracy przedstawiono badania odnośnie oceny dokładności wyznaczania współrzędnych (głównie wysokości) punktów NMT za pomocą odbiorników Pathfinder ProXL oraz zagadnienia metodyczne przeprowadzonych badań. Ze względu na duże ceny wysokiej klasy odbiorników GPS badania przeprowadzono niższej klasy odbiornikami, dobierając czas obserwacji, który może jeszcze być realnie brany pod uwagę przy pomiarze punktów NMT.

Zgodnie z przyjętym algorytmem badań:

- obserwacje wykonano dwoma odbiornikami – metodą różnicową,
- konfiguracja obydwu odbiorników zapewniała synchroniczne obserwacje sygnałów satelitarnych w interwale co 5 s,
- na wyznaczanych punktach prowadzone były jednocześnie obserwacje fazowe (czas obserwacji 10 min) i obserwacje kodowe,
- wyznaczone punkty dobrano w ten sposób, żeby zróżnicować warunki obserwacji GPS.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że:

- dokładność współrzędnych płaskich z obserwacji fazowych po transformacji afinicznej można oszacować na ok.  $\pm 0,2$  m,

- dokładność określenia wysokości z obserwacji fazowych można oszacować na ok.  $\pm 0,3$  m.

Dla fragmentu terenu dokonano wyboru i pomiaru punktów NMT metodą GPS oraz tachimetryczną. Na ich podstawie opracowano za pomocą programu C-GEO mapę warstwicową o cięciu 1 m. Dokładność opracowanych warstw GPS można oszacować na ok.  $\pm 0,3$ – $0,5$  m.

Przeprowadzone badania wskazały na możliwość wykorzystania NMT metodą GPS (według zastosowanego programu obserwacji) jako bazy danych wysokościowych dla terenów, gdzie wystarczające jest cięcie warstwowe 1 m i większe. Terenami, dla których metody GPS mogą być w tym zakresie najbardziej przydatne, są tereny zabagnione, gdzie trudno jest wykonywać klasyczne pomiary geodezyjne ze względu na niestabilność podłoża.

Rozwój metody GPS – szybkie i dokładne pomiary w czasie rzeczywistym – przyczyni się do jej popularyzacji i coraz szerszego wykorzystania dla inżynierii środowiska. Ważnym momentem tego rozwoju będzie zastosowanie stacji pomiarowych stanowiących integrację odbiornika GPS z tachimetrem elektronicznym, tworzących uniwersalne narzędzie pomiarowe łączące technologie naziemne i satelitarne.

Z uwagi na problem poprawności wyboru w terenie punktów NMT może być celowe zastosowanie do pomiaru GPS metody „elektronicznego stolika” (Wysocki 1998c) pozwalającej na opracowanie NMT oraz linii warstwowych „in situ”.

Współrzędne punktów GPS zapisane w postaci numerycznej, pozwalają na szybkie włączenie wyznaczonych punktów NMT do systemów informacji przestrzennej (SIT – GIS).

## Literatura

- CACON S. 1995a: *GPS measurements used in the ground deformation monitoring system for open pit mining*. Proc. of 1th Int., Symp. FIG. Cape Town.
- CACON S. 1995b: *System pomiarów geodezyjnych na terenie Wola Zytowska*, Węgiel Brunatny, z. 2.
- CACON S. 1998: *Ocena możliwości zastosowania kinematycznych metod satelitarnych DGPS i RTK w górnictwie odkrywkowym*. Mat. konf. PAN, Polit. Wrocławska, Szklarska Poręba.
- CZARNECKI K. 1997: *Geodezja współczesna w zarysie*. Wydaw. Wiedza i Życie, Warszawa.
- OSZCZAK S. 1993: *Technologia GPS w praktyce geodezyjnej*. Przegl. Geodez. 7.
- ŚLEDZIŃSKI J. 1990: *System GPS. Założenia systemu. Metody pomiarów*. Konferencja szkoleniowa „Technologie Pomiarowe GPS”.
- WYSOCKI J. 1981: *Comparative analysis of chosen methods of testing contour lines*. Ann. Wars. Agrricult. Univ. SGGW, Land Reclam. 19.
- WYSOCKI J. 1987: *Problemy dokładności nowoczesnych technik opracowania wielkoskalowych map warstwicznych pod kątem potrzeb wodnomelioracyjnych*. Wyd. SGGW.
- WYSOCKI J. 1997: *O metodach aproksymacji powierzchni terenu w opracowaniach warstwicznych metodami komputerowymi*. Przegl. Geodez. nr 4.
- WYSOCKI J. 1998a: *Numeryczny model terenu jako baza danych dla przestrzennego urządzenia zlewni i potrzeb konstrukcji inżynierskich*. Mat. Konf. PAN, SGGW, Warszawa.
- WYSOCKI J. 1998b: *O numerycznym modelu terenu jako bazie danych przestrzennych dla potrzeb inżynierii środowiska*. Mat. Konf. PAN, Pol. Wrocł., Szklarska Poręba.
- WYSOCKI J. 1998c: *Koncepcja metody elektronicznego stolika dla tworzenia in situ numerycznego modelu terenu oraz map warstwicznych*. Prz. Naukowy WMiŚ, z. 14.
- WYSOCKI J., KARASZKIEWICZ W. 1998: *The possibilities of the application of digital terrain model by the GPS method for environmental engineering*. Ann. Agricult. Univ. SGGW, Land Reclam. (w druku).

## Summary

**GPS methods and possibilities of their application for creation of the digital terrain model (DTM) for environmental engineering.** In the paper are presented investigations of the accuracy of the measurement DTM points, performed by cheaper GPS receivers and the chose procedure of the measurements. The performed investigations pointed the possibilities of the application of the DTM points by the GPS method for environmental engineering.

### Author's address:

J. Wysocki  
Warsaw Agricultural University – SGGW  
02–787 Warszawa  
ul. Nowoursynowska 166  
Poland