

Mariusz Figurski*, Marcin Gałuszkiewicz*, Paweł Kamiński*

Monitorowanie polskiej sieci stacji referencyjnych GPS

1. Wstęp

W związku z dynamicznym rozwojem stacji permanentnych GNSS na terenie Polski wraca problem kontroli pracy stacji oraz realizacji sytemu ETRS'89. Od kilku lat są w obiegu współrzędne polskich stacji permanentnych GNSS, których źródło pochodzenia nie jest znane. Jedną z możliwości rozwiązania tego problemu jest koncepcja systemu monitorowania stacji permanentnych zgodnie ze standardami przyjętymi w EPN. W artykule zawarta została koncepcję takiego rozwiązania oraz wyniki obliczeń, które wykonano w 2006 r. W analizie wyników przedstawiono porównania współrzędnych z wynikami uzyskanymi w systemie ASG-PL.

2. Krótka historia stacji permanentnych GPS w Polsce

W Polsce pierwsza stacja referencyjna GPS została uruchomiona w sierpniu 1993 roku w Obserwatorium Astronomiczno Geodynamicznym Politechniki Warszawskiej. Stacja została od samego początku włączona do sieci IGS (*International GNSS Service*). Drugą w kolejności była stacja Centrum Badań Kosmicznych która powstała w Borowcu koło Poznania (styczeń 1994). Jako trzecią uruchomiono w grudniu 1994 roku stację Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Lamkówwu koło Olsztyna. Pełna lista polskich stacji permanentnych z ich krótką charakterystyką znajduje się w tabeli 1, a ich rozmieszczenie na terenie Polski przedstawiono na rysunku 1.

Idęalem byloby, gdyby uruchomione stacje pracowały nieprzerwanie bez konieczności wymiany odbiorników lub anten. Sytuacja taka w obecnych czasach jest jeszcze nieosięgalna, na większości stacji zdarzały się wypadki, np. zniszczenie anteny i odbiornika przez wyładowanie atmosferyczne we Wrocławiu lub wymiana odbiornika na nowszy model.

* Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

Tabela 1. Stacje permanentne na terenie Polski, które planowano wykorzystać w systemie POL_EPN

Stacja		Kod stacji *	Data uruchomienia	Punkt sieci **	Obserwacje	POL_EPN tak/nie
Józefosław	JOZE	12204M001	03.08.1993	IGS, EPN, ASG-PL	D/H	tak
Borowiec ***	BOR1	12205M002	10.01.1994	IGS, EPN, ASG-PL	D/H	tak
Lamkówko	LAMA	12209M001	01.12.1994	IGS, EPN,	D/H	tak
Borowa Góra	BOGI	12207M003	03.01.2001	IGS, EPN, ASG-PL	D/H	tak
Borowa Góra	BOGO	12207M002	08.06.1996	EPN, ASG-PL	D/H	tak
Józefosław	JOZ2	12204M002	03.01.2002	IGS, EPN,	D/H	tak
Józefosław	JOZ3			ASG-PL		tak
Katowice	KATO	12219S001	30.01.2003**** 11.2002*****	EPN, ASG-PL	D/H	tak
Kraków	KRAW	12218M001	01.01.2003	EPN, ASG-PL	D/H	tak
Wrocław	WROC	12217M001	28.11.1996	IGS, EPN, ASG-PL	D/H	tak
Żywiec	ZYWI	12220S001	30.01.2003**** 11.2002*****	EPN, ASG-PL	D/H	tak
CBK-Warszawa	CBKA			ASG-PL	D/H	nie
Elbląg	ELBL		01.2005	ASG-PL	D/H	tak
Gdańsk	GDAN		1998–2000	ASG-PL	D/H	
Kłobuck	KLOB		11.2002	ASG-PL	D/H	tak
Bełchatów	KWBB	nieaktywna		ASG-PL		nie
Lamkówko	LAM6			ASG-PL	D/H	tak
Lelów	LELO		11.2002	ASG-PL	D/H	tak
Poznań	POZN			ASG-PL	D/H	tak
Nowy Sącz	SACZ	nieaktywna		ASG-PL		nie
Tarnowskie Góry	TARG		11.2002	ASG-PL	D/H	tak
Toruń	TORU		1998 05.20042*****	ASG-PL	D/H	tak
Wodzisław	WODZ		11.2002	ASG-PL	D/H	tak
WAT-Warszawa	WAT1		2006		D/H	tak
Leica-Warszawa	LGPL		2006		D/H	tak

* dotyczy tylko stacji IGS i EPN

** dotyczy tylko sieci IGS, EPN lub ASG-PL

*** punkt nawiązania sieci EPN

**** punkt w sieci EPN

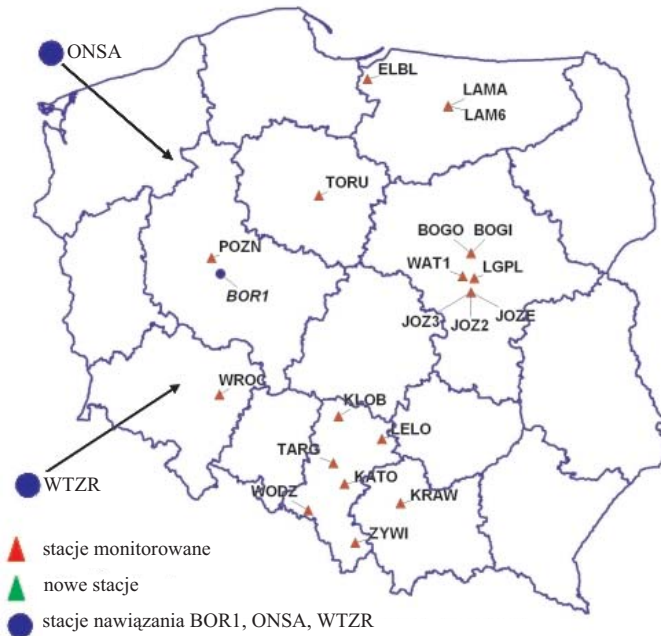
***** punkt w sieci ASG-PL

D – obserwacje dobowe,

G – obserwacje godzinne

Uwagi: GDAN – stacja w nie pracuje w sposób ciągły, w roku 2006 dane są dostępne tylko z ok. 33 dni

Jedyną stacją, która pracuje nieprzerwanie na tym samym zestawie odbiornik – antena jest Józefosław, najstarsza polska stacja permanentna.



Rys. 1. Mapa rozmieszczenia stacji referencyjnych włączonych do systemu POL_EPN

Praktycznie wszystkie stacje permanentne wykonują obserwacje w jednym lub kilku serwisach pomiarowych (np. IGS, EPN, ASG-PL itp.). Ponad dziesięcioletnia praca kilku z wymienionych stacji pozwoliła na dokładne oszacowanie ich prędkości w układzie odniesienia ITRF. Z praktycznego punktu widzenia stosowanie w geodezji układów kinematycznych (takim jest układ ITRF) jest problematyczne, dlatego dla Europy został wprowadzony układ ETRF, którego zastosowanie ograniczono do platformy euroazjatyckiej [2]. Część z polskich stacji permanentnych ma wyznaczone współrzędne również w układzie ETRF.

Z zebranych informacji wynika, że w dniu dzisiejszym w Polsce pracuje 25 stacji, z czego 10 stacji jest włączonych do sieci IGS i EPN. Tylko te ostatnie mają wyznaczone dokładnie współrzędne w układzie ITRF i ETRF [2]. Wartości współrzędnych stacji referencyjnych wchodzących do sieci ASG-PL zostały opublikowane dopiero po 3 latach pracy systemu [9]. Niestety wykaz współrzędnych dołączony do wspomnianego dokumentu zawiera tylko część stacji permanentnych na terenie Polski, która została opracowana przez centrum ASG-PL w Katowicach.

Następny problem związany z wykorzystaniem stacji permanentnych, który pojawił się w ostatnich latach w Polsce, dotyczy stacji referencyjnych zarządzanych przez firmy prywatne. Źródła pochodzenia współrzędnych tych stacji oraz metody nawiązania do układu ITRF lub ETRF w większości przypadków są nieznane. Szereg nowo powstających stacji referencyjnych jest nawiązywana do sieci POLREF, której dokładność zgodnie z ostatnimi badaniami została podważona. Prowadzi to wszystko do tego, że zamiast jednolitego układu współrzędnych, który mógłby być realizowany przez sieć stacji permanentnych na terenie Polski, mamy wielki chaos.

Pewnym rozwiązaniem tego problemu jest system monitorowania sieci stacji permanentnych na terenie Polski (POL_EPN), który został opracowany w Centrum Geomatyki Stosowanej Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej.

2. Koncepcja systemu monitorowania

Budowa każdego systemu wymaga pokonania szeregu problemów natury merytorycznej, ale również logistycznej. W tym konkretnym przypadku problemy logistyczne okazały się kilkukrotnie większe od merytorycznych. Podstawowym problemem było pozyskanie obserwacji ze stacji permanentnych, które są zarządzane przez różne instytucje. Procedury uzyskania dostępu do danych z różnych względów trwały kilka miesięcy.

W projekcie założono wykorzystanie obserwacji dobowych z czasem akwizycji 5 s. Taki standard jest kreowany przez sieć ASG-PL, ale również będzie przyjęty w sieci ASG-EUPOS [8]. Natomiast stacje pracujące tylko w sieci IGS i EPN archiwizują obserwacje z czasem akwizycji 30 s. Dlatego w pierwszej fazie projektu przyjęto jako podstawowy 30-sekundowy interwał opracowania obserwacji.

Celem ujednoczenia metodyki opracowania danych przyjęto standardy obliczeń opracowane w EPN [3]. Wybrana droga opracowania ma dwójaki rodzaj zalety. Z jednej strony wykorzystuje się sprawdzoną strategię opracowania, z drugiej istnieje możliwość porównania wyników z wynikami opracowania sieci EPN.

Głównym narzędziem analitycznym w systemie monitorowania polskich stacji permanentnych jest program Bernese 5.0, który został uruchomiony na 64-bitowym klastrze komputerowym FENIX. Na uwagę zasługuje fakt, że jest to pierwsza i jak do tej pory jedyna instalacja programu Bernese 5.0 na platformie IA-64. Proces obliczeniowy, w którym są wykorzystywane dobowe obserwacje z ok. 25 stacji permanentnych zajmuje zaledwie 4 minuty czasu pracy komputera.

System jest zasilany podobnym zestawem danych początkowych i brzegowych, jak w sieci EPN. Dotyczy to również stacji nawiązania, którymi są Onsala (ONSA), Borowiec (BOR1) i Wettzel (WTZR). Taki sam zestaw stacji nawiązania jest stosowa-

ny do opracowaniu części sieci EPN w lokalnym centrum analiz EPN Politechniki Warszawskiej (WUT LAC EPN).

Założono, że system powinien spełniać dwie podstawowe funkcje:

- 1) ujednoczenia opracowania obserwacji i jednolitego wyrównania oraz transformacji do układu ETRF,
- 2) monitorowania pracy stacji i oceny stabilności rozwiązań.

Z uwagi na powyższe funkcje do opracowania należy użyć różnych typów efermeryd precyzyjnych i parametrów ruchu obrotowego Ziemi, co prowadzi do trzech poziomów monitorowania.

Pierwszy wykorzystuje ostateczne orbity i parametry ruchu obrotowego (*final*) IGS. Z uwagi na opóźnienie dochodzące nawet do 10 dni od momentu wykonania obserwacji jest przeznaczony do zagadnień związanych z konserwacją układu odniesienia ETRF na terenie Polski.

Poziom drugi służy do monitorowania pracy stacji referencyjnych i można go praktycznie realizować – w zależności od szybkości uzyskania wyników obliczeń – na trzy sposoby, wykorzystując:

- 1) „szybkie” efermerydy i parametry ruchu obrotowego IGS (*Rapid IGS*) oraz obserwacje dobowe pozwalają na monitorowanie sieci stacji z opóźnieniem max. 18 godzin;
- 2) „ultraszybkie” efermerydy i parametry ruchu obrotowego IGS (*Ultra Rapid IGS*) oraz obserwacje dobowe pozwalają na monitorowanie sieci stacji z opóźnieniem max. 3 godzin;
- 3) „ultraszybkie” efermerydy i parametry ruchu obrotowego IGS (*Ultra Rapid IGS*) oraz obserwacje godzinne pozwalają na monitorowanie sieci stacji z opóźnieniem max. 20 minut.

Obecnie system monitorowania pracuje operacyjnie na poziomie 1, które jest podobne do opracowania WUT EPN oraz poziomie 2 z wykorzystaniem efermeryd „ultra rapid IGS” i obserwacji dobowych GPS.

2.1. Parametry brzegowe i modele wykorzystane w obliczeniach

System obliczeniowy jest zasilany 5 i 30 sekundowymi obserwacjami „fazowymi” GPS, obserwacje „kodowe” używane są tylko do synchronizacji zegarów odbiorników GPS. Przyjęto minimalną wysokość śledzenia satelitów, równą 10 σ z wagowaniem obserwacji w funkcji wysokości obserwowanych satelitów. W procesie modelowania parametrów zakłócających i przetwarzaniu numerycznym wykorzystuje się głównie kombinację liniową L_3 (*iono-free*) podwójnych różnic obserwacji fazowych. Nieoznaczoności fazy wyznaczone są metodą QIF, która zalecana jest dla odbiorników dwuczęstotliwościowych z możliwością śledzenia

kodu i odtwarzania pełnego cyklu fazy fali nośnej na obydwu częstotliwościach pracy systemu GPS. Metoda QIF bazuje na analizie residuów kombinacji L_4 i szacowaniu krótkookresowych parametrów jonosfery w ujęciu stochastycznym [5, 7]. Metoda nie wymaga wykorzystania obserwacji kodowych, jednak jest bardzo czuła na zmiany zachodzące w jonosferze, dlatego należy ją wspomagać modelem jonosfery [6, 7]. Obecnie dostępne są dwa modele jonosfery, które można implementować w prezentowanym rozwiązaniu. W systemie POL_EPN wykorzystywane są: model typu rapid z predykcją na 24 godziny z centrum CODE oraz model rapid MUT opracowany w WAT [4, 6].

Refrakcja troposferyczna jest modelowana bez przyjętego *a priori* modelu, niezależnie dla części suchej i mokrej z wykorzystaniem empirycznej funkcji odwzorowującej Neill [6]. Parametry całkowitego opóźnienia odniesionego do kierunku zenitu, są wyznaczone w interwałach godzinnych bez uwzględnienia asymetrii azymutalnej.

W obliczeniach są wykorzystywane ponadto modele:

- wariacji centrum fazowego anten odbiorników i satelitów GPS – **PHAS_IGS.01** – model względny,
- pływów oceanicznych – **FES2004**.

We wstępnej analizie poprawności i kompletności obserwacji nieróżnicowych zakłada się, że odrzucenie stacji z obliczeń następuje, jeśli zostanie stwierdzone ponad 50% błędnych obserwacji zapisanych w formacie RINEX.

Sprawdzeniu podlegają również różnicowe obserwacje fazowe, jeśli analizowane residua są większe od 0,02 m, dany wektor zostaje wyeliminowany z obliczeń, a cały proces budowania sieci wektorów jest powtarzany.

Wynikiem działania systemu są raporty z analizy obserwacji informujące o jakości obserwacji każdej ze stacji permanentnych oraz ich współrzędne, macierze wariancji z wyrównania zapisane w formacie SINEX i parametry troposfery.

4. Analiza wyników pracy systemu POL_EPN

System POL_EPN został uruchomiony operacyjnie testowo w kwietniu 2006 roku, a faza operacyjna w czerwcu 2006 r. W okresie testowania systemu wyeliminowano błędy grube powstałe na skutek niejednorodności danych oraz zmian dokonywanych w zakresie analizy obserwacji. Ostateczną weryfikacją poprawności działania systemu była wykonana analiza porównawcza współrzędnych uzyskanych z poziomu 1 opracowania POL_EPN i EPN. Porównywane współrzędne dwóch analizowanych rozwiązań różnią się na poziomie 2 mm w składowych poziomych i wysokości. Z uwagi na zapewnienie kontroli wykonywanych obliczeń

w fazie operacyjnej, wyniki są na bieżąco porównywane z rozwiązaniami tygodniowymi EPN w układzie ITRF'2000. Do ostatecznej analizy wyników obliczeń wykorzystuje się współrzędne transformowane do układu ETRF. Operacja wymaga wprowadzenia systematycznego przesunięcia układu ITRF względem ETRF, ale bez zmiany skali układu ITRF. Tak sformułowane zadanie jest realizowane jest według następującej zależności [1]

$$\begin{Bmatrix} X_{ETRF89} \\ Y_{ETRF89} \\ Z_{ETRF89} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & 0 & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{Bmatrix} (t_c - 1989,0) \quad (1)$$

Wektor $(T_x, T_y, T_z)^T$ reprezentuje systematyczne przesunięcie początku układu (translacje). Druga część równania reprezentuje zmiany współrzędnych, wywołane ruchem płyty od epoki 1989,0 do epoki obserwacji t_c ; prędkości rotacji przyjmuje się z modelu NNR-NUVEL-1A, poprawione o różnice prędkości pomiędzy ITRF, a NUVEL*. Parametry transformacji pomiędzy ITRF i ETRF są publikowane przez komisję EUREF dla każdej kolejnej realizacji układu ITRF (tab. 2).

Tabela 2. Wartości parametrów transformacji pomiędzy układem *ITRF00* i *ETRF*

ITRF _y	T_x [cm]	T_y [cm]	T_z [cm]	$\dot{\omega}_x$ [mas/y]	$\dot{\omega}_y$ [mas/y]	$\dot{\omega}_z$ [mas/y]
00	5,4	5,1	-4,8	0,081	0,490	-0,792

Aby wyrazić współrzędne w układzie ETRF'89, należy uwzględnić prędkość zmian lokalnych współrzędnych w układzie ETRF zgodnie z zależnością

$$X_{ETRF}(1989,0) = X_{ETRF}(t_c) + V_{ETRF}(1989,0 - t_c) \quad (2)$$

Wektory prędkości dla poszczególnych stacji na terenie Europy Środkowej są niewielkie, a tym samym wyznaczone wartości obarczone są dużym błędem, z wyjątkiem Skandynawii, gdzie zmiany współrzędnych w ETRF są znaczące. Wykonane w ostatnich latach badania w rejonie Skandynawii szacują ruch pionowy do ok. 8 mm/rok. Dlatego wyłączając rejon Skandynawii, można przyjąć w przybliżeniu, że $V_{ETRF} = 0$.

Do wyznaczenia współrzędnych stacji permanentnych w układzie ETRF na terenie Polski wykorzystano wyniki uzyskane w okresie 3 miesięcy działania systemu POL_EPN. Dla wszystkich rozwiązań dobowych wyznaczony *rms* waha się

* Dane można znaleźć w IERS Annual Report

na poziomie 0,0003 m dla szerokości i długości oraz 0,001 m dla wysokości. W tym przypadku rms jest tylko globalną miarą dobroci dopasowania danych i modeli użytych w procesie opracowania obserwacji, co oznacza, że nie odzwierciedla faktycznej dokładności wyznaczenia współrzędnych. W tej sytuacji dokładność współrzędnych można określić jedynie przez porównania ciągu powtarzających się sesji pomiarowych. Przeprowadzona analiza porównawcza współrzędnych niezależnie dla każdej stacji permanentnej z trzymiesięcznego okresu czasu daje dokładność na poziomie od 2 do 5 mm, co jest o rząd gorszym wynikiem od wartości *rms* (tab. 3).

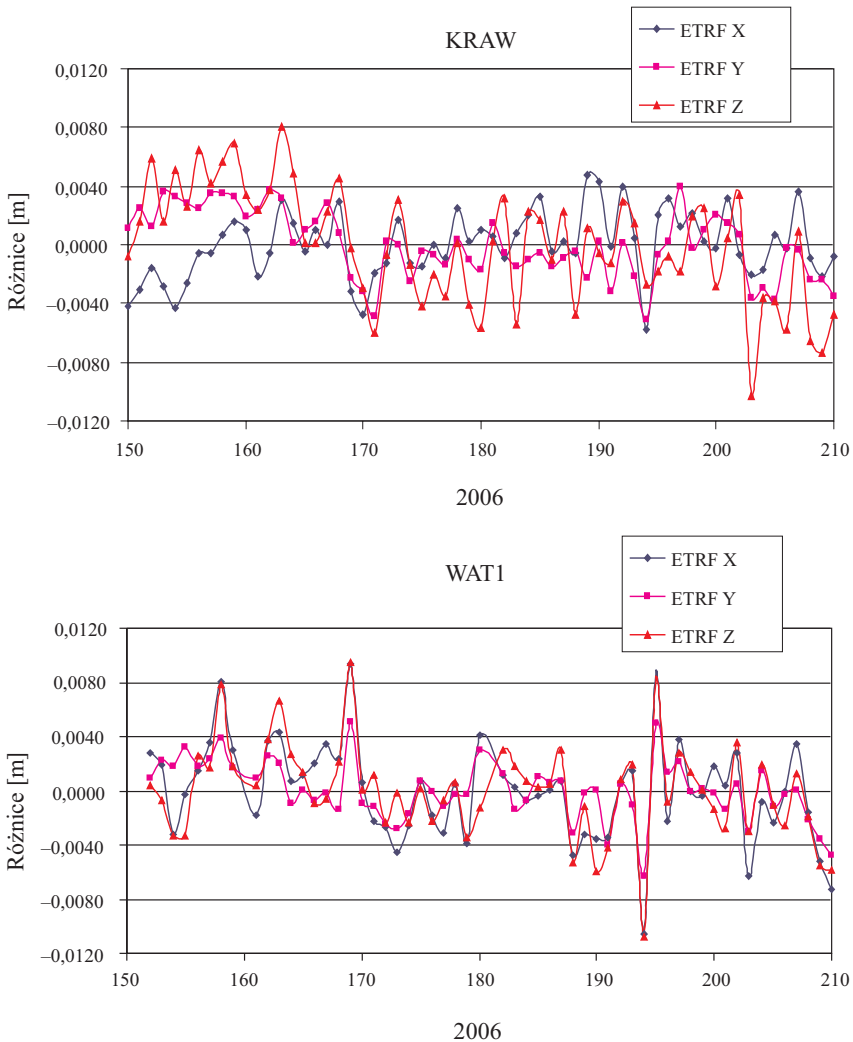
Tabela 3. Błędy i współrzędne geocentryczne w układzie ETRF'00 polskich stacji permanentnych obliczone w systemie POL_EPN

Stacja	BOGI			BOGO		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ŚREDNIA	3633815,6776	1397453,9181	5035280,7930	3633739,3052	1397433,9264	5035353,2781
σ	0,0032	0,0023	0,0035	0,0031	0,0020	0,0034
MAX	3633815,6858	1397453,9230	5035280,8016	3633739,3127	1397433,9309	5035353,2853
MIN	3633815,6698	1397453,9113	5035280,7814	3633739,2985	1397433,9198	5035353,2668
Stacja	JOZ2			JOZ3		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ŚREDNIA	3664880,9053	1409190,3882	5009618,2759	3664882,1967	1409190,0895	5009617,4622
σ	0,0037	0,0025	0,0037	0,0033	0,0021	0,0031
MAX	3664880,9148	1409190,3961	5009618,2866	3664882,2068	1409190,0947	5009617,4713
MIN	3664880,8978	1409190,3846	5009618,2704	3664882,1905	1409190,0864	5009617,4551
Stacja	JOZE			KATO		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ŚREDNIA	3664940,5080	1409153,6603	5009571,2058	3862992,3664	1332822,6601	4881105,4400
σ	0,0033	0,0020	0,0035	0,0030	0,0023	0,0028
MAX	3664940,5146	1409153,6663	5009571,2131	3862992,3729	1332822,6653	4881105,4470
MIN	3664940,5003	1409153,6561	5009571,1947	3862992,3595	1332822,6557	4881105,4319
Stacja	KLOB			KRAW		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ŚREDNIA	3812245,5248	1307966,5247	4927157,4596	3856936,1578	1397750,4709	4867719,4340
σ	0,0031	0,0025	0,0030	0,0023	0,0023	0,0039
MAX	3812245,5337	1307966,5366	4927157,4678	3856936,1636	1397750,4760	4867719,4443
MIN	3812245,5181	1307966,5211	4927157,4520	3856936,1530	1397750,4669	4867719,4259

Tabela 3 cd.

Stacja	LAMA			LELO		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ŚREDNIA	3524523,258	1329693,431	5129846,159	3814251,0040	1360360,1451	4911504,8759
σ	0,003	0,002	0,003	0,0028	0,0025	0,0030
MAX	3524523,264	1329693,439	5129846,166	3814251,0111	1360360,1522	4911504,8833
MIN	3524523,252	1329693,424	5129846,152	3814250,9978	1360360,1410	4911504,8690
Stacja	LGPL			POZN		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ŚREDNIA	3851054,9270	1315388,2874	4895185,8582	3642350,1020	1227958,5379	5072873,2686
σ	0,0030	0,0023	0,0036	0,0035	0,0022	0,0039
MAX	3851054,9344	1315388,2990	4895185,8660	3642350,1107	1227958,5431	5072873,2790
MIN	3851054,9210	1315388,2840	4895185,8510	3642350,0944	1227958,5327	5072873,2599
Stacja	WAT1			WODZ		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ŚREDNIA	3655223,1747	1396074,4496	5020262,3746	3896698,7661	1300673,6952	4863029,3510
σ	0,0037	0,0022	0,0036	0,0030	0,0019	0,0034
MAX	3655223,1852	1396074,4559	5020262,3854	3896698,7731	1300673,7031	4863029,3597
MIN	3655223,1653	1396074,4445	5020262,3652	3896698,7611	1300673,6919	4863029,3445
Stacja	WROC			ZYWI		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
ŚREDNIA	3835751,6192	1177249,7418	4941605,0477	3904633,3106	1360191,8809	4840630,7706
σ	0,0030	0,0016	0,0031	0,0030	0,0019	0,0037
MAX	3835751,6269	1177249,7472	4941605,0567	3904633,3180	1360191,8856	4840630,7793
MIN	3835751,6122	1177249,7385	4941605,0418	3904633,3038	1360191,8777	4840630,7615

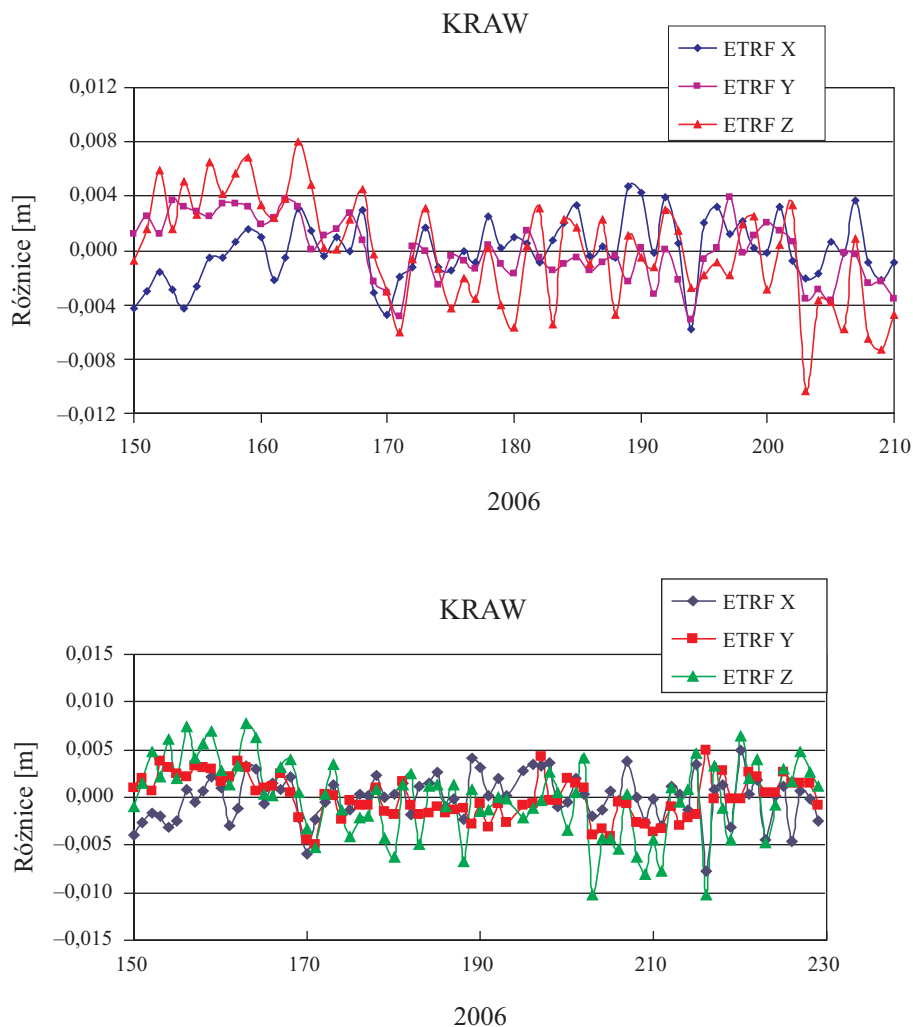
Świadczy to o obecności błędów systematycznych, czyli o niedoskonałości stosowanych modeli. O obecności błędów systematycznych świadczą również widoczne okresowości zmian współrzędnych w analizowanym okresie czasu. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowo wyznaczone współrzędne stacji w Krakowie (KRAW) i Wojskowej Akademii Technicznej (WAT1). Z ich przebiegu wyraźnie widać ok. 3-dniową okresowość zmian o amplitudzie kilku milimetrów.



Rys. 2. Różnice zmian współrzędnych uzyskanych z poziomu 1 systemu monitorowania w okresie 3 miesięcznych testów dla stacji w Krakowie i Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie

Podobne zmiany zostały zarejestrowane na pozostałych analizowanych stacjach permanentnych. Niestety na obecnym etapie analiz nie można jednoznacznie określić źródła pochodzenia zarejestrowanych na stacjach okresowości.

Analiza zmian współrzędnych wyznaczonych z obserwacji dobowych z wykorzystaniem efemeryd *ultra rapid* charakteryzuje się podobną okresowością, ale amplituda przebiegu jest o 1 milimetr większa (rys. 3).

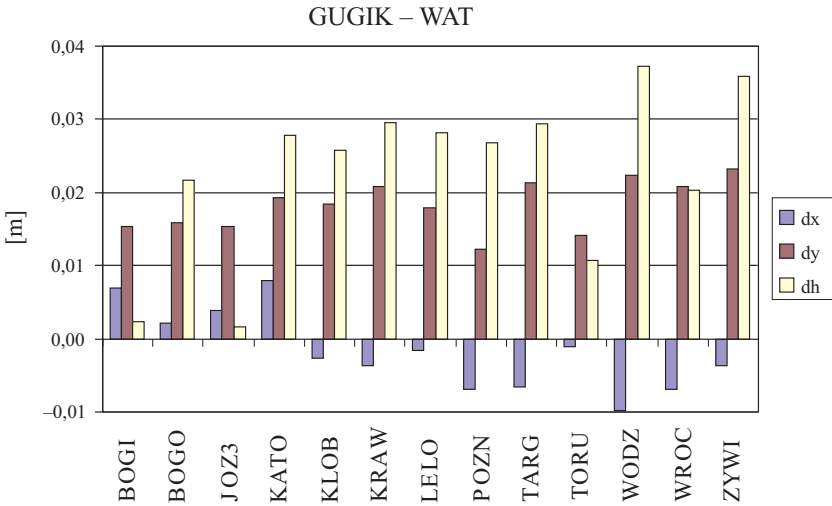


Rys. 3. Współrzędne stacji KRAW wyznaczone z wykorzystaniem orbity final IGS i ultra rapid IGS

Użycie efemeryd *ultra rapid* IGS pozwala na wyznaczenie współrzędnych z błędem tylko o ok. 1 mm większym od prezentowanych wcześniej wyników obliczeń wykonanych z efemerydą final IGS (rys. 3).

Spośród analizowanych stacji 13 jest liczone w Centrum Geomatyki Stosowanej WAT oraz ASG-PL w Katowicach. Celem zweryfikowania wyników porównane zostały współrzędne z ASG-PL [9] i CGS z systemu POL_EPN. Na rysunku 4 przed-

stawiono różnice składowych geocentrycznych w układzie ETRF wszystkich stacji liczonych przez wymienione ośrodki. Dla składowej X różnice kształtują się na poziomie kilku milimetrów, jednak dla składowej Y wzrastają do 2 cm. Największe różnice występują w składowej Z i dochodzą nawet do 3,5 cm dla stacji w Wodzisławiu Śląskim. Różnice mają charakter systematyczny, co oznacza, że występuje przesunięcie między układami, które są realizowane przez dwa omawiane rozwiązania.



Rys. 4. Różnice współrzędnych geocentrycznych ETRF 13 stacji permanentnych z ASG-PL i POL_EPN

Praktyczne wykorzystanie współrzędnych z tych rozwiązań prowadzi do błędów na punktach nowo wyznaczanych. Jedyną drogą, która może rozwiązać ten problem jest transformacja współrzędnych wynikających z tych rozwiązań. Do tego celu została wykorzystana siedmioparametrowa transformacja Helmerta (tab. 4). Residua współrzędnych po transformacji kształtują się na poziomie kilku dziesiątych milimetra, z czego można wnioskować, że jej użycie rozwiązuje problem różnicy

Tabela 4. Współczynniki transformacji wyznaczone z 13 stacji liczonych w ASG-PL i POL_EPN

TN	TE	TU	ωN	ωE	ωU	p
[m]	[m]	[m]	["]	["]	["]	[mm/km]
-1,6	18,4	22,4	0,00818	-0,0136	0,00597	0,0114

współrzędnych dwóch wymienionych rozwiązań. Oczywiście nie można traktować tego jako rozwiązania ostatecznego i należałoby zweryfikować to podejście w momencie pojawienia się większej liczby stacji permanentnych na terenie Polski.

4. Podsumowanie i wnioski

Podsumowując dotychczasowe prace stwierdzić należy, że dzięki uruchomieniu systemu monitorowania sieci stacji permanentnych na terenie Polski zweryfikowana została dokładność współrzędnych obecnie pracujących stacji. Błędy średnie wyznaczonych współrzędnych geocentrycznych w badanym okresie czasu wynoszą odpowiednio: $dX = 4$ mm, $dY = 3$ mm, $dZ = 4,5$ mm. Wykazano okresowe zmiany współrzędnych w systemie ETRS z badanego 3-miesięcznego okresu czasu, które mogą stanowić podstawę dalszych badań nad stabilnością układu ETRF i monitorowania pracy stacji referencyjnych w projekcie ASG-EUPOS. Ważnym elementem, który został zrealizowany w ramach prowadzonego projektu badawczego to jednolite opracowanie obserwacji ze wszystkich stacji permanentnych pracujących na terenie Polski, czego wynikiem są skatalogowane współrzędne stacji i ich błędy. Jest to jedyne opracowanie, które obejmuje zarówno stacje pracujące w projektach IGS, EPN, ASG-PL, ale również stacje uruchomione przez firmy prywatne (np. stacja firmy Leica Geosystems).

Literatura

- [1] Boucher C., Altamini Z.: *Memo: Specifications for Reference Frame Fixing in the Analysis of a EUREF GPS Campaign*, <http://www.epncb.oma.be/papers.html>, 2001.
- [2] Bosy J., Figurski M.: *Problematyka opracowania obserwacji satelitarnych GPS w precyzyjnych sieciach lokalnych*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Wrocław 2003.
- [3] Bruyninx C., Dousa J., Ehrnsperger W., Fachbach N., Figurski M., Johansson J., Springer T., Vespe F., Weber G.: *The Use of the EUREF Permanent GPS network for the Maintenance of the European Terrestrial Reference Frame*, IAG Symposium in Rio 1997.
- [4] Figurski M.: *Monitorowanie regionalnych zmian jonosfery z godzinnych obserwacji GPS*, BEL Studio, Warszawa 2005.
- [5] Mervart L.: *Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System*, Vol. 53 of Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Schweizerische Geodatische Kommission, Ph.D. thesis, 1995.

-
- [6] Rothacher M., Mervart L. (eds.): *Bernese GPS Software Version 4.2*, Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, September 1996.
- [7] Schaer S.: *Stochastische Ionosphärenmodellierung beim 'Rapid Static Positioning' mit GPS*, Astronomical Institute, University of Berne 1994.
- [8] Wawrzyn J., Antosiewicz M., *Aktywna Sieć Geodezyjna ASG-PL. Podstawowe cele, struktura, zastosowanie, kierunki rozwoju*, Seminarium „Otwarcie Centrum Zarządzania Aktywną Siecią Geodezyjną ASG-PL”, Katowice, 25 lutego 2003.
- [9] Zarządzenie Głównego Geodety Kraju nr 20 z dnia 18. 11. 2005 r.