

Artykuł recenzowany: Reprocessing sieci EPN (EUREF Permanent Network) w Wojskowej Akademii Technicznej

PIERWSZE OPRACOWANIE REGIONALNE

MARIUSZ FIGURSKI,
KAROLINA SZAFRANEK

Już od kilku miesięcy geodeci w Polsce mogą korzystać z systemu ASG-EUPOS będącego jedną z sieci stacji referencyjnych. Współrzędne punktów tych sieci powinny być wyznaczone z najwyższą precyzją możliwą do osiągnięcia. Z perspektywy kilkunastu lat użytkowania stacji referencyjnych w Polsce widać, że ich stabilność (dokładność) jest bardzo zróżnicowana. Wyjątek stanowią stacje obsługiwane przez placówki naukowe i uczelniane, które dysponują kilkunastoletnimi ciągami wyników obserwacji pozwalającymi na wykonanie analiz stabilności w ujęciu statystycznym i stochastycznym. Można wyróżnić kilka źródeł niestabilności danych związa-

nych głównie ze zmianami (redefinicjami) globalnego układu odniesienia ITRF oraz sposobem redukcji błędów systematycznych o charakterze geometrycznym lub fizycznym.

Od wielu lat trwają prace zmierzające do podniesienia dokładności opracowań GNSS w sieci stacji referencyjnych IGS (International GNSS Service) i EPN (EUREF Permanent Network) – rys. 1. Obydwie sieci zostały opisane w GEODECIE [Figurski, 2007]. Zagęszczenie sieci IGS jest bardzo niejednorodne. W Ameryce Północnej i Europie funkcjonuje dużo stacji, natomiast w Afryce jest ich niewiele. Stąd też międzynarodowe środowisko naukowe wdraża projekty, które pozwolą na założenie stacji na tych terenach. Podobne przedsięwzięcia są realizowane w innych regionach świata, w tym także we wschodniej Europie. Sieć EPN

również dynamicznie się rozwija – przez ostatnie dwa lata powiększono ją o blisko 50 nowych stacji, a IGS włączyła EPN jako sieć regionalną do cotygodniowych rozwiązań globalnych koordynowanych przez AAC MIT (Associate Analysis Center Massachusetts Institute of Technology). Większość nowych stacji stanowią systemy krajowe lub ich fragmenty, jak np. ASG-EUPOS czy SKPOS (Slovak Position Determination System). Tak duży wzrost liczby stacji pociąga za sobą potrzebę zmiany strategii obliczeniowej, co może z kolei spowodować zmianę dyspersji współrzędnych.

● MODELE ANTEN

Innym czynnikiem wprowadzającym błędy systematyczne, szczególnie w opracowaniach różnicowych GNSS, jest sposób określenia rzeczywistego położenia centrum fazowego anten i ich modeli. Problem ten został zauważony już na początku XXI wieku przy okazji opracowania kolejnej wersji układu ITRF [Menge i in., 1998]. W latach 90. został wypracowany kompromis, który zakładał odniesienie modeli wszystkich anten do anteny wzorcowej typu Dorne Margolin. Model taki, nazywany względnym, zakładał bezbłądność wykonania wspomnianej anteny referencyjnej, co oczywiście wprowadzało błąd systematyczny, ponieważ technologicznie nie jest możliwe wykonanie anteny o idealnej charakterystyce odbiorczej. W związku z tym większość stacji została wyposażona w anteny typu Dorne Margolin.

Badania z ostatnich lat pokazują jednak, że każdy egzemplarz anteny, nawet

STRESZCZENIE: Sieci referencyjne GNSS różnią się rozmiarami, liczbą stacji i przeznaczeniem. Pierwsze stacje permanentne powstały jeszcze w latach 80. Odbiorniki GPS nie były wówczas doskonałe, zwłaszcza w zakresie układu śledzenia i anten odbiorczych. Współrzędne stacji uzyskiwane z obliczeń przez kilkanaście ostatnich lat zawierają wiele błędów systematycznych, które uniemożliwiają ich wspólną analizę. Jedynym rozwiązaniem jest wykonanie powtórnych obliczeń archiwalnych obserwacji zgodnie z obowiązującymi standardami i modelami. Przedsięwzięcie to jest obecnie realizowane przez IGS dla sieci globalnej. Równoległe dla sieci regionalnej EPN prace takie wykonał zespół z Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) w Warszawie. W artykule przedstawiono ich metodologię oraz analizę wyników pod kątem poszukiwania błędów systematycznych nieuwzględnionych w obliczeniach.

ABSTRACT: GNSS reference networks differ in size, number of stations and their use. First permanent stations were established in the 80's. GPS receivers were not perfect at that time (mainly due to tracking systems and antennas). Station coordinates – the result of many years of calculations, contain a series of systematic errors. The only way to solve this problem was to reprocess archive data according to valid standards and models. Such undertaking is in progress for IGS right now. The Military University of Technology (Warsaw) performed test of such work for regional network EPN. This article presents methods and strategy of MUT's solution and its analysis in a context of searching of systematic errors that were not taken into consideration during calculations.

typu Dorne Margolin, ma tzw. charakterystykę indywidualną, właściwą tylko sobie [Schmid i in., 2005]. Z tej przyczyny podjęto decyzję o wprowadzeniu modeli absolutnych anten GNSS, których charakterystyki wyznaczane są laboratoryjnie i wymagają specjalnego sprzętu i stanowisk badawczych. Takim instrumentarium na świecie dysponuje tylko kilka firm (np. GEO++), które wykonują badania na zlecenie użytkowników. Dzięki zastosowaniu modeli absolutnych poprawiła się dokładność wyznaczeń współrzędnych, ale wprowadzony został kolejny błąd systematyczny do ciągów ich zmian w czasie.

● UKŁADY WSPÓRZĘDNYCH

W pierwszej połowie bieżącego dziesięciolecia trwały prace zmierzające do opracowania definicji układu ITRF2005 (opartego na obserwacjach GNSS, SLR, VLBI, DORIS), który miał zastąpić używany ITRF2000. Do nowej definicji wykorzystano opracowania, które bazowały na modelach względnych anten. Badania nad modelami absolutnymi były jeszcze w tym czasie za mało zaawansowane, by je wprowadzić w formie zalecenia, i nie było możliwości ich uwzględnienia w pracach nad nowym układem [Altamimi i in., 2007]. Przed wprowadzeniem układu ITRF2005, co nastąpiło w 1400. tygodniu GPS (6 listopada 2006 r.) analizowane były aspekty nowej strategii obliczeniowej i możliwość wdrożenia nowych modeli anten. Problem był przedmiotem dyskusji na 10. jubileuszowym spotkaniu roboczym IGS w Bernie. Wykazano, że proponowane jednocześnie wprowadzenie nowego układu ITRF2005 i absolutnego modelu anten zaburzy szereg współrzędnych stacji referencyjnych sieci IGS i EPN. Część danych do definicji układu ITRF, pochodząca z systemu GPS, bazowała na opracowaniach z modelami względnymi i była niezgodna z nowym standardem GNSS, który zakładał studowanie modeli absolutnych. W IGS próbowano rozwiązać tę kwestię, wprowadzając układ IGS05 tylko dla systemu GPS i wykonując jednoroczny reprocessing sieci IGS z uwzględnieniem nowego absolutnego modelu anten [Ferland, 2006]. Zabieg ten był jednak tymczasowy i nie pozwolił rozwiązać wszystkich

problemów, ponieważ dotyczył tylko wybranej, niewielkiej liczby stacji (32 stacje EPN) i nie uwzględniał historycznej informacji zawartej w ciągach współrzędnych. Ponadto stwierdzono, że o ile IGS05 i ITRF2005 definiują ten sam układ współrzędnych na poziomie globalnym, to na poziomie regionalnym występują znaczne różnice. W Europie dochodzą one do ok. 1,9 cm w składowej pionowej, a w składowych poziomych do ok. 5 mm [Bruyninx i in., 2008]. Poza tym od 1400. tygodnia GPS pojawia się problem dotyczący współrzędnych stacji fundamentalnych IGS/ITRF, ponieważ do definicji układów IGS i ITRF wykorzystuje się różne stacje.

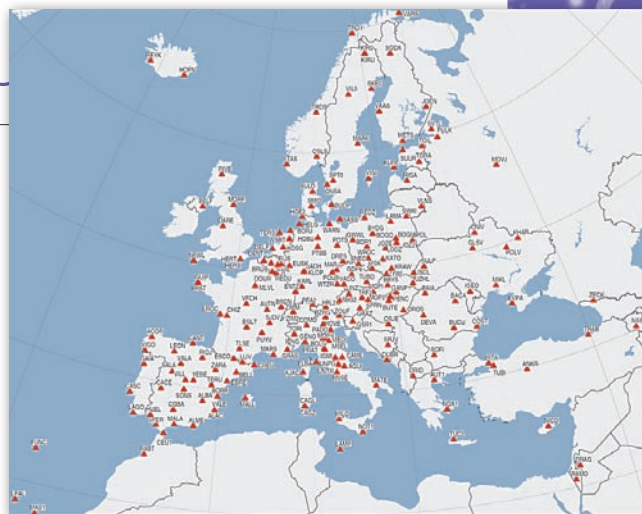
● PROPONOWANE ROZWIĄZANIA

Powyższe problemy można rozwiązać jedynie przez powtórne opracowanie archiwalnych danych sieci IGS i EPN z wykorzystaniem nowych strategii, modeli i narzędzi analitycznych. Pomysł zapisano w rezolucji podsumowującej jubileuszowe sympozjum w Bernie (tab. 1). Kolejne rezolucje regulujące techniczne aspekty powtórnych obliczeń (reprocessingu) pojawiły się przy okazji czterech następnych spotkań roboczych IGS w latach 2005-2008. Zaplanowane prace zakładały przygotowanie nowych, poprawionych efemeryd precyzyjnych i parametrów ruchu obrotowego Ziemi oraz wybranie stabilnych stacji fundamentalnych.

W podsumowaniu należy stwierdzić, że do głównych przyczyn wykonania reprocessingu w skali globalnej i regionalnej należą:

- zmiany strategii opracowania obserwacji GPS w latach 1994-2007,
- redefinicje układów odniesienia od 1994 r.,
- nowe modele zjawisk fizycznych,
- nieusunięte błędy systematyczne,
- nieliniowość w definicji układów odniesienia.

Wobec powyższego reprocessing można przeprowadzić na dwa sposoby. Pierwszy to tzw. szybki reprocessing, w którym wykorzystywane są równa-



Rys. 1. Sieć EPN (www.epncb.oma.be)

WARUNKI REPROCESSINGU SIECI IGS

- Przed rozpoczęciem reprocessingu absolutny model anten IGS powinien zostać zaktualizowany na podstawie dostępnych wyników kalibracji absolutnej odbiorników i anten przeprowadzonej urządzeniami typu „ROBOT” oraz zgodnie ze specyfikacją anten dostępnych w plikach SINEX poprzedniej wersji reprocessingu.
- Orbity precyzyjne z reprocessingu powinny podlegać kontroli z wynikami SLR.
- Wszystkie centra analiz powinny wykonać reprocessing zgodnie z procedurami i produktami końcowymi IGS. Elementy orbit muszą być wyrażone w systemie realizowanym w plikach SINEX, poprawki zegarów i orbity precyzyjne muszą być zgodne z układem odniesienia IGS 05.
- Kolejna realizacja układu odniesienia IGS powinna zawierać wysokiej jakości aktywne i nieaktywne stacje. Stabilność zegarów powinna zostać poprawiona na podstawie analizy wyników stacji realizujących układ odniesienia.
- Tabele nieciągłości rejestrowanych na stacjach permanentnych powinny być aktualizowane zgodnie z rozwiązaniami reprocessingu w uzgodnieniu z operatorami stacji.
- Dla plików SINEX muszą być użyte numery stacji permanentnych zgodnie z IERS.

nia normalne lub macierze kowariancji otrzymane w wcześniejszych obliczeniach. Zaletą tej metody jest fakt, że nie wymaga ona dużych mocy obliczeniowych. Pozwala jednak usunąć tylko niektóre efekty, np. skutki redefinicji układu odniesienia. Metoda nie eliminuje sposobu parametryzacji równań normalnych lub użytych modeli. Alternatywą dla tego rozwiązania jest pełny reprocessing, który zakłada ponowne obliczenie archiwalnych obserwacji w formacie RINEX, co daje możliwość usunięcia błędów systematycznych od poziomu obserwacji dzięki jednolitości strategii obliczeniowej i modeli. Zaznaczyć należy, że obliczenia w tym podejściu są bardzo czasochłonne.

TAB. 1. HISTORIA REPROCESSINGU SIECI IGS

Marzec 2004	Rekomendacja sympozjum w Bernie dotycząca przygotowania centrów analiz do reprocessingu IGS; dyskusja na temat procedury reprocessingu
Lipiec 2005	Podjęcie decyzji przez centra analiz o udziale w reprocessingu
Listopad 2005	Przygotowywanie danych archiwalnych przez operatorów stacji IGS
Maj 2006	Sesja dotycząca procedury reprocessingu - Workshop IGS w Darmstadt
Lato 2007	Pierwsze wyniki dla trzymiesięcznego okresu testowego z 2000 roku
Luty 2008	Początek pierwszego pełnego reprocessingu IGS (jednocześnie w WAT rozpoczyna się pełny testowy reprocessing sieci EPN)

TAB. 2. CENTRA ANALIZ IGS PROWADZĄCE REPROCESSING SIECI IGS

EM1	National Resources Canada, Kanada
ES1	European Space Operations Center, Niemcy
GF1	GeoForschungsZentrum, Niemcy
JPL1	Jet Propulsion Laboratory, USA
MI1	Massachusetts Institute of Technology, USA
NG1	National Geodetic Service, USA
PD1	Potsdam Dresden Reprocessing, Niemcy
SI1	Scripps Institution of Oceanography, USA

Pierwszy – zakończony pełnym sukcesem – reprocessing, zgodny z zaleceniami IGS, został wykonany w Niemczech w 2006 r. przez zespół pod kierownictwem Steigenbergera [Steigenberger i in., 2006]. Głównym celem opracowania było obliczenie nowych efemeryd precyzyjnych (1994-2005), które uwzględniło absolutne modele anten odborników i satelitów GNSS. Pierwsza faza pełnego reprocessingu koordynowanego przez IGS wykonywana jest obecnie przez osiem centrów analiz (tab. 2), a zakończenie prac planowane jest na początek 2009 roku.

● REPROCESSING SIECI EPN

Pierwsze sygnały o potrzebie wykonania reprocessingu sieci EPN pojawiły się w podsumowaniu warsztatów centrów obliczeniowych EPN w Padwie w 2007 r.

Wszystkie centra analiz opowiedziały się za realizacją takiego przedsięwzięcia, jednak miało to nastąpić dopiero po zakończeniu pierwszej fazy reprocessingu IGS. Można więc było spodziewać się, że prace zostaną rozpoczęte dopiero w połowie 2009 roku. Powodem tak asekuracyjnego podejścia był brak w centrach analiz EPN komputerów o odpowiedniej mocy, na których można byłoby przeprowadzić czasochłonne obliczenia. W tym samym czasie w Centrum Geomatyki Stosowanej (CGS) Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej trwały testy nad implementacją programu Bernese v. 5.0+ na klastrze komputerowym FENIX, które zostały z sukcesem zakończone w pierwszym kwartale 2007 roku [Beutler i in., 2006]. Wykazano, że wprowadzone poprawione mechanizmy równoległych procesów obliczeniowych w programie Bernese 5.0+ pozwalają na wykonanie obliczeń obserwacji dobowych ok. 200 stacji w ciągu 45 min. W tym samym czasie CGS uzyskało dostęp do efemeryd precyzyjnych, które zostały obliczone w ramach reprocessingu sieci IGS w zespole kierowanym przez Steigenbergera.

Klastr komputerowy i nowe efemerydy precyzyjne były czynnikami, które zmobilizowały nasz zespół do podjęcia badań nad reprocessingiem całej sieci EPN. Największym problemem były dane obserwacyjne z lat 1995-2007. W ich poszukiwaniu sprawdzone zostały wszystkie ogólnodostępne i zastrzeżone bazy danych IGS, EPN i lokalnych europejskich systemów referencyjnych (np. sieć SWEPOS). Zbieranie, analizowanie i sprawdzanie poprawności danych trwało 5 miesięcy, a powstała baza zawiera kilkaset gigabajtów danych unikalnych w skali europejskiej, co zostało podkreślone przez uczestników konferencji centrów analiz w październiku 2008 roku we Frankfurcie (EPN LAC Workshop Frankfurt 2008). Pierwsza faza testowego reprocessingu została wykonana w drugiej połowie 2007 roku. W tym czasie dopracowano strategię obliczeniową i parametry brzegowe. Zasadniczy reprocessing, testowy z punktu widzenia zaleceń EPN, wykonano w ciągu 3 pierwszych miesięcy 2008 roku. Równolegle z pracami obliczeniowymi w WAT trwały obliczenia w belgijskim centrum analiz (Royal Observatory of Belgium). W obliczeniach ROB zostały wykorzystane oryginalne efemerydy precyzyjne IGS, a reprocessing ograniczono do obserwacji kilkunastu stacji EPN.

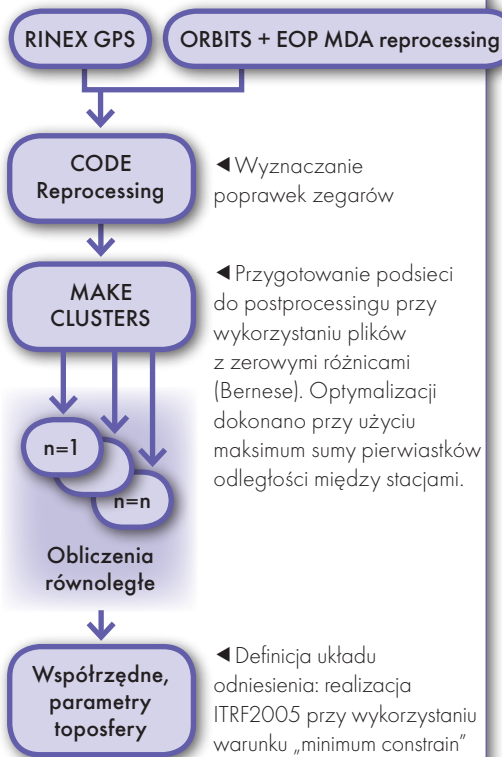
KLASTER WAT

- Klastr zawiera 16 serwerów HP Server rx1620, każdy wyposażony w dwa procesory Intel Itanium 2 taktowane zegarem 1,6 GHz (FSB 533 MHz).
- Każdy z serwerów posiada 4 GB pamięci operacyjnej i dyski SCSI o pojemności 36 GB.
- Wszystkie serwery klastra współpracują z macierzą dyskową o całkowitej pojemności 9 TB.
- Teoretyczna maksymalna moc obliczeniowa wynosi ok. 210 GFLOP.
- Klastr pracuje pod kontrolą 64-bitowego systemu Debian GNU/Linux 3.1 Sarge.

Wyniki w porównaniu do rozwiązań archiwalnych EPN nie wykazywały znacznej poprawy.

W reprocessingu wykonanym w WAT wykorzystano strategię obliczeniową zalecaną przez IGS i EPN dla programu Bernese 5.0 w sieciach regionalnych (model absolutny anten PCV – Phase Center Variations, minimalna wysokość śledzenia satelitów GPS – 3°, funkcja odwzorowująca refrakcji troposferycznej – Niell/GMF, wyznaczany gradient troposferyczny, efemerydy planetarne – model JPL DE405, model płytów oceanicznych – FES2004).

Obliczenia wykonywane były według algorytmu pokazanego na rysunku 2. Zgodnie z nim podstawowymi danymi w opracowaniu były obserwacje fazowe, natomiast kodowe stosowano do wprowadzenia korekcji zegarów satelitarnych. W obliczeniach wykorzystane zostały efemerydy precyzyjne i parametry ruchu obrotowego ziemi MDA oraz pliki zawierające informacje o nieprawidłowym działaniu satelitów. Z obliczeń były eliminowane wszystkie obserwacje dobowe, które posiadały mniej niż 40% poprawnych danych. Główną zmianą w stosunku do standardowego rozwiązania BPE Bernese 5.0 obejmuje dwa moduły *Parell Processing* i *Make Clusters*. Realizują one funkcje wirtualnego podziału sieci EPN na części liczące około 50 stacji. Połączenie wszystkich części jest realizowane przez wybrane stacje wspólne. Strategia jest analogiczna do metody łączenia rozwiązań w sieci EPN z 16 centrów analiz [Kenyerer i Bruyninx, 2004], ale realizowana w przestrzeni wirtualnej klastra komputerowego. Każda z części liczona była równolegle, a równania normalne, będące wynikiem każdego z procesów obliczeniowych, łączono programem ADDNEQ2, uzyskując rozwiązania dobo-



Rys. 2. Schemat równoległych obliczeń w Bernese (reprocessing - rozwiązania dobowe)

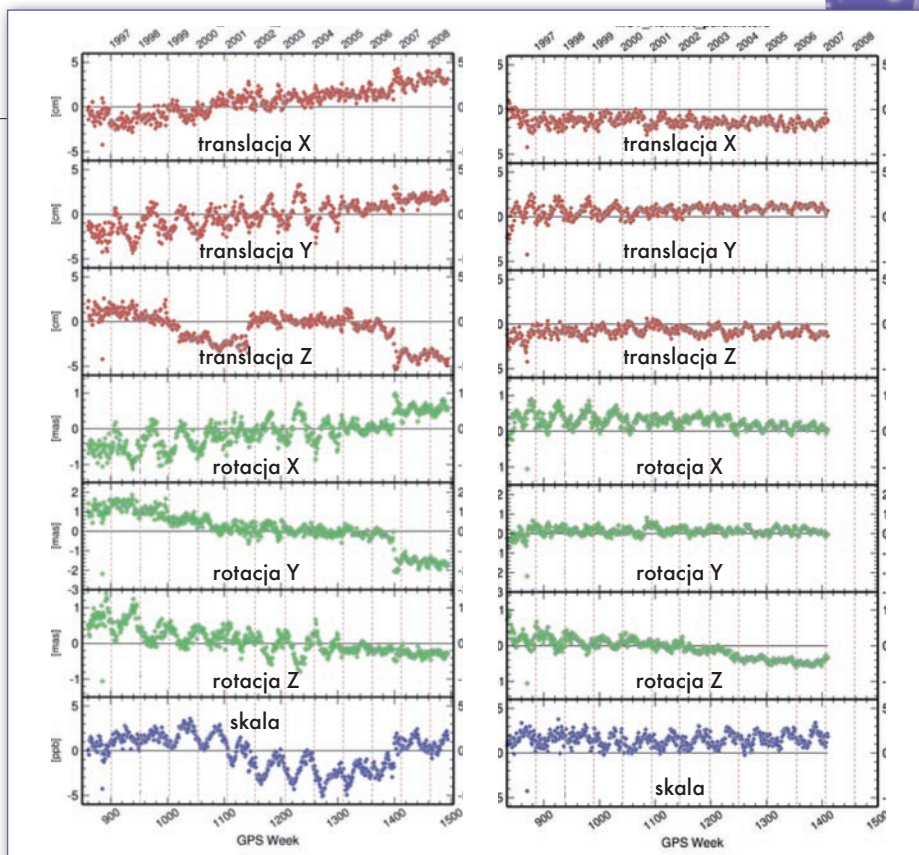
we. W wyniku opracowania uzyskano rozwiązanie charakteryzujące się tymi samymi parametrami brzegowymi i jednolitą strategią obliczeń, które zostały zapisane w plikach SINEX (dobowe i tygodniowe – w celu porównania z dostępnymi obecnie standardowymi rozwiązaniami EPN).

● ANALIZA ROZWIĄZAŃ TYGODNIOWYCH

W pierwszej fazie rozwiązania tygodniowe zapisane w formacie SINEX poddano analizie programem CATREF [Altamimi i in., 1994]. Jej celem było sprawdzenie jakości uzyskanego rozwiązania z reprocessingu w porównaniu ze standardowymi „produktami” EPN. Wykorzystując program CATREF, wykonano dwa niezależne wyrównania rozwiązań tygodniowych. Pierwsze bazujące na „standardowych” archiwalnych plikach SINEX [H. Habrich, BKG], których analiza jest prowadzona w projekcie EPN Time Series Project. Ich wyniki są uaktualniane 3-4 razy w ciągu roku i udostępniane za pośrednictwem strony internetowej centralnego biura EPN (www.epncb.oma.be). Do drugiego wyrównania wykorzystano pliki SINEX z reprocessingu wykonanego w WAT (MUT SINEX). W pierwszym i drugim wyrównaniu wykorzystano 18 tych samych stacji referencyjnych charakteryzujących się najlepszymi wynikami w całym analizowanym przedziale czasu, których współrzędne i prędkości były wyrażone w układzie ITRF2005, epoka 2000.0. Wyrównanie zostało przeprowadzone z narzuceniem minimalnych warunków (*Minimum Constraint*), aby wyeliminować zaburzenia rozwiązania wynikające z propagacji błędów w sieci.

Chociaż reprocessing został wykonany do 1459. tygodnia GPS, opracowaliśmy rozwiązania skumulowane tylko do 1399. tygodnia GPS. Był to kompromis wynikający z tego, że ITRF2005 zawiera tylko rozwiązania GPS do 1355. tygodnia GPS (rozwiązania późniejsze nie wprowadzały żadnych zmian, ponieważ wykorzystano w nich już absolutne modele anten).

Wynikiem obliczeń wykonanych programem CATREF są współrzędne i prędkości zapisane w formacie SINEX wynikające z połączonego (skumulowanego) opracowania wszystkich rozwiązań tygodniowych. Oprócz tego uzyskano dodatkowe informacje pozwalające ana-



Rys. 3. Parametry transformacji Helmerta między rozwiązaniem skumulowanym i rozwiązaniami tygodniowymi. Z lewej wykresy parametrów dla standardowych rozwiązań EPN, z prawej – dla rozwiązań z reprocessingu wykonanego przez WAT

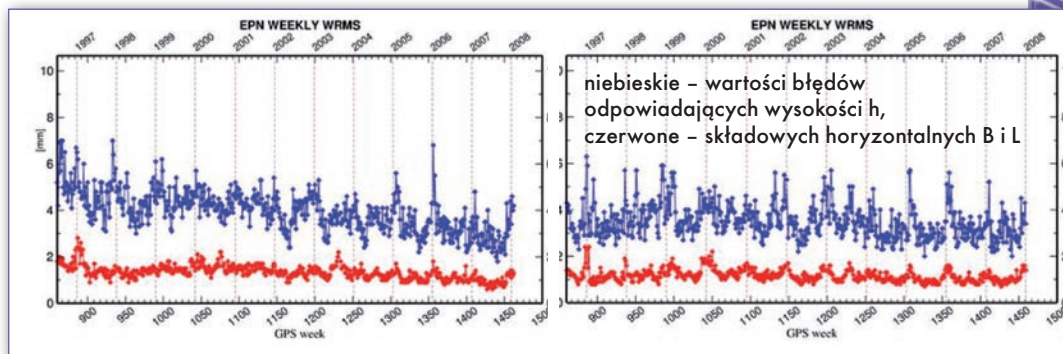
lizować jakość poszczególnych rozwiązań tygodniowych w odniesieniu do rozwiązania skumulowanego.

Zarówno dla standardowych rozwiązań EPN, jak i dla rozwiązań otrzymanych po reprocessingu wyznaczono siedem parametrów transformacji Helmerta (translacja, rotacja, skala) pomiędzy wieloletnim rozwiązaniem skumulowanym i indywidualnymi rozwiązaniami tygodniowymi (rys. 3). Szeregi obrazujące parametry transformacji dla nowych rozwiązań charakteryzują się gładszym przebiegiem i mniejszymi zaburzeniami sezonowymi.

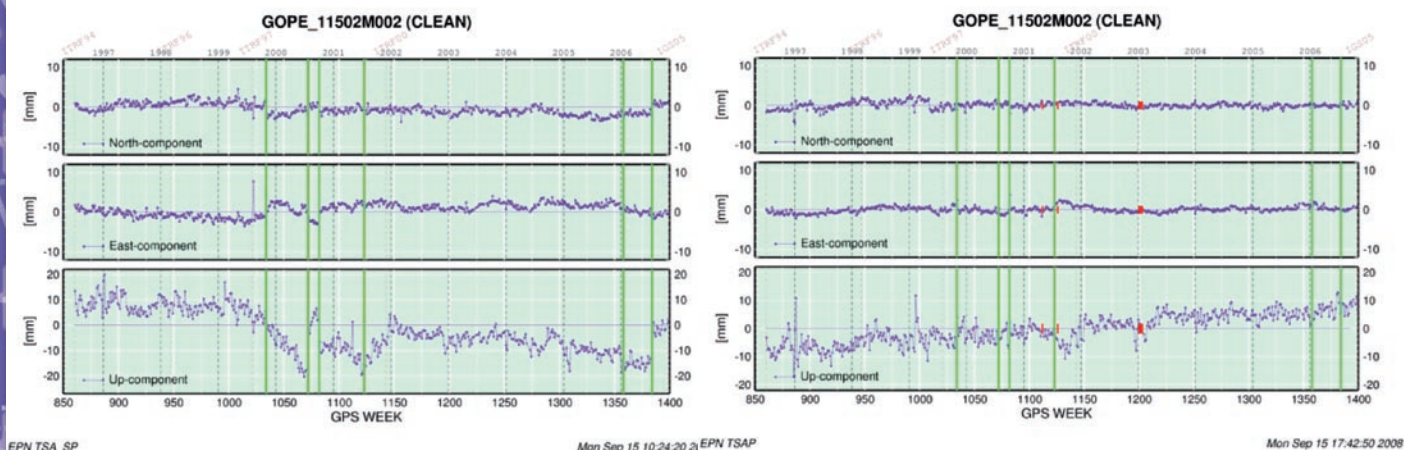
Dla otrzymanych wyników wyznaczono także wagowany średni błąd kwadratowy WRMS (Weighted Root Mean Square). Parametr ten charakteryzuje jakość szere-

gów współrzędnych i jest bardzo czuły na problemy dotyczące pojedynczych stacji. Na rysunku 4 można zauważyć, iż wartość WRMS w szeregach po reprocessingu uległa zmniejszeniu od około 10% do około 30% zarówno dla wysokości h , jak i dla składowych horizontalnych B i L względem standardowych tygodniowych szeregów EPN.

Rysunek 5 przedstawia szeregi czasowe residuów wartości resztkowych standardowych rozwiązań EPN i rozwiązań po reprocessingu dla czeskiej stacji GOPE. W wyniku analogicznego porównania wykonanego dla wszystkich analizowanych stacji okazało się, że przeważająca liczba szeregów czasowych została wygładzona. W „nowych” szeregach widoczne są zmiany współrzędnych rzędu 1 mi-



Rys. 4. Porównanie wartości WRMS (wagowanych błędów średnich rozwiązań tygodniowych). Z lewej – dla standardowych szeregów EPN, z prawej – dla szeregów po testowym reprocessingu



Rys. 5. Porównanie wyników z czeskiej stacji GOPE. Z lewej residua standardowych tygodniowych rozwiązań EPN (nie korygowano skokowych zmian współrzędnych wywołanych np. redefinicją układu odniesienia ani nie odrzucono wartości odstających), z prawej – residua rozwiązań otrzymane w wyniku reprocessingu wykonanego przez WAT

limetra, podczas gdy wcześniej były one ukryte w szumie szeregów. Dzięki zastosowaniu absolutnych modeli anten na niektórych stacjach (np. GOPE, BZRG), przebiegi ich rozwiązań znacznie się poprawiły.

Otrzymane współrzędne stacji i ich prędkości odniesione do epoki 2000.0 porównano zarówno ze standardowymi rozwiązaniami EPN, jak i z rozwiązaniami ITRF2005. Ze względu na to, że EPN

się znaczące (rys. 6). Wynika to najprawdopodobniej z niezgodności w zastosowanych układach odniesienia wynikającej z długookresowego zaburzenia obserwowanego na kilku stacjach w rozwiązaniach standardowych (różnice te mają przeciwne znaki dla stacji północnych i południowych). Porównanie wartości pionowych prędkości z dwóch skumulowanych rozwiązań z ITRF2005 pokazało, że nowe rozwiązanie daje lepsze

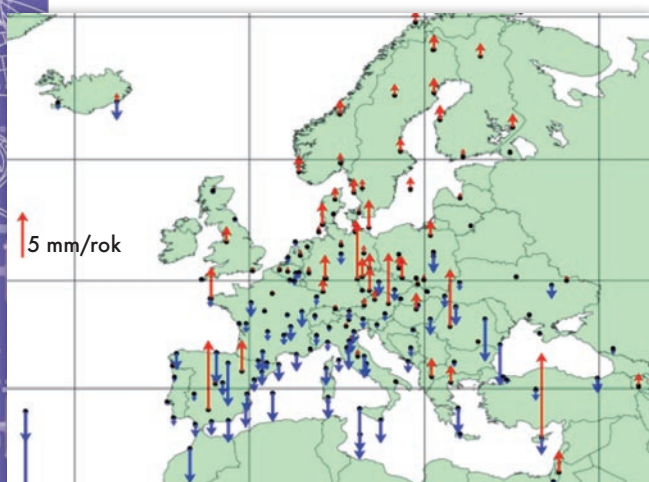
wyniki (bliższe ITRF2005) i może zostać wykorzystane do regionalnego zagęszczenia ITRF. W najbliższej przyszłości Centralne Biuro EPN planuje rozpocząć nowy projekt mający na celu wyznaczenie dokładnego modelu pól prędkości dla terenu Europy, zagęszczając go o niektóre krajowe sieci referencyjne. Wojskowa Akademia Techniczna zgłosiła swój udział w tym projekcie. W tabeli 3 zawarte są współrzędne i prędkości geocentryczne polskich stacji referencyjnych włączonych do sieci EPN i opracowanych pro-

gramem CATREF. W zestawieniu zawarto tylko stacje, które posiadały co najmniej 2 lata rozwiązań. Współrzędne są wyrażone w układzie ETRF2005 odniesione do epoki referencyjnej 2000.0, prędkości charakteryzują ich wartości lokalne w układzie ETRF.

ANALIZA ROZWIĄZAŃ DOBOWYCH

W wyniku testowego reprocessingu otrzymano również dobowe szeregi czasowe współrzędnych ok. 180 stacji sieci EPN, które analizowano pod kątem poprawności przyjętej strategii obliczeń oraz użytych modeli i parametrów. Kontrola taka jest szczególnie istotna w kontekście opracowywania strategii „oficjalnego” reprocessingu całej sieci EPN planowanego przez Centralne Biuro EPN na lata 2009-2010. Oprócz sprawdzenia poprawności strategii, próbowano również znaleźć przyczynę zaburzeń rozwiązań i nieciągłości w szeregach oraz zaproponować sposób wyeliminowania tych czynników.

Niemalą część nieciągłości w szeregach jest spowodowana różnego typu modyfikacjami na stacjach. Najczęściej jest to zmiana anteny bądź założenie lub zdjęcie kopuły ochronnej, ale może to być rów-



Rys. 6. Różnice między składowymi pionowymi prędkościami stacji otrzymanymi z rozwiązań standardowych EPN i po reprocessingu

jest siecią regionalną, a ITRF układem globalnym, bardzo istotny był w tym przypadku wybór odpowiednich stacji odniesienia. Standardowe rozwiązanie skumulowane EPN umożliwia odtworzenie prędkości z ITRF2005 z dokładnością 1 mm/rok dla składowej poziomej prędkości, ale dla składowej pionowej jest znacznie niższa. Różnice składowych poziomych prędkości stacji pomiędzy otrzymanymi na podstawie standardowych rozwiązań EPN a rozwiązaniami z reprocessingu były niewielkie (z wyjątkiem stacji krótko istniejących), jednak różnice składowych pionowych okazały

TAB. 3. POLSKIE STACJE EPN: WSPÓRZĘDNE [M] NA EPOKĘ 2000.0 I PRĘDKOŚCI GEOCENTRYCZNE [MM/ROK] W ETRF2005 (PRĘDKOŚCI LOKALNE PO USUNIĘCIU PRĘDKOŚCI GLOBALNYCH ITRF)

Stacja	X	Y	Z	v_x	v_y	v_z
BOGI	3633815,6850	1397453,9230	5035280,8040	0,0	-0,2	0,3
BOGO	3633739,3130	1397433,9335	5035353,2890	0,3	-0,1	0,6
BOR1	3738358,7790	1148173,5015	5021815,5825	0,0	-0,1	0,1
JOZ2	3664880,9030	1409190,3900	5009618,2750	0,7	0,1	0,7
JOZE	3664940,4985	1409153,6610	5009571,1945	1,0	0,5	1,5
KATO	3862992,3640	1332822,6530	4881105,4770	1,8	1,6	-3,6
KRAW	3856936,1690	1397750,4760	4867719,4400	0,0	-0,3	0,6
LAMA	3524523,2615	1329693,4385	5129846,1685	-0,2	-0,5	-0,4
WROC	3835751,6217	1177249,7437	4941605,0493	0,0	0,0	0,0
ZYWI	3904633,3240	1360191,8870	4840630,7840	0,0	0,0	0,0

niez zmiana odbiornika, oprogramowania czy nawet wymiana okablowania stacji. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe zmiany szeregów współrzędnych stacji HOBU, jednej z wielu, na których zmiany takie są szczególnie widoczne. Nieciągłości te muszą być uwzględnione w dalszych analizach (np. czasowo-częstotliwościowych) i w ostatecznych obliczeniach. Niektóre problemy zostaną w znacznej części rozwiązane dzięki wprowadzeniu absolutnego modelu PCV dla wszystkich anten. Każda z anten ma zostać laboratoryjnie przebadana w celu określenia dokładnego położenia jej centrum fazowego, czyli punktu, do którego docierają sygnały z satelitów.

• WPŁYW TRZĘSIEŃ ZIEMI NA OPRACOWANIA DOBOWE

Kolejnym czynnikiem analizowanym pod kątem nieciągłości w rozwiązaniach były trzęsienia Ziemi. Rejony aktywne sejsmicznie będące w zasięgu sieci EPN obejmują głównie obszary położone w rejonie Morza Śródziemnego (Włochy, Czarnogóra, Grecja, Cypr) oraz północną część Turcji (głównie okolice cieśniny Bosfor). Jako że trzęsienia ziemi są zjawiskiem krótkotrwałym, w rozwiązaniach dobowych mogą się one ujawnić jedynie w postaci „skoków” wartości współrzędnych w przypadku permanentnej zmiany położenia anteny. Do wykrycia chwilowych zaburzeń współrzędnych należałoby dysponować rozwiązaniami o większej częstotliwości (np. sekundowymi). Przy poszukiwaniu trzęsień ziemi, które wystąpiły w latach 1996-2007, korzystano z bazy danych USGS (United States Geological Survey). Początkowo wybrano z niej tylko trzęsienia ziemi o sile powyżej 6° w skali Richtera, których ogniska były położone w pobliżu stacji EPN (odległość kilkanaście – kilkadziesiąt kilometrów). W większości przypadków okazało się jednak, że stacja najbliższa epicentrum nie posiada rozwiązań dla momentu wystąpienia zjawiska (dwa wyjątki to stacje tureckie TUBI i ANKR). W drugiej fazie poszukiwania zwiększono do trzęsień ziemi o magnitudzie powyżej 5° R. Okazało się, że tylko w jednym przypadku (stacja TUBI) w momencie wystąpienia zjawiska o magnitudzie 7,6° R nastąpiła skokowa, permanentna zmiana współrzędnych B (30 cm) i L (50 cm) oraz około 10 centymetrów dla h. Epicentrum znajdowało się w odległości 40 km od stacji (rys. 8).

W innych przypadkach analizowanych trzęsień ziemi nie nastąpiły jakie-

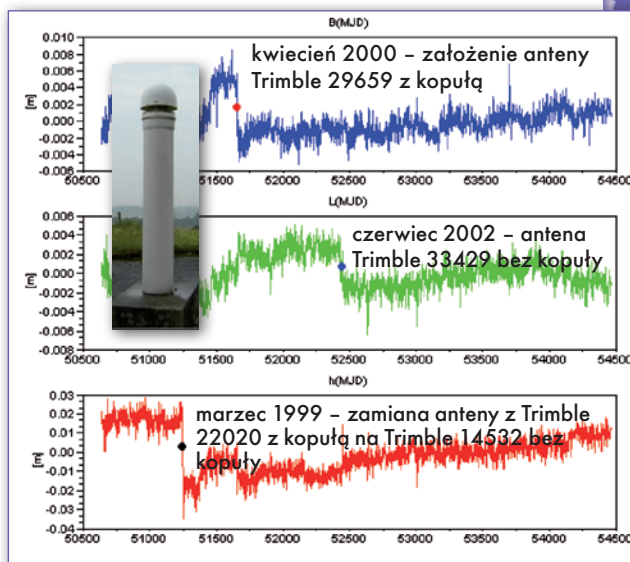
kolwiek zmiany położenia stacji, można więc uznać, że w większości nie powodują one permanentnych zmian współrzędnych, choć czynnik ten należy monitorować.

• WPŁYW JONOSFERY NA WYNIKI REPROCESSINGU

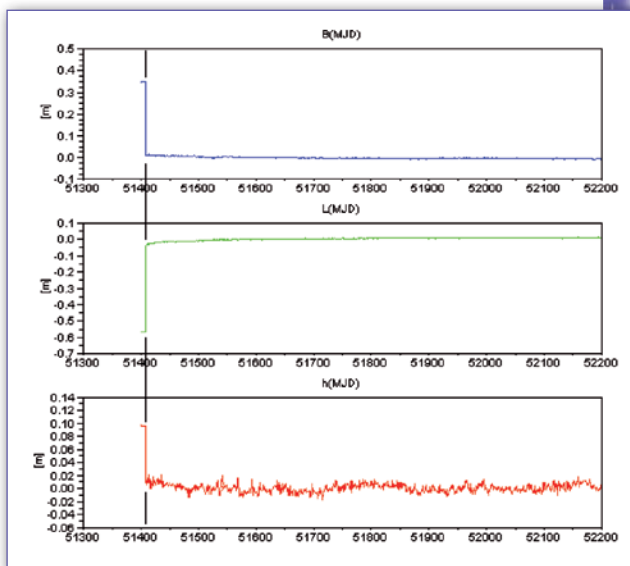
W celu zbadania poprawności przyjętego modelu jonosfery oraz strategii obliczeniowej wykorzystującej kombinacje liniowe pozwalające wyeliminować jej wpływ, zbadano współrzędne kilkunastu stacji z przełomu października i listopada 2003 roku, kiedy to wystąpiła potężna burza magnetyczna będąca wynikiem zmian natężenia wiatru słonecznego wywołanego wybuchami koronalnymi na Słońcu. Zmiany zachodzące w magnetosferze pod wpływem wiatru słonecznego powodują gwałtowne zmiany w jonosferze (np. parametru TEC mówiącego o całkowitej zawartości elektronów w jonosferze), które potencjalnie mogą wpływać głównie na rozwiązania stacji położonych na północy Europy (rys. 9).

Warunki panujące podczas burzy z 2003 r. były ekstremalne, więc wszelkie nieprawidłowości w rozwiązaniach byłyby w tym czasie szczególnie widoczne. Po przeanalizowaniu szeregów czasowych opisujących rozwiązania dwunastu stacji, głównie skandynawskich, stwierdzono, że nawet tak silne zmiany własności jonosfery nie powodują jakichkolwiek zaburzeń w rozwiązaniach otrzymanych w wyniku „testowego” reprocessingu (rys. 10). Oznacza to, że zastosowany model oraz odpowiednie kombinacje liniowe mogą

Rys. 9. Stacje, z których rozwiązania zanalizowano w kontekście wpływu jonosfery na wyniki reprocessingu (żółte) i stacje, na których zaobserwowano cykliczne zaburzenia związane ze specyficznymi warunkami meteorologicznymi (białe)

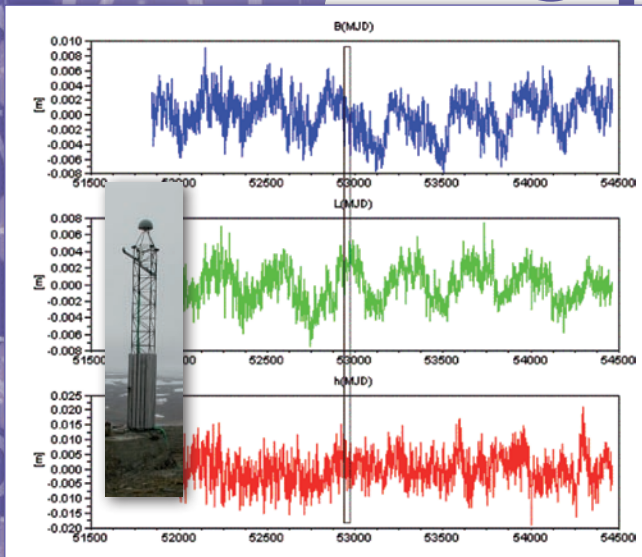


Rys. 7. Szeregi czasowe B, L, h stacji HOBU (Niemcy) w funkcji czasu. Obserwacje prowadzone były od lipca 1997 r. Nieciągłości spowodowane były modyfikacjami anteny

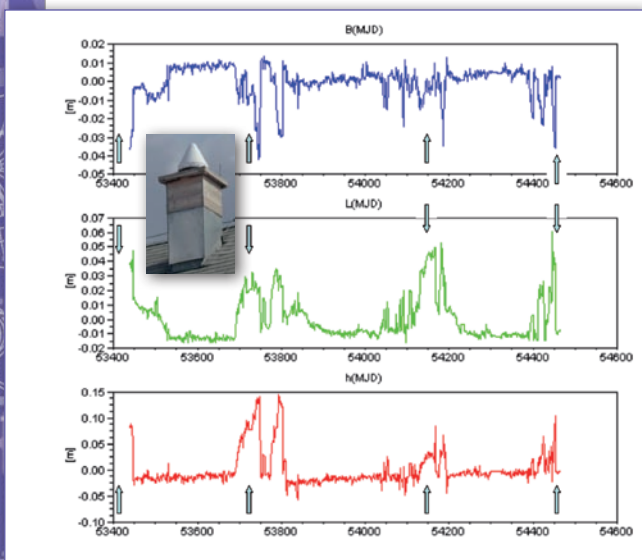


Rys. 8. Szeregi czasowe współrzędnych B, L, h tureckiej stacji TUBI znajdującej się w odległości około 40 km od epicentrum silnego wstrząsu (7,6° R) z 17 sierpnia 1999 r.





Rys. 10. Stacja VARS (Norwegia) położona na szerokości geograficznej 70°. Zaznaczony interwał odpowiada bardzo silnej burzy magnetycznej i silnym zaburzeniom jonosfery



Rys. 11. Szeregi czasowe obrazujące rozwiązania ze stacji SNEC (Śnieżka, Czechy), na której panują ekstremalne warunki meteorologiczne. Zaburzenia współrzędnych w ziemie są rzędu 5 cm dla B i L, a dla h nawet do 15 cm (!).

poprawnie zredukować wpływ jonosfery i mogą być zastosowane w przyszłości bez żadnych modyfikacji do kolejnego reprocessingu.

● WPŁYW POKRYWY ŚNIEŻNEJ NA ZMIANY WSPÓŁRZĘDNYCH

Podczas analiz wyników reprocessingu pojawił się także problem pewnych regularnych, corocznych zaburzeń na niektórych stacjach. Większość z tych stacji leży w rejonach, w których występują silne opady śniegu, a zmiany współrzędnych mają miejsce w okresie zimowym. Oznacza to, że warstwa śniegu zalegająca na antenie (bądź też zmiana własności ośrodka propagacji na

drodze sygnału) powoduje zaburzenia zmian współrzędnych. Problem dotyczy głównie stacji KIRU (Szwecja), SODA, VAAS (Finlandia), SNEC i BISK (Czechy) – rys. 9. Dla stacji SODA zmiany te sięgają 2 cm dla składowych B i L i około 7 cm dla wysokości h. Zmiany współrzędnych stacji SNEC (Śnieżka) w okresie zimowym dochodzą odpowiednio do 6 i 15 cm (rys. 11).

W celu przeciwdziałania tym zaburzeniom należałoby zaimplementować odpowiedni model środowiskowy oraz dokładnie zbadać zależności pomiędzy warunkami meteorologicznymi i obserwacjami GNSS. Stacje charakteryzujące się takimi błędami systematycznymi nie mogą być włączone do definicji i realizacji układu odniesienia ETRF, gdyż mogą wprowadzać błędy w rozwiązaniach. Powodują one również zwiększenie wagi błędów średnich rozwiązań (WRMS) w okresach zimowych. Stanowią zagrożenie dla działania narodowych systemów stacji referencyjnych, np. ASG-EUPOS.

● PODSUMOWANIE

Pełen reprocessing sieci GPS jest konieczny ze względu na liczne nieciągłości w przebiegach szeregów czasowych rozwiązań spowodowane m.in. zmianą modeli, oprogramowania i sprzętu na stacjach oraz redefinicjami układów odniesienia. Wszelkie zmiany tego typu powodują poprawę wyników (wyznaczeń współrzędnych) poszczególnych stacji od momentu wprowadzenia zmiany, ale znacznie utrudniają czy wręcz uniemożliwiają wykonanie wielu analiz (np. czasowo-częstotliwościowych). Pilotażowy reprocessing wykonany w Wojskowej Akademii Technicznej pozwolił na kontrolę strategii obliczeniowej, modeli w niej użytych, a także pokazał, jakie zmiany powinny zostać wprowadzone w oficjalnym reprocessingu

gu EPN. Jednocześnie jest to pierwsze na świecie opracowanie wykonane dla tak dużej sieci regionalnej. Otrzymane wyniki charakteryzują się mniejszym szumem i wygładzonym przebiegiem szeregów zmian współrzędnych. Występują w nich mniej zaburzeń i mają one słabszą amplitudę względem standardowych rozwiązań EPN (dotyczy to zwłaszcza długookresowych zaburzeń składowej h), co pozwoli na bardziej wiarygodną regionalną realizację systemu odniesienia przy użyciu najbardziej stabilnych stacji. Trwają prace, których celem będzie szczegółowa analiza statystyczna i czasowo-częstotliwościowa, pozwalająca odpowiedzieć na pytanie, jakie jeszcze modyfikacje należy wprowadzić w oficjalnym reprocessingu.

DR HAB INŻ. MARIUSZ FIGURSKI
(profesor WAT, prodziekan ds. naukowych
Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji)
KAROLINA SZAFRANEK
(asystentka na WILiG)
RECENZENT:
PROF. DR HAB INŻ. LUBOMIR BARAN

Literatura:

- Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C., 2007: ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.*, 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949;
- Altamimi Z., Sillard P., Boucher C., 1994: CATREF software: Combination and analysis of terrestrial reference frames, LAREG Technical Note SP08, Institut Géographique National, France;
- Beutler G., Bock H., Brockmann E., Dach R., Fridez P., Gurtner W., Habrich H., Hugentobler U., Ineichen D., Jaeggi A., Meindl M., Mervart L., Rothacher M., Schaer S., Schmid R., Springer T., Steigenberger P., Svehla D., Thaller D., Urschl C., Weber R., 2006: Bernese GPS software version 5.0. ed. Urs Hugentobler, Dach R., Fridez P., Meindl M., Univ. Bern, 464;
- Bruyninx C., Altamimi Z., Boucher C., Brockmann E., Caporali A., Gurtner W., Habrich H., Hornik H., Ihde J., Kenyeres A., Mäkinen J., Stangl G., van der Marel H., Simek J., Söhne W., Torres J.A., Weber G. (in press): The European Reference Frame: Maintenance and Products, IAG Symposia Series „Geodetic Reference Frames”, Springer;
- Ferland R., 2006: IGSMAIL-5447: Proposed IGS05 Realization, 19 Oct 2006;
- Figurski M., 2007: System monitorowania sieci polskich stacji referencyjnych GPS, cz. I. Sieci GPS do kontroli, *GEODETA 6/2007*;
- Kenyeres A., Bruyninx C., 2004: EPN coordinate time series monitoring for reference frame maintenance, *GPS Solution*, Vol. 8/4, 2004;
- Menge F., Seeber G., Völkens C., Wübbena G., Schmitz M., 1998: Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV, paper presented at ION GPS-98, Inst. of Navig., Nashville, Tenn;
- Schmid R., Rothacher M., Thaller D., Steigenberger P., 2005: Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas: Impact on global GPS solutions and estimation of azimuthal phase center variations of the satellite antenna, *GPS Solutions*, 9, doi:10.1007/s10291-005-0134-x;
- Steigenberger P., Rothacher M., Dietrich R., Fritsche M., A. Rülke, S. Vey, 2006: Reprocessing of a global GPS network, *J. Geophys. Res.* doi:10.1029/2005JB003747.