

Jarosław Bosy*

Precyzyjne opracowanie obserwacji GPS w sieciach lokalnych nawiązanych do stacji permanentnych EPN/IGS

1. Wprowadzenie

W lokalnych sieciach GPS mamy do czynienia najczęściej z pomiarami okresowymi wykonywanymi niejednorodnym sprzętem. Dodatkowo występuje tutaj duże różnicowanie wielkości sieci, przestrzennego ukształtowania terenu, stopnia jego zurbanizowania i warunków geologicznych [7]. Materiał obserwacyjny, jaki podlega opracowaniu, jest zatem niejednorodny i w celu osiągnięcia dokładności milimetrowych dla składowych poziomych i pionowej wymaga zastosowania dedykowanej strategii opracowania wyników. W sieciach lokalnych nie można stosować strategii realizowanych w sieciach o charakterze zarówno globalnym, jak i regionalnym, gdzie są opracowywane obserwacje ze stacji permanentnych, wyposażonych w odbiorniki dwuczęstotliwościowe z kodem P oraz najczęściej w anteny odbiorcze typu Dorne Margolin T [5].

Nawiązanie sieci lokalnej do sieci stacji permanentnych pracujących w ramach EUREF Permanent Network (EPN) i/lub International GNSS Service (IGS) jest konieczne. Stacje te bowiem służą między innymi do realizacji ziemskiego układu odniesienia, wyznaczania precyzyjnych orbit satelitów GPS, modeli jonosfery oraz parametrów troposfery. Wykorzystanie wyników opracowania tych sieci daje w pierwszej kolejności możliwość realizacji układu odniesienia w sieci lokalnej zgodnego z ziemskim układem odniesienia (np. jako zagęszczenie w układzie ITRF). Dostępne w interwałach 2-godzinnych globalne i regionalne mapy jonosfery pozwalają na lepsze wyznaczenie nieoznaczoności w procesie opracowania fazowych obserwacji różnicowych. Wyznaczone dla stacji EPN/IGS opóźnienie troposferyczne w kierunku zenitu (TZD) w interwałach godzinnych daje możliwość kalibracji i kontroli wyznaczeń opóźnienia troposferycznego dla punktów sieci lokalnej.

* Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy, Wrocław

W procesie opracowania wykorzystywane są także orbity precyzyjne dostępne dla satelitów GNSS. Wykorzystanie powyższych rezultatów pozwala na podniesienie dokładności estymowanych parametrów na etapie opracowania sieci lokalnej.

W pracy przedstawiono koncepcję opracowania sieci lokalnych GPS w nawiązaniu do stacji permanentnych IGS/EPN wraz z przykładami. Do opracowania obserwacji GPS wykorzystano oprogramowanie Bernese GNSS Software [11, 12].

2. Nawiązanie sieci lokalnych do sieci stacji permanentnych EPN/IGS

Do nawiązania sieci lokalnych GPS wykorzystuje się tylko stacje permanentne GNSS, na których obserwacje są prowadzone minimum dwa lata. Dla takich bowiem szeregów czasowych wyznaczane są prędkości zmian współrzędnych w IGS i EPN. Na rysunku 1 pokazano stacje permanentne GNSS (stan na wrzesień 2006 roku) leżące w bezpośrednim sąsiedztwie sieci lokalnych GPS wykorzystywanych

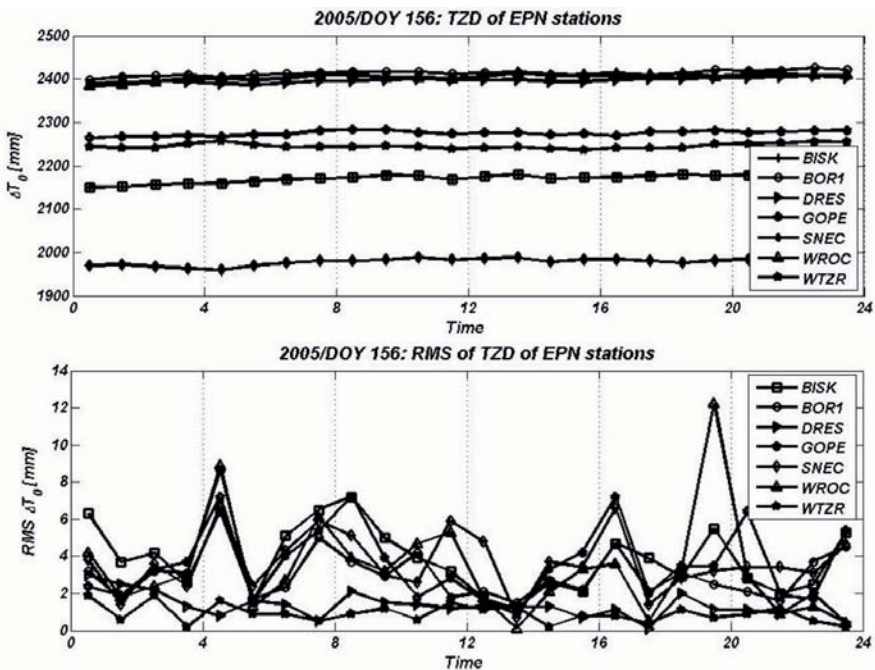


Rys. 1. Stacje permanentne EPN leżące w bezpośrednim sąsiedztwie sieci lokalnych

w pracach badawczych Instytutu Geodezji i Geoinformatyki (IGiG) Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.

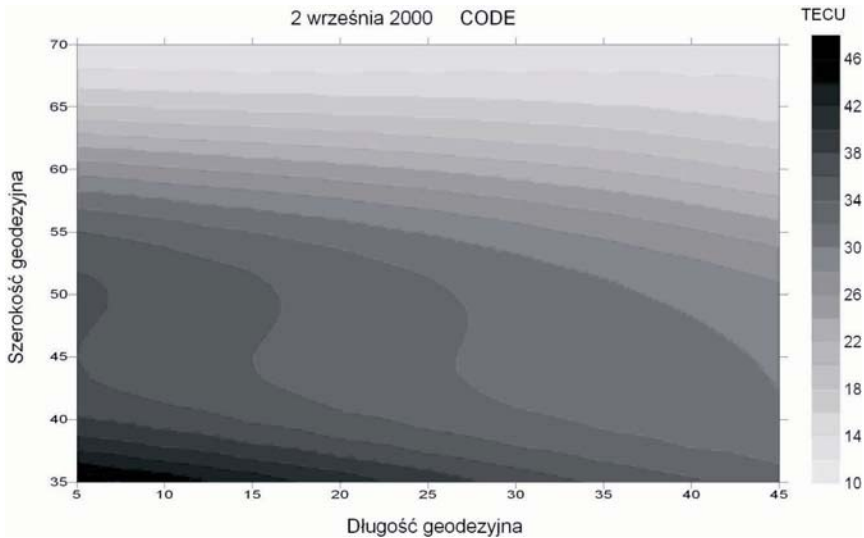
Większość przedstawionych na rysunku 1 stacji spełnia powyższy warunek, a stacje takie jak WTZR, BOR1, GOPE, BOGO, JOZE, PENC i WROC mają już 10-letnie szeregi obserwacyjne. Stacje SNEC i BISK leżące bezpośrednio na obszarze objętym sieciami lokalnymi GPS IGiG mają już prawie dwuletnie szeregi obserwacyjne w ramach EPN i dodatkowo ponad roczne obserwacje z okresu poprzedzającego.

Dla stacji permanentnych EPN/IGS wyznacza się wartości opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu (TZD) wraz z charakterystyką dokładnościową. Na rysunku 2 przedstawiono wartości TZD i ich błędy średnie dla wybranych stacji EPN w na dzień 5.06.2005 roku (156 DOY).



Rys. 2. Wartości opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu TZD i ich błędy średnie dla wybranych stacji EPN na dzień 5.06.2005 roku (156 DOY)

Wartości opóźnienia troposferycznego TZD mogą być wykorzystane w procesie opracowania obserwacji satelitarnych GPS do kalibracji lub kontroli wyznaczeń opóźnienia na punktach sieci lokalnej GPS [7].



Rys. 3. Model stanu jonosfery GIM opracowany w centrum analiz CODE dla obszaru Europy z godz. 12:00 z dnia 2 września 2000 roku

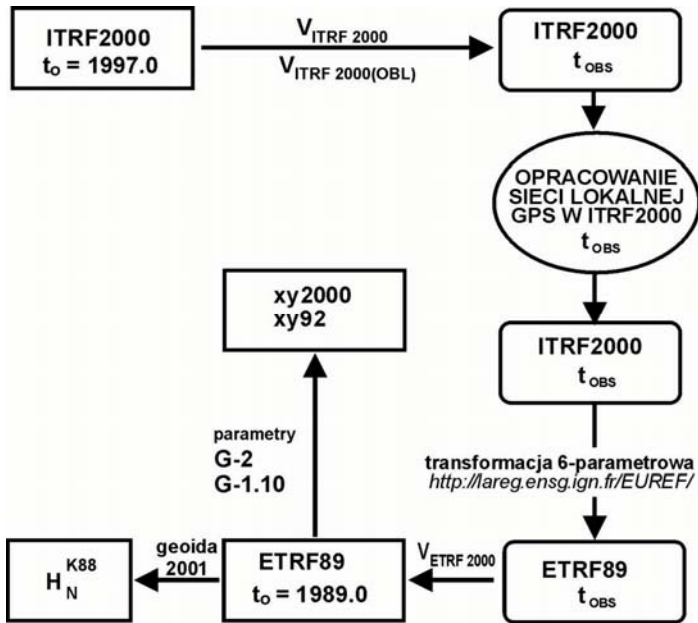
Jednym z rezultatów rozwiązania sieci globalnej IGS jest globalny model (mapy) stanu jonosfery (GIM) wykonany w interwałach 2-godzinnych w formacie IONEX lub formacie wewnętrznym programu Bernese GNSS Software. Przekładem takiego modelu są mapy GIM tworzone przez centrum analiz sieci IGS CODE w Bernie w Szwajcarii (rys. 3).

W centrach analiz subsieci EPN są opracowywane modele regionalne. Dla obszaru Europy taki model WUTE jest opracowywany w centrum analiz EPN Politechniki Warszawskiej. W procesie opracowania sieci lokalnych GPS wykorzystuje się je do opracowania modeli lokalnych i na etapie rozwiązywania nieoznaczoności, poprawiając znacząco wyniki [6, 7].

Do precyzyjnych opracowań sieci lokalnych GPS są stosowane orbity precyzyjne w formacie SP3, dla których pozycje satelitów wyznaczane są z dokładnością ± 5 cm.

3. Metodologia opracowania sieci lokalnych GPS

Opracowanie sieci lokalnej GPS realizowane jest w układzie globalnym ITRF, aktualnie ITRF2000 [1]. Wynikowe współrzędne można transformować do układu państwowego ETRF89, a następnie do układów kartograficznych 1992, 2000 i systemu wysokości normalnych Kronsztadt 86 zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 4.

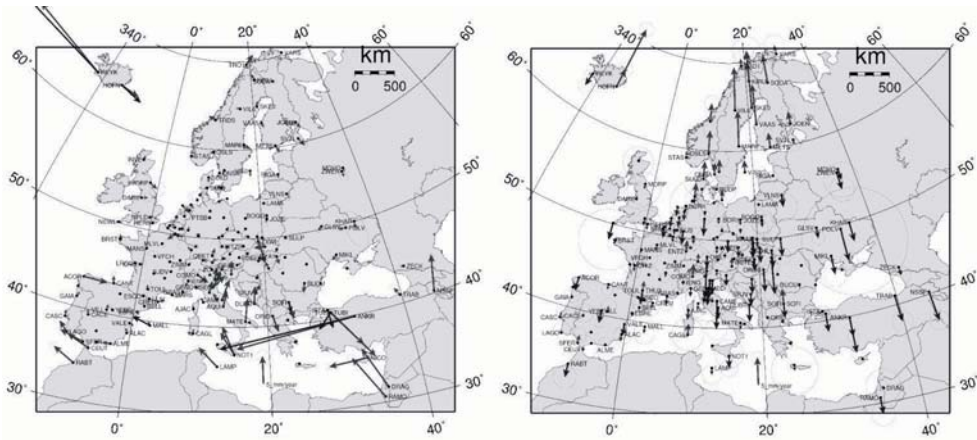


Rys. 4. Schemat realizacji układu odniesienia w procesie opracowania sieci lokalnej GPS

Opracowanie jest realizowane na epokę obserwacji t_{OBS} . Przeliczenie współrzędnych stacji nawiązania z epoki $t_0 = 1997,0$ na epokę obserwacji t_{OBS} w układzie ITRF2000 można wykonać na podstawie danych prędkości stacji lub estymowanych na podstawie analiz szeregów czasowych zmian współrzędnych [4, 13]. Takie opracowanie sieci lokalnej pozwala także na pełną realizację państwowego systemu odniesień przestrzennych zgodnie z rozporządzeniem Rady Ministrów z dnia 8 sierpnia 2000 r. (Dz. U. z dnia 24 sierpnia 2000 r. poz. 821). Realizacja systemu ETRS89 jaką jest układ ETRF89 zakłada sztywność płyty europejskiej ($V_{ETRF} = 0$). Analizy szeregów czasowych rozwiązań tygodniowych sieci EPN [4, 13, 14] wykazały, że wartości prędkości $V_{ETRF} \neq 0$ zarówno w przypadku składowej poziomej, jak i wysokościowej (rys. 5).

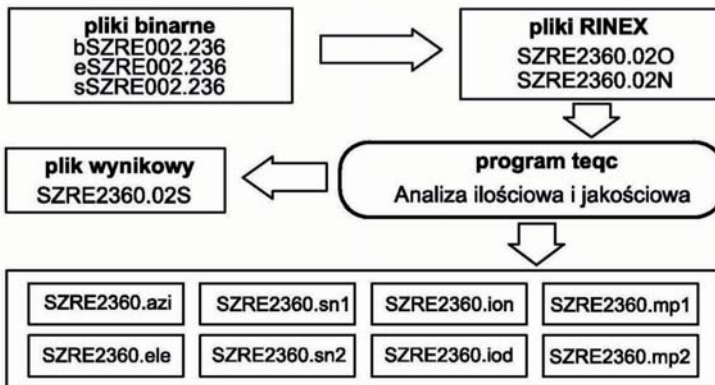
W badaniach geodynamicznych, w których stosuje się obserwacje satelitarne powinno się zatem wykorzystywać te prędkości dla wyznaczania parametrów kinematycznych (prędkości) punktów sieci lokalnych GPS.

Procedura opracowania obserwacji GPS w sieciach lokalnych powinna być poprzedzona analizą ilościowo-jakościową materiału obserwacyjnego. Na rysunku 6 przedstawiono schemat tej analizy [5, 7] z wykorzystaniem programu *teqc* UNAVCO Inc. [10].



Rys. 5. Wektory prędkości (wewnątrzpłytkowe: ITRF2000–NUVEL–1A–NNR) stacji EPN dla składowej poziomej i wysokościowej [13]

W wyniku wstępnej analizy danych programem *teqc* otrzymujemy pliki wynikowe z informacjami dotyczącymi: obserwowanych satelitów (pliki *.azi i *.ele), jakości sygnału (pliki *.sn1, *.sn2), błędu wielotorowości (pliki *.mp1, *.mp2), opóźnienia jonosferycznego (pliki *.iod i *.ion).



Rys. 6. Schemat kontroli ilościowej i jakościowej obserwacji GPS z wykorzystaniem programu *teqc* UNAVCO Inc. [10]

Ważnym elementem analiz na tym etapie jest także weryfikacja sprzętu pomiarowego, szczególnie anten odbiorczych. W przypadku precyzyjnych opracowań wy-

konywanych programem Bernese GNSS Software zaleca się stosowanie jednolitych modeli zmian położenia centrum fazowego anteny odbiorczej jako funkcji azymutu i wysokości satelity nad horyzontem. Dla wersji 4.2 stosuje się modele względne IGS/NGS, natomiast wersja 5.0 pozwala na zastosowanie modeli bezwzględnych zarówno anten nadawczych i odbiorczych dostępnych w formacie ANTEX (aktualnie wersja 1.3 <ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/igs05.atx>).

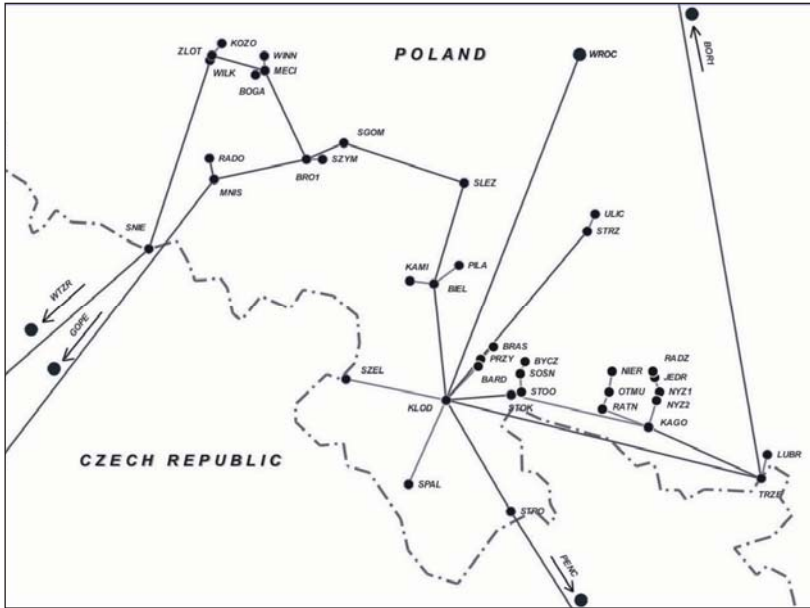
Wyniki powyższych analiz ilościowo-jakościowych stanowią podstawę do konstrukcji geometrycznej sieci lokalnej GPS (układu wektorów niezależnych). Dla sieci lokalnych GPS zaproponowano metodę wyboru niezależnych wektorów, bazującą na metodzie SHORTEST [11, 12], uwzględniającą niejednorodność materiału obserwacyjnego, nazwaną USER-DEF [5, 7] i składającą się z następujących etapów:

- ETAP I. Wybierane są punkty **grupa 1**, na których obserwacje są pełne (C/A, L1, P1, L2 i P2). Pozostałe punkty stanowią **grupe 3**. Z **grupy 1** są także przenoszone do **grupy 3** punkty, na których następowała zmiana anteny odbiorczej lub obserwacje charakteryzują zróżnicowaną jakością (np. błędem wielotorowości) w poszczególnych kampaniach pomiarowych. Z grupy 1 wybierane są także punkty, dla których liczba obserwacji jest mniejsza niż 60% średniej liczby obserwacji obliczonych dla wszystkich punktów. Punkty te są przenoszone do grupy 2. W oparciu o pozostałe punkty **grupy 1** tworzona jest sieć wektorów niezależnych metodą SHORTEST i zapisywana w pliku BASELINE.
- ETAP II. Punkty z **grupy 2** dołączane są do punktów **grupy 1** metodą SHORTEST; plik BASELINE zostaje uzupełniony o kolejne niezależne wektory.
- ETAP III. Punkty z **grupy 3** dołączane są do punktów **grupy 1** metodą SHORTEST; plik BASELINE zostaje uzupełniony o kolejne niezależne wektory, których końcowa liczba jest o jeden mniejsza niż liczba punktów sieci.

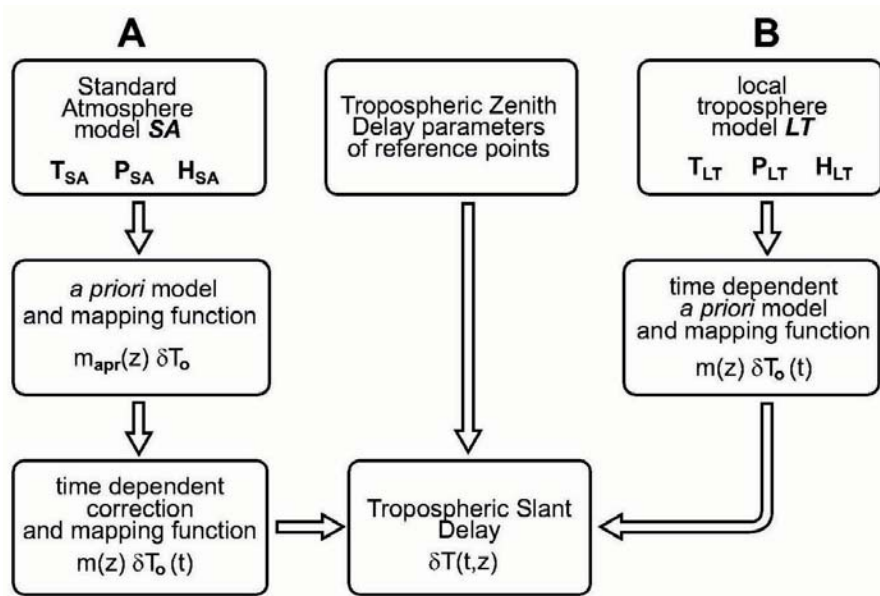
Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe konfiguracje niezależnych wektorów opracowane metodą USER-DEF dla sieci GEOSUD [8, 9].

W procesie precyzyjnego opracowania obserwacji GPS w sieciach lokalnych istotnym etapem jest wyznaczenie opóźnienia troposferycznego, szczególnie ma to znaczenie w przypadku sieci położonych w terenach górskich. Na rysunku 8 przedstawiono schematycznie procedurę estymacji opóźnienia troposferycznego [7].

Przedstawiona na schemacie (rys. 8) procedura A bazuje na modelu atmosfery standardowej SA i jest ona stosowana w opracowaniu sieci stacji permanentnych. Podstawą estymacji opóźnienia troposferycznego w procedurze B jest model lokalnej troposfery LT [3, 7].



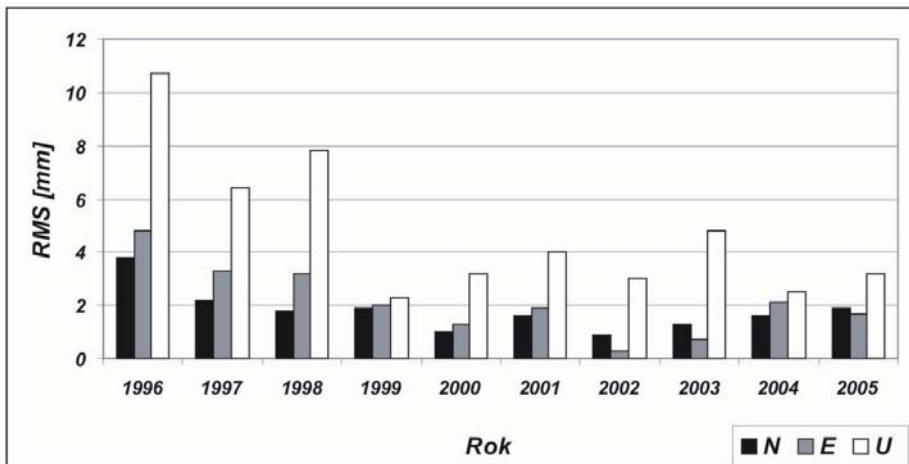
Rys. 7. Przykładowe konfiguracje sieci niezależnych wektorów opracowane metodą USER-DEF dla sieci GEOSUD [8, 9]



Rys. 8. Procedura estymacji opóźnienia troposferycznego w sieci lokalnej GPS

Zastosowanie procedury A do wyznaczenia opóźnienia troposferycznego w przypadku sieci lokalnej daje dokładności wyznaczenia opóźnienia w kierunku zenitu TZD na poziomie 10 mm, szczególnie w terenach górskich, procedura B podnosi tę dokładność do poziomu 2–4 mm [7]. Przeliczenie wartości opóźnienia troposferycznego z kierunku zenitu na kierunek do satelity zarówno dla procedury A, jak i B odbywa się z wykorzystaniem funkcji Niella [16] stanowiącej standardowe podejście. Analizy stosowania różnych funkcji odwzorowujących przedstawiono między innymi w pracach [7, 15]. W ostatnim okresie zaczyna się stosować funkcje odwzorowujące oparte o nowsze modele prognozy pogody. Takim przykładem są funkcje odwzorowujące opracowane na Uniwersytecie Technicznym w Wiedniu Vienna Mapping Functions (VMF1) bazujące na numerycznym modelu pogody ECMWF [2].

Na rysunku 9 przedstawiono charakterystykę dokładnościową wyznaczonych współrzędnych punktów w sieciach lokalnych GPS na przykładzie sieci GEOSUD w okresie od 1996 do 2005 roku [8]. Dokładność charakteryzują błędy średnie wyznaczane na podstawie pomiarów powtarzalnych w ramach kampanii pomiarowej w danym roku.



Rys. 9. Dokładność wyznaczanych współrzędnych punktów sieci GEOSUD w okresie 1996–2005 [8]

Dokładność wyznaczonych składowych poziomych począwszy od roku 1999 można określić na poziomie 2 mm dla składowych poziomych i 4 mm dla składowej wysokościowej. Opracowania sieci lokalnych GPS przeprowadzone z wykorzystaniem powyższej metodyki pozwoliły także na uzyskanie tej dokładności w sieciach zlokalizowanych w terenach górskich [7].

7. Podsumowanie

Zaprezentowana w pracy metodyka precyzyjnego opracowania obserwacji satelitarnych GPS w sieciach lokalnych optymalizuje proces opracowania ze względu na niejednorodny materiał obserwacyjny. Pozwala na wyznaczanie współrzędnych punktów, szczególnie wysokości z dokładnością na poziomie milimetrów porównywalną z dokładnościami osiąganymi w sieci stacji permanentnych GPS: globalnych IGS i regionalnych EPN.

Literatura

- [1] Altamimi Z., Sillard P. and Boucher C.: *ITRF2000: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications*. Journal of Geophysical Research 107(B10), 2214. doi:10.1029/2001JB000561, 2002.
- [2] Boehm, J., Werl B., and Schuh H.: *Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data*. J. Geophys. Res., 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629, 2006.
- [3] Borkowski A., Bosy J. and Kontny B.: *Meteorological data and determination of heights in local GPS networks – preliminary results*. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Geodesy and Cartography 5 (2) 2002. URL: www.ejpau.media.pl.
- [4] Borkowski A., Bosy J. and Kontny B.: *Time series analysis of EPN stations as a criterion of choice of reference stations for local geodynamic networks*. Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy 38 (1), pp. 15–28, 2003.
- [5] Bosy J. i Figurski M. (red.): *Problematyka opracowania obserwacji satelitarnych GPS w precyzyjnych sieciach lokalnych*. Wydawnictwa Akademii Rolniczej we Wrocławiu 2003.
- [6] Bosy J., Figurski M. and Wielgosz P.: *A strategy for GPS data processing in a precise local network during high solar activity*. GPS Solutions 7 (2), pp. 120–129, 2003.
- [7] Bosy J.: *Precyzyjne opracowanie obserwacji satelitarnych GPS w lokalnych sieciach położonych w terenach górskich*. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Nr 522, Seria Rozprawy CCXXXIV, p. 155, 2005.
- [8] Bosy J., Kontny B. and Cacon S.: *The earth crust surface movements in SW Poland from GPS and leveling data*. Reports On Geodesy, Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy 2006 (w druku).
- [9] Cacon S., Dyjor S.: *Project Of Geodynamic Investigations Development In The Sudeten And Adjacent Areas*. Reports On Geodesy No. 7 (53), Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, pp. 132–140, 2000.

-
- [10] Estey L. H. and Meertens C. M. TEQC.: *The Multi0Propose Toolkit for GPS/GLONASS Data*. GPS Solutions 3 (1), pp. 42–49, 1999.
- [11] Hugentobler U., Sacher S. and Fridez P. (Eds): *Bernese GPS Software version 4.2*. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland 2001.
- [12] Hugentobler U., Dach R. and Fridez P. (Eds): *Bernese GPS Software version 5.0 DRAFT*. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland 2005.
- [13] Kenyeres A. And Bruyninx C.: *EPN coordinate time series monitoring for reference frame maintenance*. GPS Solutions 8 (4), pp. 200–209, 2004.
- [14] Kontny B., Bosy J., Borkowski A.: *Correlation between EPN station velocities and the tectonic of Europe*. Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy, Vol. 39, No. 2, pp. 155–164, 2004.
- [15] Mendes V. B.: *Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques*. PhD thesis. Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 199, University of New Brunswick. Fredericton, New Brunswick, Canada 1999.
- [16] Niell A. E.: *Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths*. Journal of Geophysical Research 101 (B2), pp. 3227–3246, 1996.