

Zmierzch statycznego układu odniesienia w geodezji

Po co projekt ASG+?

Stacje ASG-EUPOS, stanowiąc jednorodną i stabilną osnowę geodezyjną, umożliwiają realizację systemu odniesień przestrzennych ETRS89 na terenie Polski z dokładnością poniżej 0,01 m dla położenia poziomego oraz 0,02 m dla wysokości. Konieczne jest jednak monitorowanie bieżących rozwiązań w celu wiarygodnej konserwacji układu ETRF2000.

Karolina Szafranek
Andrzej Araszkiwicz
Mariusz Figurski

W przeszłości współrzędne punktów osnowy geodezyjnej wyznaczone były raz i traktowane jako wartości stałe, niezmiennie. Obecnie osnowa realizowana za pomocą stacji permanentnych GNSS pozwala na wyznaczanie i aktualizację współrzędnych na podstawie ciągle gromadzonych obserwacji. W Polsce obowiązuje system ETRS89 i realizujący go układ ETRF2000, który jest przenoszony przez stacje ASG-EUPOS należące do sieci EPN i zagęszczany za pomocą pozostałych stacji ASG-EUPOS. Wiąże się to z wprowadzeniem wymagań dokładnościowych stawianych współrzędnym tych stacji.

• Rola techniki GNSS w tworzeniu układów odniesienia

Technika GNSS diametralnie zmieniła sposób definiowania i przede wszystkim realizacji globalnych systemów odniesienia. Wieloletnie obserwacje prowadzone na permanentnych stacjach GNSS stanowią podstawę wiarygodnego wyznaczenia nie tylko współrzędnych, ale także ich zmian w czasie, czyli prędkości. Sieci permanentne traktowane są jako czwarty, nieformalny segment GNSS (obok segmentów: kosmicznego, kontrolnego i użytkownika). Technika ta wnosi znaczący wkład w tworzenie globalnego układu odniesienia ITRF zarówno przez wykorzystanie rozwiązań z wybranych

stacji, jak i wartości naziemnych, lokalnych powiązań między różnymi technikami (*local ties*).

Permanentne obserwacje GNSS umożliwiły także stworzenie globalnego pola prędkości pozwalającego na weryfikację stosowanych do tej pory modeli teoretycznych. Globalne pole prędkości jest zagęszczane rozwiązaniami z sieci regionalnych (<http://epncb.oma.be/IAG/>) i lokalnych, takich jak EPN i ASG-EUPOS. To powoduje, że układy odniesienia stały się układami kinematycznymi lub quasi-kinematycznymi, a wiarygodne wyznaczenie prędkości poszczególnych punktów jest kluczowe dla konserwacji tych układów.

Stacje sieci globalnej IGS gromadzą obserwacje od 1 stycznia 1994 roku, stacje EPN od 1996 roku, a polska sieć ASG-EUPOS została uruchomiona 2 czerwca 2008 roku, choć niektóre stacje (m.in. wybrane należące do EPN) funkcjonowały już wcześniej. Dłuższe obserwacje oznaczają wyższą dokładność i wiarygodność wyznaczanych współrzędnych i prędkości. Są one mniej wrażliwe na okresowe nieprawidłowości pojawiające się na stacjach czy pojedyncze rozwiązania znacznie różniące się od pozostałych. Niestety, praktycznie każda wymiana anteny wiąże się z nieciągłością w szeregach czasowych rozwiązań i koniecznością ponownego wyznaczenia współrzędnych. W rejonach aktywnych sejsmicznie nieciągłości takie często są powodowane przez trzęsienia ziemi. Przyjmuje się, że do wyznaczenia wiarygodnych prędkości potrzeba co najmniej 30 miesięcy obserwacji. Dłuższy okres oznacza więcej danych zwiększających stabilność realizacji systemu odniesienia. Obserwacje prowadzone w sposób

ciągly pozwalają na konserwację układu odniesienia, czyli na ponowne wyznaczenie współrzędnych i ich monitorowanie. Bieżące rozwiązania stacji EPN publikowane są na stronie internetowej www.epncb.oma.be, a rozwiązania ASG-EUPOS na oficjalnej stronie systemu oraz na www.cgs.wat.edu.pl.

Prowadzenie obserwacji GNSS nie wymaga znaczących kosztów ani dużego zaangażowania, stąd wiele stacji funkcjonuje nieprzerwanie od ich uruchomienia. Stacje te są szczególnie cenne i przeważnie pełnią funkcję stacji realizujących układ globalny ITRF_{YY}/IGS_{YY}. Permanentne stacje o wiarygodnie wyznaczonych prędkościach doprowadziły do wprowadzenia do powszechnego użycia układów kinematycznych i quasi-kinematycznych, w których prędkość jest nie mniej ważna niż współrzędne stacji. Układ taki pozwala wyznaczyć współrzędne stacji na wybraną epokę przy założeniu liniowej zmiany współrzędnych. Jest to szczególnie istotne dla krajów, na terenie których występują znaczące ruchy litosfery.

Ważną cechą stacji GNSS jest ich referencyjność, czyli możliwość wyznaczenia pozycji względem nich. Stacje IGS umożliwiają wyrażenie współrzędnych sieci regionalnych GNSS w układzie globalnym ITRF_{YY}/IGS_{YY}, a stacje EPN w analogiczny sposób stanowią nawiązanie dla sieci narodowych i pozwalają wyznaczyć współrzędne w układzie europejskim ETRF_{YY}. Stacje ASG-EUPOS z kolei pełnią funkcję referencyjną dla pomiarów satelitarnych wykonywanych na terenie Polski. Oprócz konserwowania układu, ASG-EUPOS świadczy usługi umożliwiające proste określenie położenia punktów pomiarowych w układzie

odniesienia będącym realizacją ETRS89. Stacje ASG-EUPOS mogą stanowić nawiązanie pomiarów opracowywanych w trybie postprocessingu polegające na wspólnym opracowaniu plików obserwacyjnych ze stacji permanentnych i punktów pomiarowych oraz narzuceniu odpowiednich wag na współrzędne stacji nawiązania wyznaczone zgodnie z zaleceniami IGS i EUREF na podstawie wieloletnich obserwacji. Częściej jednak geodeci wykorzystują stacje nawiązania do wyznaczenia swojej pozycji w czasie rzeczywistym za pomocą techniki RTK przy uwzględnieniu serwisów wysyłanych przez system do odbiornika. Dokładność wyznaczenia współrzędnych maleje wraz ze wzrostem odległości od stacji referencyjnej, stąd usługa świadczona jest zwykle z wykorzystaniem kilku stacji referencyjnych (rozwiązanie sieciowe). Błędy współrzędnych stacji referencyjnych mają wpływ na dokładność współrzędnych wyznaczanych z wykorzystaniem tych stacji.

● ASG-EUPOS podstawową osnową kraju

Podczas XX Sympozjum EUREF (Gävle w Szwecji, 2010 r.) Podkomisja EUREF uchwaliła rezolucję zalecającą stosowanie układu ETRF2000 jako narodowych realizacji systemu odniesienia ETRS89. Zgodnie z tą rezolucją rozporządzenie Rady Ministrów w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych z 15 października 2012 r. (DzU z 2012 r., poz. 1247) wprowadziło do użycia geodezyjne układy odniesienia PL-ETRF2000 i PL-ETRF89. Nowy dokument wszedł w życie 29 listopada 2012 r. i zastąpił rozporządzenie o tej samej nazwie z 8 sierpnia 2000 r. (DzU nr 70, poz. 821) wprowadzające układ EUREF-89 będący rozszerzeniem ETRF89 na obszarze Polski w wyniku kampanii pomiarowej EUREF-POL 92, której rezultaty zostały zatwierdzone przez EUREF w roku 1994.

Według obowiązującego aktu układ PL-ETRF2000 tworzony jest przez sieć stacji permanentnych EPN (18 stacji na terenie Polski), jednak zgodnie z rozporządzeniem ministra administracji i cyfryzacji w sprawie osnów geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych z 14 lutego 2012 roku (DzU z 2012 r., poz. 352) osnowę fundamentalną stanowią stacje EPN jednocześnie należące do ASG-EUPOS (czyli z wyjątkiem stacji EPN: JOZE, KRAW i BOGO) o precyzyjnie wyznaczonych współrzędnych i ich zmianach w czasie (na 30 kwietnia 2013 roku 15 stacji na terenie Polski). Oznacza to, że układ PL-ETRF2000 stanowią nie tylko punk-

ty osnowy fundamentalnej. Przenoszenie układu PL-ETRF2000 na teren Polski jest realizowane przez sieć permanentnych stacji ASG-EUPOS.

Układ PL-ETRF89 (będący kontynuacją układu EUREF-89) tworzony jest przez 11 punktów EUREF-POL i wprowadzony został po to, aby nadal można było korzystać z punktów, których położenie zostało wyznaczone w tym układzie (punkty EUREF-POL i POLREF). Jest on przenoszony na obszar Polski i konserwowany za pomocą obserwacji GNSS poprzez sieć punktów podstawowej osnowy geodezyjnej, która została zdefiniowana w rozporządzeniu w sprawie osnów geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych. Akt ten wprowadza nową systematykę poziomych osnów geodezyjnych, dzieląc je na osnowę podstawową i szczegółową.

Współrzędne **osnowy poziomej podstawowej** wyznaczane są na podstawie pomiarów satelitarnych GNSS. Dzieli się ona na osnowę fundamentalną (w większości przenoszącą układ ETRF2000 na teren Polski) i osnowę bazową zagęszczającą ten układ. Osnowę fundamentalną tworzą stacje referencyjne systemu ASG-EUPOS, które należą do sieci stacji permanentnych EPN i których średnie błędy położenia nie

cyjnej (rok 2011) zdeterminowała epokę przyjętą dla układu odniesienia w Polsce (2011.0) – kilka dni temu do ASG wprowadzono już nowe współrzędne.

Szczegółowa osnowa pozioma jest zagęszczeniem podstawowej osnowy poziomej i służy do nawiązywania osnów pomiarowych i wykonywania szczegółowych pomiarów geodezyjnych. Do tej grupy zaliczone zostały punkty istniejącej osnowy spełniające założone kryteria dokładnościowe oraz nowo zakładane punkty, których średni błąd położenia względem punktów nawiązania po wyrównaniu jest mniejszy niż 0,07 m. Punkty te w większości zakładają się techniką satelitarną za pomocą obserwacji stacyjnych, wykorzystując jako nawiązanie stacje sieci ASG-EUPOS. Oznacza to, że wszelkie nieprawidłowości pojawiające się na stacjach permanentnych systemu będą miały wpływ na dokładność nowo zakładanych punktów osnowy. Wyznaczenie wiarygodnych współrzędnych ASG-EUPOS oraz konserwacja układu odniesienia polegająca na ciągłej lub okresowej ich kontroli jest niezbędna dla zapewnienia spójności osnowy (podstawowej i szczegółowej) w Polsce. Monitorowanie jest również niezbędne do

Wyznaczenie wiarygodnych współrzędnych oraz konserwacja układu odniesienia realizowanego przez stacje GNSS są szczególnie istotne w świetle obowiązujących w Polsce przepisów.

mogą przekraczać 0,01 m dla położenia poziomego i 0,02 m dla składowej wysokości. Kryteria te muszą być spełnione na poziomie systemu, aby użytkownik miał gwarancję otrzymania wiarygodnego produktu w postaci współrzędnych stacji referencyjnych przenoszących układ. Osnowa bazowa to pozostałe stacje ASG-EUPOS, a także punkty sieci EUREF-POL (11 punktów o współrzędnych wyznaczonych w 1992 roku z pomiarów satelitarnych), POLREF (348 punktów dowiązanych do EUREF-POL w latach 1994-95), punkty sieci Europejskiej Pionowej Sieci Odniesienia EUVN (62 punkty ze współrzędnymi wyznaczonymi w układzie ETRF_{YY} i wysokościami w europejskim systemie odniesienia EVRS07), punkty sieci astronomiczno-geodezyjnej oraz sieci wypełniającej. Ponieważ na tych punktach nie wykonuje się pomiarów permanentnych, nie mają one wyznaczonych prędkości, co spowodowało, że epoka wykonania pomiarów kampanii kalibra-

określenia bieżących współrzędnych stacji systemu i stwierdzenia, na ile są one zbliżone z wartościami katalogowymi.

Wykorzystanie techniki GNSS do wyznaczania współrzędnych osnów spowodowało zaprzestanie używania pojęcia „rzędowości” osnów. Współrzędne punktów wyznaczane są przy użyciu tych samych produktów referencyjnych (orbit precyzyjnych IGS typu *final* i parametrów ruchu obrotowego Ziemi) oraz wyrażone w tym samym układzie odniesienia – ITRF2008 przetransformowanym na ETRF2000 zgodnie z odpowiednimi procedurami (Boucher i Altamimi, 2011). Wykorzystanie techniki GNSS (pod warunkiem poprawnie wykonanego pomiaru i opracowania obserwacji) zapewnia spójność i jednorodność osnowy. Nadal osnowy dzieli się na klasy, czyli określa się ich znaczenie w pracach geodezyjnych i kartograficznych, kolejność włączania poszczególnych punktów do procesu wyrównywania, a także precyzyzuje

się dokładność wyznaczenia współrzędnych po wyrównaniu obserwacji. Według rozporządzenia osnowa podstawowa fundamentalna jest osnową 1. klasy, osnowa podstawowa bazowa jest osnową 2. klasy, a osnowa szczegółowa jest osnową 3. klasy. Podział ten oznaczony jest cyframi arabskimi, a nie rzymskimi, w odróżnieniu od dotychczas stosowanej konwencji.

Ważnym zagadnieniem pozostaje niednorodność osnowy związana z wykorzystaniem zarówno osnów założonych i konserwowanych metodami satelitarnymi, jak i tych, których współrzędne punktów zostały wyznaczone metodami klasycznymi. Zgodnie z rozporządzeniem ministra spraw wewnętrznych i administracji z 9 listopada 2011 roku w sprawie standardów technicznych wykonywania geodezyjnych pomiarów sytuacyjnych i wysokościowych oraz opracowywania i przekazywania wyników tych pomiarów do państwowego zasobu geodezyjnego i kartograficznego (DzU 2011 nr 263, poz. 1572) zaleca się, aby dane przestrzen-

• Wyznaczenie rozwiązania skumulowanego ASG-EUPOS

Strategia obliczeniowa zalecana dla wyznaczenia współrzędnych stacji wyrażonych w realizacji ETRS89 i zagęszczających sieć EPN opisana została w „Guidelines for EUREF Densifications” (Bruyninx i in., 2012). Mimo że w systemie ASG-EUPOS przyjęte zostaną współrzędne wyznaczone na podstawie rozwiązania epokowego (2011.0), to z uwagi na łączne opracowanie obserwacji ze stacji referencyjnych i tych wykonanych na punktach osnowy klasycznej Centrum Geomatyki Stosowanej WAT działające w ramach Krajowego Centrum Inżynierii Kosmicznej i Satelitarnej przeprowadza okresowe wyznaczenia współrzędnych skumulowanych. Współrzędne te oparte są na długookresowych obserwacjach prowadzonych na stacjach ASG-EUPOS, co pozwala wyznaczyć także ich zmiany w czasie, czyli prędkości stacji.

Dane do wyznaczenia rozwiązania skumulowanego stanowiły rozwiązanie tygodniowe sieci ASG-EUPOS w postaci plików SINEX z tygodni 1465-1712 (od 3 lutego 2008 r. do 3 listopada 2012 r., czyli ponad cztery i pół roku). Obliczenia wykonane zostały zaraz po opublikowaniu najnowszego rozwiązania EPN ETRF2000(R08) opartego na IGS08 (Kenyeres, 2012) i pokrywającego tygodnie GPS 834-1680 (EPN_A_IGS08_C1680). Wyznaczenie rozwiązania skumulowanego ASG-EUPOS będącego możliwie najbardziej wiarygodną realizacją systemu ETRS89 na terenie Polski przeprowadzone zostało analogicznie do procedury uzyskania nowej dystrybucji EPN. Jednolita strategia obliczeniowa, zastosowanie modeli używanych do opracowania sieci globalnej i regionalnej, orbit i parametrów ruchu obrotowego pochodzących z reprocessingu IGS oraz optymalna konfiguracja stacji nawiązania umożliwiły uzyskanie produktu referencyjnego spójnego z najnowszymi realizacjami systemów: globalnego IGS (IGS08) i regionalnego ETRS89 (ETRF2000(R08)).

Proces wyznaczenia rozwiązania referencyjnego składa się z dwóch etapów: opracowania obserwacji GPS w reżimie tygodniowym oraz połączenia tych rozwiązań w rozwiązanie skumulowane z uwzględnieniem pełnych macierzy wariancyjno-kowariancyjnych rozwią-

zań tygodniowych. Rozwiązanie takie stanowi podstawę modułu monitorowania współrzędnych stworzonego w celu bieżącej kontroli jakości referencyjnej funkcji systemu.

Strategia opracowania obserwacji GNSS oparta została na zaleceniach IGS i EUREF. Dane stanowiły dobowe pliki RINEX zawierające obserwacje ze wszystkich stacji ASG-EUPOS z rozdzielczością czasową 30 sekund. Opracowanie obserwacji GPS zostało wykonane w programie Bernese 5.0 (Dach i in., 2007). Do obliczeń wykorzystano modele i parametry stosowane przez centra analiz IGS i EPN. Z uwagi na znaczącą refrakcję zastosowano parametr odrzucający obserwacje z satelitów położonych na wysokości mniejszej niż 3° nad horyzontem i wagowanie obserwacji przy użyciu funkcji $\cos(z)$, gdzie z oznacza odległość zenitalną. Obliczenia opierały się na obserwacjach fazowych i równaniach podwójnych różnic, które umożliwiły wyeliminowanie błędów zegarów satelitów i odbiorników. Wykorzystano ostateczne orbity satelitów i parametry ruchu obrotowego Ziemi pochodzące z opracowania sieci globalnej IGS (z reprocessingu oraz ostatecznych produktów z bieżących obliczeń). Wszystkie obserwacje zostały przeliczone przy uwzględnieniu modeli anten spójnych z układem IGS08 na podstawie wartości z pliku igs08.atx wprowadzonego od tygodnia GPS 1632. Nieuwzględnienie tych modeli w opracowaniu wcześniejszych obserwacji skutkowałoby nieciągłościami w szeregach czasowych współrzędnych.

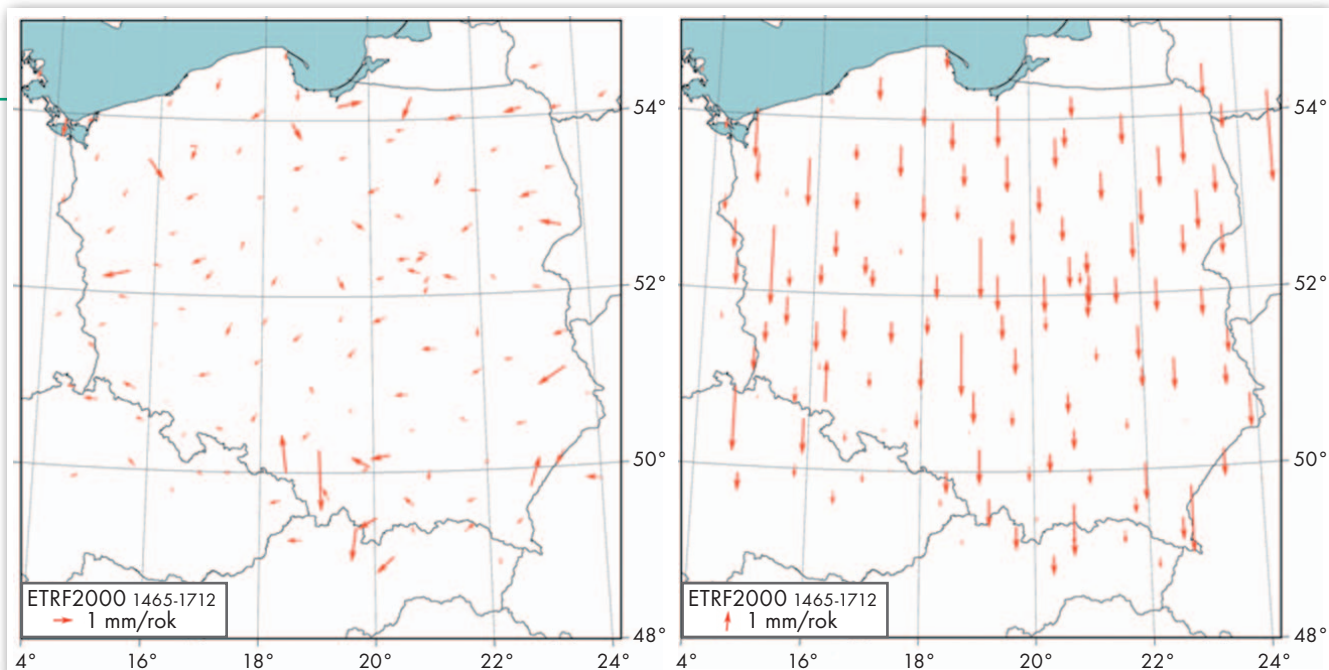
Przeniesienie układu zostało realizowane poprzez nałożenie warunków na parametry translacji zbioru stacji nawiązania. Strategia uwzględniająca modele, parametry i produkty (orbity, parametry ruchu obrotowego i współrzędne stacji nawiązania) najwyższej jakości, zgodne z opracowaniami układów globalnych i regionalnych, umożliwiła uzyskanie wyników w pełni spójnych z rozwiązaniami sieci realizujących układy IGS_{YY}/ITRF_{YY} oraz ETRF_{YY} i odniesionych do tych samych wartości referencyjnych. W rezultacie otrzymano rozwiązania tygodniowe (z połączenia rozwiązań dobowych) w postaci plików w formacie SINEX, które następnie wykorzystano do wyznaczenia rozwiązania skumulowanego.

Drugi etap polegał na połączeniu rozwiązań tygodniowych za pomocą programu CATREF. Program CATREF (Altamimi i in., 2004) służy przede wszystkim do opracowania obserwacji różnych technik satelitarnych i kosmicznych (GPS, SLR, VLBI, DORIS) oraz tworzenia globalnych układów odniesienia (np. ITRF_{YY}). W tym przypadku na podstawie tygodniowych



Rys. 1. Stacje nawiązania wykorzystane do opracowania sieci ASG-EUPOS w układzie ETRF2000(R08)

ne objęte bazami danych wymienionymi w art. 4 ust 1a i 1b ustawy z 17 maja 1989 r. Prawo geodezyjne i kartograficzne (m.in. osnowy geodezyjne, grawimetryczne i magnetyczne oraz szczegółowe, przestrzenne dane katastralne, punkty geodezyjnej ewidencji sieci uzbrojenia terenu, obiekty topograficzne i ogólnogeograficzne) położone na obszarze opracowania harmonizować ze zbiorami danych uzyskanymi z precyzyjnego pozycjonowania GNSS za pomocą matematycznej transformacji z wykorzystaniem wybranych punktów dostosowania (§ 69). Dane pozyskane metodami satelitarnymi powinny być traktowane jako nadrzędne w stosunku do pozostałych.



Rys. 2. Prędkości poziome (po lewej) i pionowe (po prawej) stacji GNSS na terenie Polski lub w jej bezpośrednim sąsiedztwie wyrażone w układzie ETRF2000. Systematyczny efekt zauważalny dla prędkości pionowych związany jest z transformacją między układem IGS08 a ETRF2000

rozwiązań ASG-EUPOS zawierających współrzędne stacji wraz z pełnymi macierzami wariancyjno-kowariancyjnymi dokonano ich połączenia, w wyniku czego otrzymano rozwiązanie skumulowane (współrzędne i prędkości wszystkich stacji) odniesione do zadanej epoki odniesienia.

Uzyskane rozwiązanie wyrażone zostało w układzie ETRF2000(R08) za pomocą zbioru stacji EPN przenoszących układ. Stacje wykorzystywane do przenoszenia układu ETRF muszą być stacjami klasy A najbardziej aktualnej dystrybucji współrzędnych i prędkości skumulowanych EPN. Z tych stacji należy wybrać takie, które zapewnią najbardziej wiarygodne wyrażenie rozwiązania w danym układzie odniesienia. Zalecenia EUREF mówią, aby w przypadku opracowania sieci lokalnych uwzględnić możliwie najwięcej stacji EPN rozmieszczonych zarówno na obszarze tej sieci, jak i poza nim, odrzucając stacje o niskiej jakości rozwiązań. W przypadku sieci ASG-EUPOS pewnym ograniczeniem staje się niewielka liczba stacji EPN klasy A na wschodzie oraz kilka stacji charakteryzujących się dużą dyspersją rozwiązań czy też silnymi sezonowymi zaburzeniami. W celu znalezienia najlepszej konfiguracji stacji nawiązania (rys. 1) oraz oceny jej wpływu na wiarygodność rozwiązania ASG-EUPOS wykonano testy obliczeniowe przy użyciu kilku wariantów stacji przenoszących układ ETRF2000. Nawiązanie do układu ETRF2000 wykonane zostało przy użyciu metody minimalnych ograniczeń narzucanych na wszystkie parametry transformacji Helmerta i ich zmiany w czasie (14 parametrów) dla wybranych stacji przenoszących układ.

Podstawowy produkt opracowania to współrzędne wszystkich stacji i ich

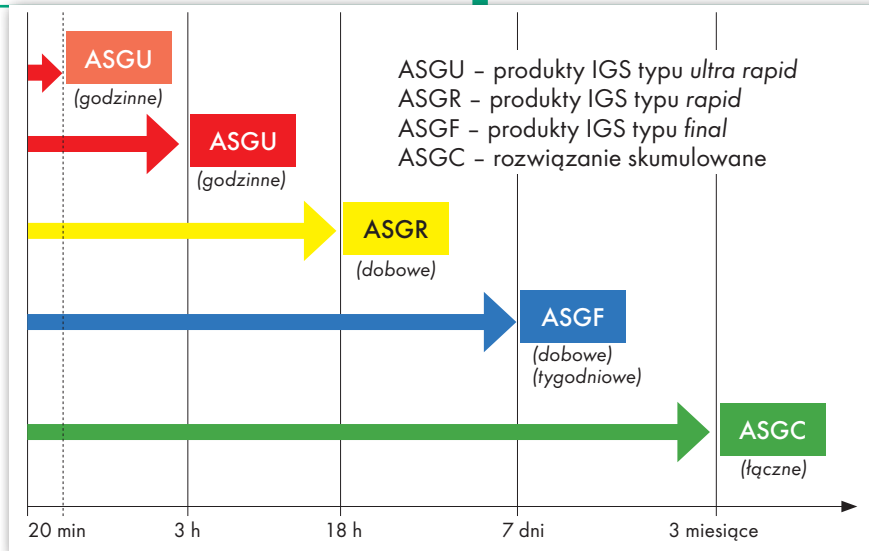
prędkości wyrażone w układach IGS08 i ETRF2000(R08) – rys. 2. Transformacja do układu ETRF2000(R08) rozwiązań pierwotnie wyrażonych w układzie IGS08 została wykonana zgodnie z procedurą opisaną w „Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign” (Boucher i Altamimi, 2011) przy założeniu, że globalne wartości parametrów transformacyjnych pomiędzy układami IGS08 a ITRF2008 są równe zero. Rozwiązanie referencyjne wyznaczono dla epoki odniesienia 2011.0 z uwagi na to, że epoka ta zostanie przyjęta przez GUGiK jako epoka odniesienia współrzędnych stacji ASG-EUPOS. Wyznaczone współrzędne traktowane są jako wartości referencyjne rozwiązań skumulowanych ASGC w module monitorowania współrzędnych stworzonym w ramach grantu rozwojowego „Budowa modułów wspomagania serwisów czasu rzeczywistego systemu ASG-EUPOS” (ASG+) realizowanego przez Wojskową Akademię Techniczną, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu i Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie (Figurski i in., 2011, http://www.cgs.wat.edu.pl/ASG_PLUS).

• Aktualność i wiarygodność współrzędnych stacji GNSS

Z uwagi na to, że stacje GNSS pełnią w Polsce funkcję podstawowej osnowy geodezyjnej, ich współrzędne muszą spełniać restrykcyjne kryteria dokładnościowe. Mimo że wartości prędkości śródpłytowych (wyznaczonych w układzie ETRF) na terenie Polski nie są duże w porównaniu z takimi krajami, jak Grecja czy Turcja, to niektóre ze stacji charakteryzują się na tyle znaczącymi prędkościami

mi, że nie powinny one zostać pominięte w procesie konserwacji układu odniesienia. Prędkości te mogą być spowodowane różnymi czynnikami, np. położeniem stacji na terenach górniczych czy też na dachach niestabilnych budynków. Problem ten nie ma negatywnego wpływu na realizację systemu odniesienia przez te stacje, pod warunkiem że prędkości są stabilne i dobrze wyznaczone (kryterium stabilności prędkości jest jednym z podstawowych warunków klasyfikowania stacji EPN).

Na podstawie uzyskanych prędkości (poziomych i pionowych) przeprowadzona została prognoza aktualności współrzędnych stacji ASG-EUPOS (Szafranek, 2012). Jako kryterium graniczne przyjęto wartości sprecyzowane przez rozporządzenie w sprawie osnow geodezyjnych, grawimetrycznych i magnetycznych dla osnowy fundamentalnej (0,01 m dla położenia poziomego i 0,02 m dla wysokości geodezyjnej). Kryteria dokładnościowe dla stacji ASG-EUPOS stanowiących osnowę podstawową bazową nie są w rozporządzeniu podane wprost, niemniej średni błąd nowo zakładanych punktów takiej osnowy nie powinien przekraczać odpowiednio 0,01 i 0,02 metra względem osnowy fundamentalnej, stąd takie kryteria zostały przyjęte do analizy wszystkich stacji ASG-EUPOS. Uzyskane wyniki pokazały, że większość stacji należących do systemu charakteryzuje się na tyle nieznacznymi prędkościami lokalnymi, że ich współrzędne będą spełniały założone kryterium przez następnych kilkanaście lat. Niektóre ze stacji będą jednakże wymagać korekty współrzędnych w ciągu kilku lat z uwagi na znaczące prędkości poziome bądź pionowe. W przeciwnym razie współrzędne katalogowe nie będą oddawały ich rzeczywistego położenia.



Rys. 3. Różne typy rozwiązań ASG-EUPOS w zależności od użytych produktów

Monitorowanie współrzędnych ze stacji referencyjnych jest niezbędne dla uzyskania pewności, że bieżące rozwiązania spełniają założone kryterium dokładnościowe. Należy również wziąć pod uwagę to, że prędkość stacji jest tylko jednym z czynników wpływających na wartość bieżących rozwiązań. Wyznaczenie innych, takich jak występowanie oscylacji rocznej, efektu związanego z zaleganiem pokrywy śnieżnej czy też fizycznego przemieszczenia anteny (przede wszystkim na terenach górniczych), jest możliwe jedynie dzięki ciągłemu monitorowaniu stacji referencyjnych. Dodatkowo każda zmiana sprzętu (zwłaszcza anteny) może powodować nieciągłość współrzędnych i wiązać się z koniecznością wprowadzenia nowych

wartości współrzędnych na modyfikowanej stacji.

Analizy pokazują, że wskutek prowadzenia ciągłych obserwacji GNSS na punktach osnowy należałoby zmienić powszechne podejście do osnowy. Jej współrzędne nie są wartościami stałymi, ale powinny być monitorowane w celu wychwycenia ich zmian związanych z ruchem stacji i poddawane okresowej korekcie np. w ramach modernizacji (przewidzianej dla osnow zakładanych metodami satelitarnymi raz na 10 lat), ażeby oddawały one możliwie najlepiej faktyczne położenie stacji w danym momencie. Prowadzi to do zmiany charakteru osnowy ze statycznego na quasi-kinematyczny. Ewentualna potrzeba wcześniejszej modyfikacji współrzęd-

nych katalogowych zostanie zauważona na podstawie monitorowania rozwiązań (współrzędnych) bieżących. Spełnienie wymaganych dokładności powinno zostać zapewnione poprzez okresowe zmiany współrzędnych poszczególnych stacji. Zalecane jest jednak wykonywanie ponownych opracowań całej sieci zgodnie ze standardami EUREF w celu uwzględnienia aktualnych obserwacji GNSS i monitorowanie rozwiązań bieżących.

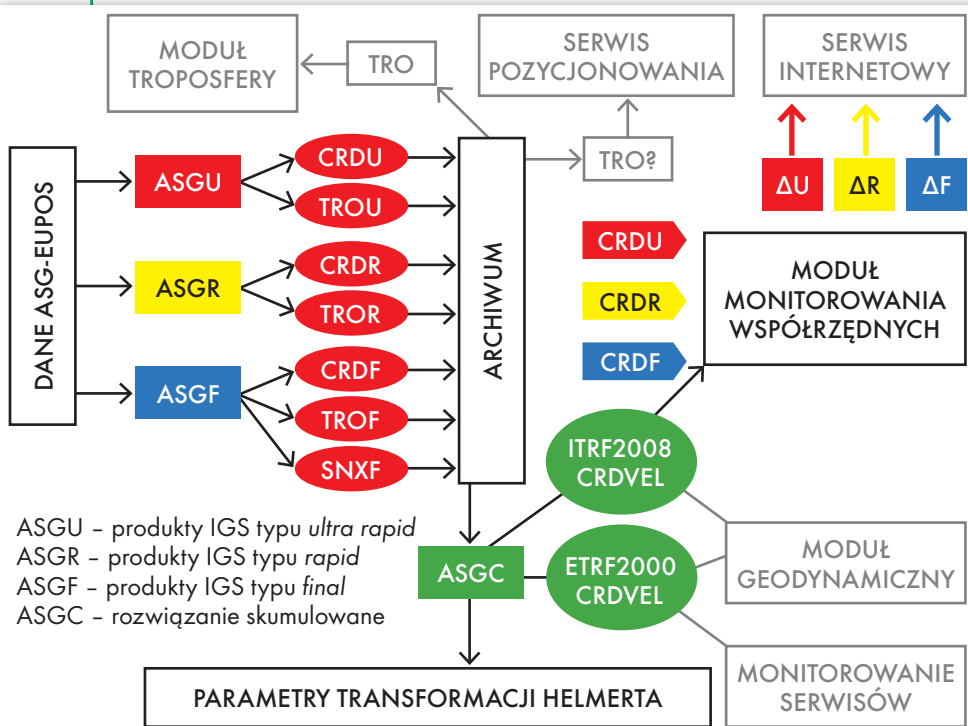
• Monitorowanie pracy stacji GNSS

CGS WAT we współpracy z UP we Wrocławiu i UWM w Olsztynie od 2010 roku realizuje wspomniany już grant rozwojowy, w ramach którego tworzony jest moduł monitorowania współrzędnych stacji GNSS. Podstawą tego modułu jest rozwiązanie skumulowane (referencyjne) stanowiące odniesienia dla rozwiązań bieżących uzyskiwanych z różnym opóźnieniem (Szafranek i in., 2013). Wszystkie typy rozwiązań przedstawiono na rys. 3.

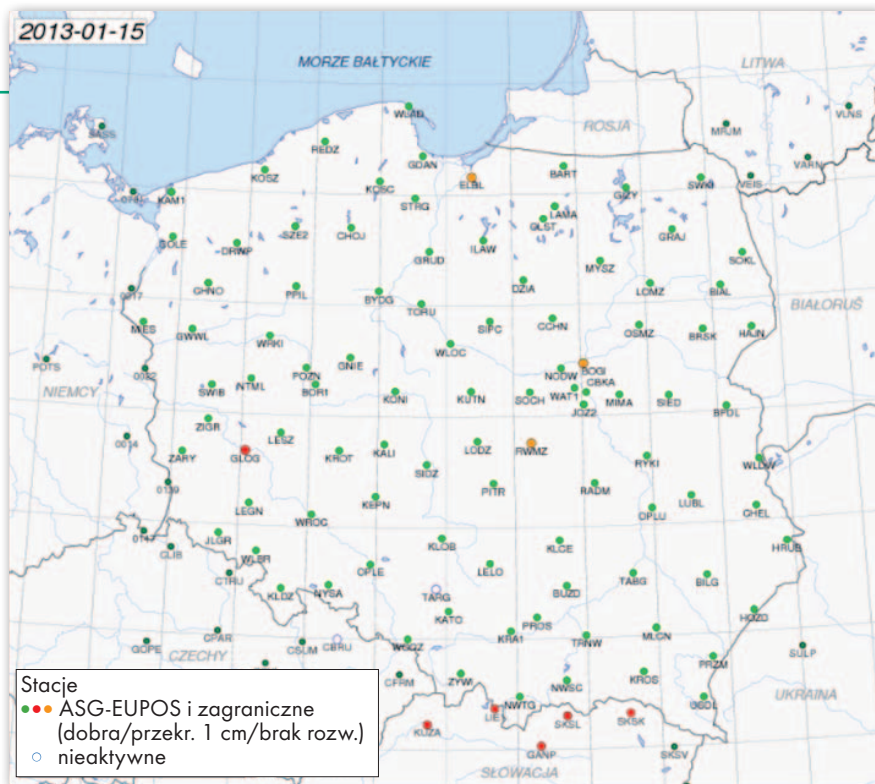
Skrót **ASGC** oznacza referencyjne rozwiązanie skumulowane uzyskiwane na podstawie długiego przedziału obserwacyjnego przy użyciu najdokładniejszych produktów (orbit i parametrów ruchu obrotowego Ziemi typu *final IGS*) wyrażone w zadanym układzie odniesienia na określonej epokę. Rozwiązanie to powinno być cyklicznie uzupełniane o nowe obserwacje umożliwiające wiarygodniejsze wyznaczenie prędkości stacji. Na rysunku przedstawiono ten okres jako 3 miesiące, ale częstotliwość kolejnych wyznaczeń jest sprawą dyskusyjną. W praktyce proponuje się wykonywać je raz do roku i za każdym razem, kiedy opublikowana zostanie nowa realizacja ETRS89. Współrzędne uzyskiwane w ramach wszystkich pozostałych rozwiązań porównywane są właśnie z ASGC.

Kolejny typ rozwiązania – **ASGF** – uzyskiwany jest również na podstawie produktów precyzyjnych, ale obliczenia prowadzone są na bieżąco, zaraz po ich opublikowaniu. Może ono być realizowane z dowolną rozdzielczością (w praktyce wykonuje się obliczenia tygodniowe bądź dobowe). W przypadku obliczeń prowadzonych w EPN Centra Analiz wyznaczają rozwiązania tygodniowe, a moduł monitorowania ASG-EUPOS korzysta z rozwiązań dobowych, czyli współrzędnych wyznaczonych dla każdej kolejnej doby. Opóźnienie takiego rozwiązania zależy od dostępności produktów IGS i wynosi przeważnie od 7 do 14 dni.

Rozwiązania oznaczone **ASGR** obliczane są z mniejszym opóźnieniem, gdyż wykorzystuje się tu szybkie (*rapid*) produkty IGS typu, które są dostępne w około 18 godzin po wykonaniu obserwacji. Współrzędne na podstawie tych produktów



Rys. 4. Schemat modułu monitorowania wykonywanego w ramach projektu ASG+



Rys. 5. Interaktywna mapa serwisu monitorowania współrzędnych stworzonego w ramach projektu ASG+. Rozwiązania z 15 stycznia 2013 r.

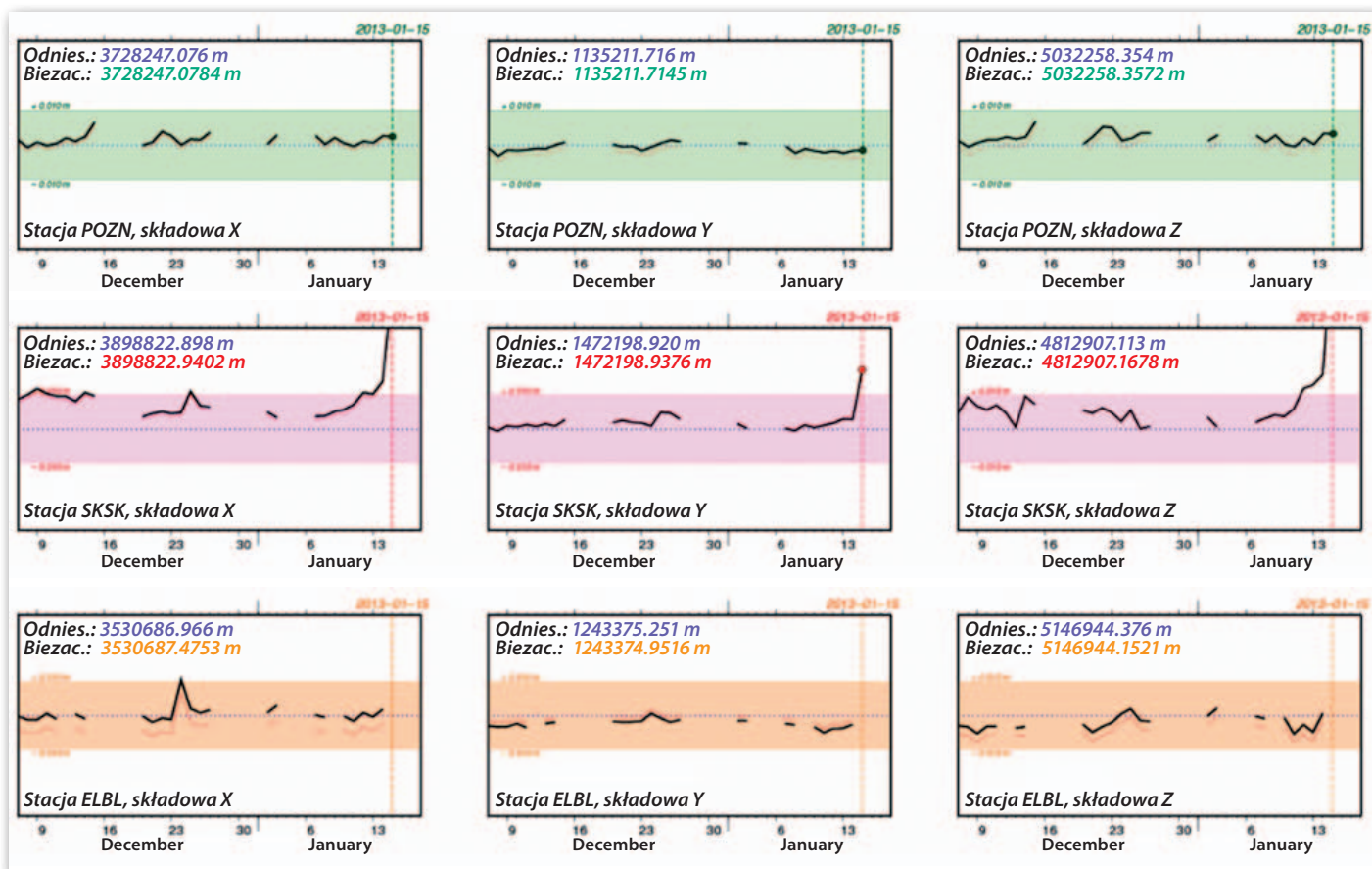
również wyznaczane są z rozdzielczością czasową jednej doby. Rozwiązania subdobowe (godzinne) ASGU korzystają z ultraszybkich produktów IGS (*ultra rapid*), co umożliwia wyznaczenie współrzędnych stacji z opóźnieniem niecałej godziny.

W praktyce opóźnienie to może dochodzić do trzech godzin i jest związane z dostępnością odpowiednich produktów. Rozwiązania ASGF z uwagi na wysoką dokładność, ale też związane z tym kilkudniowe opóźnienie, wykorzystywane

są głównie do analizy konserwacji układu odniesienia ETRF2000, i to właśnie te współrzędne zostały zastosowane do oceny pracy stacji. Rozwiązania ASGR i ASGU służą do monitorowania pracy stacji referencyjnych, gdyż są dostępne znacznie szybciej.

Na rys. 4 przedstawiono schemat działania modułu monitorowania wraz z innymi modułami projektu ASG+ zaznaczonymi kolorem szarym (modułem troposferycznym, modułem szybkiego pozycjonowania i modułem monitorowania serwisów ASG-EUPOS).

Pliki ze współrzędnymi (CRD) i parametrami troposfery (TRO) uzyskiwane z rozwiązań ASGU, ASGR i ASGF (tu także pliki SINEX) są archiwizowane. Na podstawie tygodniowych plików SINEX z rozwiązania ASGF tworzone jest rozwiązanie referencyjne ASGC wyrażone zarówno w układzie globalnym ITRF_{YY} lub IGS_{YY} (ostatnie rozwiązanie skumulowane oparte zostało na IGS08, bo ten układ posłużył do nawiązania sieci EPN), jak i ETRF2000 na wybraną epokę (w przypadku ASG-EUPOS jest to 2011.0). Wartości te służą do porównywania bieżących wyników z rozwiązań ASGU, ASGR i ASGC. Wyniki tego porównania publikowane są na stronie internetowej



Rys. 6. Szeregi czasowe rozwiązań ASGR dla stacji POZN, SKSK i ELBL. Kolor zielony oznacza, że różnica pomiędzy rozwiązaniem bieżącym a referencyjnym nie przekracza 1 centymetra dla żadnej ze składowych, kolor różowy oznacza przekroczenie tego kryterium (tu spowodowane jest to zaleganiem pokrywy śnieżnej), a kolor pomarańczowy – brak danych ze stacji

w postaci wykresów (http://www.cgs.wat.edu.pl/ASG_PLUS/). Schemat pokazuje również możliwość wykorzystania rozwiązania skumulowanego do badań geodynamicznych (m.in. analizy deformacji litosfery). Monitorowanie kolejnych wyznaczeń ASGF prowadzone jest także w postaci oceny wartości parametrów transformacji Helmerta wyznaczanych dla kolejnych rozwiązań tygodniowych względem rozwiązania ASGC.

Bieżące rozwiązania ASGR prezentowane są na stronie internetowej na interaktywnej mapie (rys. 5). Kolor zielony oznacza spełnienie założonego kryterium. Obecnie stosowane jest kryterium 1 centymetra dla wszystkich trzech składowych (X, Y, Z). Kolorem czerwonym zaznaczane są stacje, dla których ostatnie rozwiązanie przekroczyło zadane kryterium, a kolor pomarańczowy oznacza

jących dokładność bieżących rozwiązań (np. pokrywa śnieżna, ewentualna awaria sprzętu, zmiana anteny powodująca nieciągłość rozwiązań) mogących skutkować obniżeniem dokładności wyników pomiarów wykonywanych w odniesieniu do stacji ASG-EUPOS. Monitorowanie polegające na badaniu odstępstw rozwiązań bieżących od wartości referencyjnych pozwoli także określić moment, w którym niezbędna stanie się korekta współrzędnych z uwagi na przekroczenie kryterium dokładnościowego spowodowanego prędkością stacji. Umożliwi kontrolę funkcji referencyjnej systemu – tak długo, jak wspomiane wyżej kryteria dokładności są spełnione, zakłada się, że wartości katalogowe wiarygodnie oddają rzeczywiste położenie stacji, co oznacza gwarancję układu odniesienia dla korzystających z niego geodetów.

na obniżenie dokładności i wiarygodności uzyskiwanych współrzędnych. Potencjalnie niebezpieczna może być jednak sytuacja, kiedy na skutek tych samych czynników zewnętrznych kilka stacji wykazuje nieprawidłowości, np. związane z zalegającą pokrywą śnieżną. W takim przypadku uzyskane współrzędne mogą być dotknięte błędem systematycznym. Efekt ten nie może być wyeliminowany, ale na podstawie analizy bieżących rozwiązań można go monitorować i świadomie ocenić jego wpływ na pomiary. Konieczne jest także monitorowanie rozwiązań pod kątem długookresowych zmian współrzędnych wynikających z prędkości w układzie ETRF2000 oraz oscylacji występujących w szeregach rozwiązań. Opisane monitorowanie stanowi propozycję standardu kontroli sieci permanentnych GNSS.

dr Karolina Szafranek,
Andrzej Araszkiewicz,

dr hab. Mariusz Figurski, prof. WAT
Centrum Geomatyki Stosowanej
Wojskowej Akademii Technicznej

Należałoby zmienić podejście do osnowy. Jej współrzędne nie są wartościami stałymi, ale powinny być monitorowane w celu wychwycenia ich zmian związanych z ruchem stacji i poddawane okresowej korekcie, aby oddawały możliwie najlepiej faktyczne położenie stacji w danym momencie.

Niniejszy artykuł powstał w ramach realizacji projektu rozwojowego NCBiR pt. „Budowa modułów wspomagania serwisów czasu rzeczywistego systemu ASG-EUPOS (ASG+)” (umowa nr NR09-0010-10/2010)

Literatura

- Altamimi Z., P. Sillard, C. Boucher (2004): CATREF Software: Combination and Analysis of Terrestrial Reference Frames, Publication IAREG SP08, Institut Géographique National, 2004;
- Boucher C., Altamimi Z. (2011): Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign (v.8), (<http://etr89.ensg.ign.fr/memo-V8.pdf>), 2011;
- Bruyninx C., Altamimi Z., Caporali A., Kenyeres A., Lidberg M., Stangl G., Torres J.A. (2012): Guidelines for EUREF Densifications, 2012;
- Dach R., U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl (Eds) (2007): Bernese GPS Software Version 5.0. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, 2007;
- Figurski M., Bogusz J., Bosy J., Kontny B., Krankowski A., Wielgosz P. (2011): ASG+: project for improving Polish multifunctional precise satellite positioning system, Reports on Geodesy No 2 (91), pp. 51-58, 2011;
- Kenyeres A. (2012): The implementation of IGS08 in the EPN ETRS89 maintenance products, (ftp://epncb.oma.be/pub/station/coord/EPN/IGS08_densification_V4.pdf), 19 października 2012;
- Szafranek K. (2012): The problem of temporal validity of reference coordinates in the context of reliability of the ETRS89 system realization in Poland, Artificial Satellites Vol. 47, No. 4, pp. 177-188, DOI: 10.2478/v10018-012-0023-9, 2012;
- Szafranek K., Bogusz J., Figurski M. (2013): GNSS reference solution for permanent station stability monitoring and geodynamical investigations: the ASG-EUPOS case study, Acta Geodynamica et Geomaterialia (Acta Montana) Vol. 10, Nr 1 (169), 2013, pp. 67-75, 2013;
- Strona internetowa projektu ASG+ http://www.cgs.wat.edu.pl/ASG_PLUS

brak danych ze stacji. Po wyborze każdej ze stacji pojawiają się wykresy rozwiązań ASGF i ASGR.

Przykłady wykresów rozwiązań ASGR pokazane zostały na rys. 6. Przedstawiają one zmiany współrzędnych geocentrycznych w układzie ETRF2000 zredukowane na epokę 2011.0 (kolor czarny) oraz na epokę obserwacji (kolor pomarańczowy). Jako współrzędne odniesienia przyjęto rozwiązania skumulowane ASGC wyrażone w ETRF2000 na epokę 2011.0. Kolor ostatniego wyznaczonego rozwiązania (zielony lub czerwony) wskazuje, czy kryterium dla tego rozwiązania zostało spełnione.

• ASG-EUPOS wymaga monitorowania

Analiza pracy stacji ASG-EUPOS dowodzi, że system ten stanowi jednorodną, stabilną osnowę geodezyjną i umożliwia realizację systemu odniesień przestrzennych ETRS89 na terenie Polski z dokładnością poniżej 0,01 m dla położenia poziomego oraz 0,02 m dla wysokości geodezyjnej. Konieczne jest jednak monitorowanie bieżących rozwiązań w celu wiarygodnej konserwacji układu ETRF2000 i oceny wpływu czynników zmniejsza-

Co pewien czas, aby wykorzystać zgromadzony materiał obserwacyjny, zaleca się wykonywanie powtórnych opracowań całej sieci na wzór obliczeń wykonywanych dla EPN. Opracowania takie powinno się wykonywać zawsze po opublikowaniu nowej wersji układu ETRF2000 opierającej się na kolejnych realizacjach ITRS lub IGS. W przypadku osnowy aktywnej, jaką jest ASG-EUPOS, stosunkowo łatwo wprowadzić można nowe wartości współrzędnych, gdyż korekta taka dokonywana jest przez Centrum Zarządzające ASG-EUPOS i nie wymaga ingerencji użytkownika. Należy pamiętać, że dokładność pomiarów uzyskiwanych w nawiązaniu do stacji referencyjnych zależy jednak od wielu innych czynników (m.in. sposobu wykonania pomiaru i warunków obserwacyjnych).

Pojedyncze odstające rozwiązania ze stacji nie powinny mieć negatywnego wpływu na wykonywane pomiary z uwagi na to, że pozycja wyznaczana za pomocą ASG-EUPOS odnoszona jest przeważnie do kilku stacji (rozwiązanie sieciowe), a nie do pojedynczej. W takim przypadku potencjalne chwilowe problemy jednej stacji nie powinny wpłynąć znacząco