

System monitorowania sieci polskich stacji referencyjnych GPS, część II -

ALGORYTMY

Czy w Polsce, gdzie stale podkreśla się potrzebę budowy społeczeństwa informacyjnego, ktoś przewidział stworzenie baz z obserwacjami GNSS ze stacji referencyjnych do powtórnego, wielokrotnego wykorzystania? I czy będą one ogólnodostępne i bezpłatne?

MARIUSZ FIGURSKI

W części I artykułu przedstawiłem charakterystykę sieci stacji permanentnych IGS i EPN. Stanowią one standard, który stał się podwaliną opracowania koncepcji monitorowania stacji referencyjnych GNSS w Polsce. Zwróciłem również uwagę na fakt, że monitorowanie może odbywać się bardzo szybko, kilkadziesiąt minut po zakończeniu obserwacji, lub z opóźnieniem nawet kilkudniowym. Zależy to m.in. od dostępności różnych typów parametrów ruchu obrotowego Ziemi i efemeryd precyzyjnych

IGS. Kolejny temat do dyskusji dotyczy strategii opracowania sieci GNSS oraz parametrów brzegowych i sposobu interpretacji wyników. To wszystko implikuje następane problemy, które muszą zostać omówione w celu lepszego zrozumienia natury rzeczy.

Poniższy tekst stanowi syntetyczny przegląd obszarów, które wiążą się ze stacjami referencyjnymi i ich monitorowaniem. Dokładne ich poznanie i zrozumienie współzależności pomiędzy wydajnością obliczeniową komputerów, stosowanymi algorytmami i modelami opisu zjawisk fizycznych może zagwarantować, że przyjęte rozwiązanie będzie optymalne pod względem precyzji

i dokładności, a wyniki (np. współrzędne stacji) będą porównywalne z alternatywnymi rozwiązaniami.

Należy pamiętać, że większość parametrów wejściowych i modeli może być modyfikowana w funkcji czasu. Ma to odzwierciedlenie w większości opublikowanych wyników opracowań z zakresu geodezji satelitarnej, gdzie z reguły najnowsze publikacje zastępują poprzednie. Dzieje się tak dlatego, że rozwiązania (współrzędne stacji, parametry ruchu obrotowego Ziemi itp.) uzyskuje się z globalnego dopasowania modeli do istniejących obserwacji, a używane modele i metody analizy danych ciągle są udoskonalane. Na świecie większość zbiorów danych obserwacyjnych z sieci IGS czy EPN uważa się za domenę publiczną i udostępnia zainteresowanym badaczom. Podejście takie nie jest filantropią, ale przemyślanym działaniem wynikającym z dobrze pojętego interesu osób bezpośrednio zaangażowanych w badania. Liczą one, że niezależne analizy poprawią powszechne zaufanie do przedstawianych wyników. Przejdźmy jednak do meritum problemu.

● STRATEGIE OPRACOWANIA SIECI GPS

Mówiąc o strategii opracowania sieci GNSS, musimy brać pod uwagę nie tylko parametry brzegowe i początkowe, ale przede wszystkim sposób, w jaki zostanie zrealizowany układ odniesienia. Realizacja ziemskiego układu odniesienia wymaga zdefiniowania: skali, orientacji i środka układu. Skala zdefiniowana jest przez określenie stałych: prędkości światła i grawitacji **GM**. W przypadku sieci globalnej IGS geometrycznie układ reali-

STRESZCZENIE: System monitorowania sieci polskich stacji referencyjnych -

część II. W pracy przedstawiono założenia teoretyczne, algorytmy i strategie obliczeniowe wykorzystane w systemie monitorowania stacji referencyjnych GNSS. Pokazano sposoby nawiązywania sieci geodezyjnych zakładanych technikami satelitalnymi w skali globalnej i implementację w sieciach regionalnych i lokalnych. Jako przykład pokazano algorytm transformacji z układu ITRF do ETRF stosowany w sieci EPN dla nowej realizacji globalnego systemu odniesienia ITRS 2005. Zasadnicza część artykułu poświęcona została architekturze systemu monitorowania stacji referencyjnych POL_EPN, w której uwypuklone zostały trzy zasadnicze moduły funkcjonalne oparte na programie Bernese 5.0. Sterowanie systemem obliczeniowym wykonano z wykorzystaniem modułu BPE i systemu kolejowania klastra FENIX Torque 2.0. Omówione zostały również parametry brzegowe i modele zasilające moduły obliczeniowe systemu.

ABSTRACT: Polish reference stations monitoring system - part II. In this work the theoretical assumptions, algorithms and computing strategies which are used for GNSS reference stations monitoring system were shown. Also the methods of reference of geodetic networks established by satellites techniques in global scale and implementation in local and regional networks were described. As an example was shown the algorithm of transformation from ITRF to ETRF reference frames used in EPN for new realisation of global reference system ITRS 2005. The main part of this article was connected with the architecture of monitoring of reference POL_EPN stations, in which three main functional modules based on Bernese 5.0 programme were emphasized. Controlling unit of this computing system had been done with BPE module and cluster queuing system FENIX Torque 2.0. Also the edge conditions and models feeding counting modules of the system were described.

artykuł recenzowany

I STRATEGIE

zuje się poprzez wybranie jednorodnie rozmieszczonych na kuli ziemskiej stacji permanentnych GNSS, związanych ściśle z litosferą, których wektory tworzą wielościan foremny. Podejście powyższe wyklucza możliwość włączenia wszystkich stacji, dlatego z każdej sieci zagęszczającej wybierane są najlepsze z nich (pod względem jakości obserwacji i stabilności zmian współrzędnych). Tak jest np. w przypadku sieci EPN, z której wybierane są stacje permanentne charakteryzujące się najlepszymi i najdokładniejszymi wynikami wyznaczonych parametrów (np. współrzędnych i prędkości stacji). W konsekwencji tego podejścia Ziemia sztywna, która jest realizowana przez środek tego wielościanu, będzie się przesuwiała w zależności od aktualnego położenia środka masy Ziemi. Natomiast naziemna sieć odniesienia będzie realizowana poprzez środek tego wielościanu i długości wektorów. Zadanie to można wykonać, stosując w zasadzie dwa podejścia w procesie analizy obserwacji GNSS, z których jedno zakłada **wykorzystanie punktów fundamentalnych**, a drugie – **brak punktów fundamentalnych**.

W pierwszym przypadku współrzędne kilku wybranych stacji (punkty fundamentalne) są związane z wcześniej zdefiniowanym układem odniesienia. Aby wyznaczyć współrzędne pojedynczego punktu, nie trzeba wyznaczać wektorów do wszystkich pozostałych punktów, lecz tylko do dowolnie wybranych trzech niekoliniarnych. Jeśli pozycja tych trzech stacji jest precyzyjnie wyznaczona, wówczas pozycja pozostałych punktów w tak skonstruowanej sieci jest stała. Można wówczas mówić o przeniesieniu układu na punkty nowo wyznaczane, które będą realizować układ odniesienia zdefiniowany przez punkty fundamentalne. Rozwiązanie takie redukuje liczbę stopni swobody do 9. Ponieważ odległości pomiędzy punktami fundamentalnymi są stałe, liczba stopni swobody redukuje się do 6. Oznacza to, że w rozważanym przypadku wystarczy przyjąć jako stałe: trzy składowe kar-

tezjańskie na pierwszej stacji, dwie na drugiej i tylko jedną na trzeciej. W praktyce przyjmuje się jednak współrzędne z przynajmniej trzech globalnych stacji permanentnych GPS. Niestety, prostota tego rozwiązania niesie ze sobą pewne problemy. Współrzędne niektórych stacji globalnych przyjętych jako fundamentalne mogą zawierać błędy, które w procesie opracowania zostaną przeniesione do rozwiązania (np. wyznaczenie współrzędnych). Innym problemem jest realizacja stabilnego układu odniesienia w stosunku do poszczególnych epok pomiarowych, np. w przypadku analizy zmian współrzędnych w funkcji czasu. Jeżeli w czasie obejmującym analizowany ciąg współrzędnych jedna lub więcej stacji fundamentalnych zostanie wykluczona z obliczeń, a na ich miejsce wejdą inne, będzie to oznaczało realizację zupełnie innego układu odniesienia. Innymi słowy, wewnętrzna spójność takiego układu będzie trudna do utrzymania.

W celu uniknięcia tych problemów zalecana jest alternatywna strategia analizy sieci. Zakłada ona swobodne powiązanie pomiędzy wszystkimi stacjami sieci. Wymagane jest również równomierne rozmieszczenie stacji śledzących w sieci, co daje większą spójność wewnętrzną rozwiązania. Część rotacyjna będzie zorientowana wokół początku układu (podobny sposób jest stosowany w modelu grawitacyjnym). Początek nie będzie jednak realizowany przez współrzędne przyjęte a priori, tak jak w poprzednim przypadku. Metoda ta w literaturze nazywana jest rozwiązaniem „Free Network” i realizuje quasi-swobodne wyrównanie sieci. Współrzędne uzyskane w wyniku takiego wyrównania muszą być transformowane do wcześniej zdefiniowanego układu odniesienia (np. ITRF). Dużą zaletą tego podejścia jest fakt, że rozwiązanie jest wolne od błędów poszczególnych stacji. Jest to istotne w przypadku transformacji układów odniesienia, ale z drugiej strony błędy tego typu mogą wpłynąć negatywnie na sam proces transformacji. Transformacja wyników wyrównania swobodnego do



FOT. MAREK PUDKO

układu np. ITRF może być realizowana według następującej zależności:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & s & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

gdzie:

$[x, y, z]$ – współrzędne wyznaczone,
 $[X, Y, Z]$ – współrzędne w ukl. ITRF,
 $[T_x, T_y, T_z]$ – przesunięcie pomiędzy środkami układów,
 s – zmiana skali,
 $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]$ – składowe orientacji przestrzennej.

Obydwie przedstawione metody nie są wolne od błędów, dlatego w praktyce stosowane są zamiennie i na każdym poziomie, czy to w sieciach EPN, ASG-PL, ASG-EUPOS, czy wprost w osnowie realizacyjnej. Większość dostępnych na rynku profesjonalnych programów posiada możliwość wykonania obliczeń według dwóch prezentowanych powyżej strategii.

Strategia wykorzystująca punkty fundamentalne została zastosowana do reali-

zacji europejskiego układu odniesienia. Implikuje to potrzebę bardzo wnikliwej analizy stabilności pracy stacji w długim okresie czasu, niejednokrotnie kilku lat, stacji, które mogą pretendować do roli punktów fundamentalnych. Zadanie takie w Europie realizuje sieć EPN. Dodajmy, że nie przyjmuje się bezbłędności współrzędnych punktów fundamentalnych, zakładając minimalny błąd średni rzędu 0,1 mm. Sieć wówczas powinna być wpasowana w granicach założonych błędów średnich.

Istotny wpływ na wybór punktów fundamentalnych mają także redefinicje układu ITRF, które wynikają z dynamicznego rozwoju technik i metod pomiarowych geodezji satelitarnej (Kryński i Rogowski, 2004). Z reguły w momencie redefinicji układu odniesienia przeprowadzana jest weryfikacja punktów fundamentalnych sieci EPN, ale takie zmiany wykonuje się również w trakcie obowiązującej realizacji układu ITRF. Z taką sytuacją mieliśmy do czynienia, gdy obowiązywały układy ITRF96, ITRF97 i ITRF2000, a zmiany wynikały m.in. ze wzrostu błędów współrzędnych punktów fundamentalnych. Ponieważ każda zmiana liczby punktów fundamentalnych powoduje zmianę realizacji układu odniesienia, operacja ta musi być poprzedzona wieloma testami i analizami. Do ich wykonania niezbędne są dane z systemu monitorowania stabilności rozwiązań sieci EPN. Pełny przegląd zmian punktów fundamentalnych w sieci EPN można znaleźć na stronach internetowych (EPN, 2007).

● TRANSFORMACJA WSPÓLRZĘDNYCH Z UKŁADU ITRF DO ETRF

Opisana wyżej metoda pozwala przezniesić wysokodokładne współrzędne punktów fundamentalnych na wyznaczone punkty sieci. Prześledźmy teraz praktyczne aspekty przedstawionych rozwiązań teoretycznych. Algorytm zaprezentowany poniżej opracowano w IGN i za pośrednictwem EPN stał się standardem w Europie (Boucher i Altamimi, 1992). Większość sieci narodowych zakładanych z wykorzystaniem technik satelitarnych GNSS jest opracowywana zgodnie z nim. Algorytm ten realizowany jest w trzech etapach.

1. Obliczenie współrzędnych katalogowych ITRF na epokę obserwacji. Układ ITRF zdefiniowany jest poprzez współrzędne punktów realizujących system odniesienia ITRS oraz zmiany w czasie współrzędnych tych punktów (prędko-

ści) (Figurski, 2001). Współrzędne punktów i prędkości są katalogowane na określony moment czasu (epokę odniesienia t_0) danej realizacji układu ITRF. Natomiast obliczenia obserwacji muszą być wykonane na epokę obserwacji t_c , czyli musimy znać wartości współrzędnych punktów fundamentalnych na moment obserwacji, w którym wykonane zostały pomiary. Postępowanie takie jest pośrednio wymuszone przez efemerydy precyzyjne satelitów, które realizują układ ITRF lub IGS (układ IGS jest zdefiniowany tylko na podstawie obserwacji GPS w sieci IGS, a ITRF – z kolokacji technik pomiarowych VLBI, SLR, GPS i DORIS) na moment czasu t_c . Współrzędne punktów fundamentalnych na epokę obserwacji przeliczane są przy użyciu wektorów prędkości V_{ITRF} których składowe można uzyskać np. z katalogów układu ITRF. Do definicji wektorów prędkości stacji spoza katalogów można użyć modelu geofizycznego ruchu płyt kontynentalnych, np. NUVEL NNR-1A. Drugi przypadek dotyczy punktów nowych lub tych, co do których są wątpliwości dotyczące poprawności wyznaczonych prędkości. Inną możliwością jest wyznaczenie przybliżonych współrzędnych punktów z wykorzystaniem opracowania metodą PPP – *Precise Point Positioning* (Zumberge i in., 1997). W konsekwencji nowe współrzędne dla epoki obserwacji t_c wyznaczone są przy użyciu następującej formuły:

$$X_{ITRF}(t_c) = X_{ITRF}(t_0) + V_{ITRF}(t_c - t_0)$$

Współrzędne wyznaczone zgodnie z powyższą formułą przyjmowane są a priori do procesu obliczeniowego.

2. Transformacja współrzędnych do układu ETRF89. Wyznaczone współrzędne w układzie ITRF na epokę obserwacji stanowią dane wejściowe do ich przeliczenia na system ETRS89 na drodze transformacji. Operacja ta wymaga wprowadzenia systematycznego przesunięcia układu ITRF względem ETRF89 z zachowaniem skali układu ITRF. Tak sformułowane zadanie realizowane jest według następującej zależności:

$$\begin{bmatrix} X_{ETRF89} \\ Y_{ETRF89} \\ Z_{ETRF89} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & s & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{bmatrix} (t_c - 1989.0)$$

TAB 1. PARAMETRY TRANSFORMACJI DLA KOLEJNYCH REALIZACJI UKŁADU ITRF DO ETRF

ITRFYY	T_x [cm]	T_y [cm]	T_z [cm]	$\dot{\omega}_x$ [mas/y]	$\dot{\omega}_y$ [mas/y]	$\dot{\omega}_z$ [mas/y]
89	0	0	0	0.110	0.570	-0.710
90	1.9	2.8	-2.3	0.110	0.570	-0.710
91	2.1	2.5	-3.7	0.210	0.520	-0.680
92	3.8	4.0	-3.7	0.210	0.520	-0.680
93	1.9	5.3	-2.1	0.320	0.780	-0.670
94	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
96	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
97	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
00	5.4	5.1	-4.8	0.081	0.490	-0.792
05	5.6	4.8	-3.7	0.054	0.518	-0.781

Składowe wektora translacji $[T_x, T_y, T_z]$ reprezentują systematyczne przesunięcie początku układu. Druga część równania reprezentuje zmiany współrzędnych wywołane ruchem płyty od epoki 1989.0 do epoki obserwacji t_c .

Prędkości rotacji odpowiadają tym z modelu NUVEL1A – NNR, ale skorygowanym o różnicę prędkości rotacji pomiędzy ITRF a NUVEL. Parametry transformacji pomiędzy układem ITRF i systemem ETRF89 publikowane są przez komisję EUREF dla każdej kolejnej realizacji układu ITRF [<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/>]. W tabeli 1 podane zostały współczynniki transformacji między układem ITRF i ETRF dla kolejnych realizacji systemu ITRS. Kolorem ciemniejszym zaznaczono obowiązujące współczynniki transformacji dla układu ITRF2005.

3. Redukcja współrzędnych do epoki 1989.0. Ostatnim krokiem jest skorygowanie współrzędnych do epoki 1989.0 poprzez wprowadzenie poprawki ze względu na polodowcowy charakter europejskiej platformy tektonicznej i lokalne prędkości punktów. Zależność uwzględniającą tę redukcję można zapisać następująco:

$$X_{ETRF}(1989.0) = X_{ETRF}(t_c) + V_{ETRF}(1989.0 - t_c)$$

Wektory prędkości wynikające z tych zmian dla poszczególnych stacji są niewielkie z wyjątkiem Skandynawii, gdzie ruchy są znaczące (kilka milimetrów w ciągu roku). Wyłączając jednak Skandynawię, można przyjąć, że $V_{ETRF} = 0$, co eliminuje potrzebę wykonania obliczeń zgodnie z etapem trzecim algorytmu.

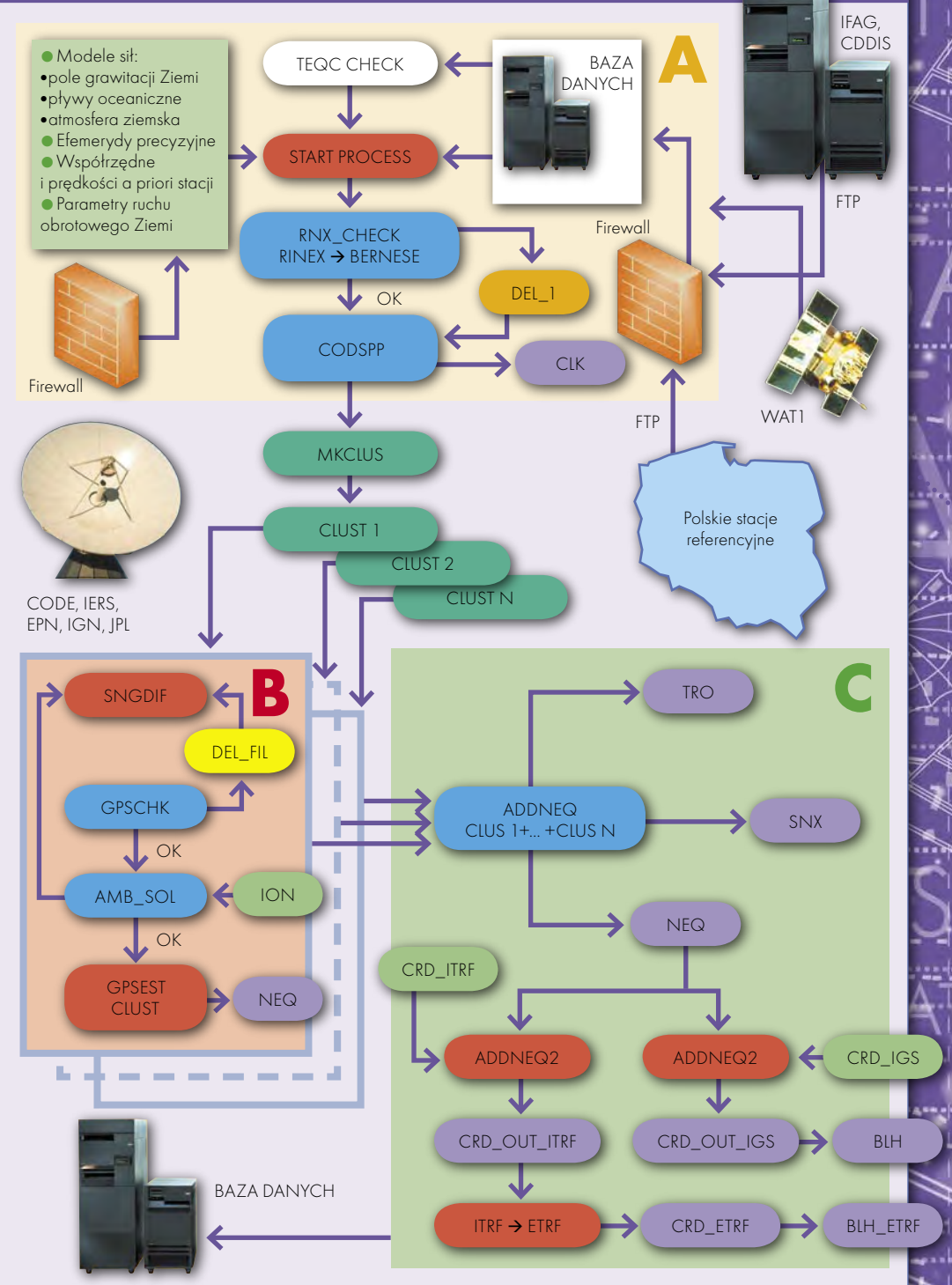
Na zakończenie tych rozważań można zadać pytanie, czy zawsze należy postępować w przedstawiony sposób? Właściwie tak, ale okazuje się, że często nie mamy możliwości dotarcia do współrzędnych punktów fundamentalnych lub musimy nawiązać się do najbliższego punktu osnowy. Wówczas można wykorzystać współrzędne katalogowe wyrażone w systemie ETRS89 i zakładając bezbłądność punktów nawiązania, wyrównać mierzoną osnowę. Należy przy tym pamiętać, że błędy punktów nawiązania zostaną przeniesione na punkty wyznaczane.

Co można zalecić do zweryfikowania jakości współrzędnych punktów nawiązania? Rozwiązania są dwa. Pierwsze to samodzielne opracowanie obserwacji wykonanych na punkcie osnowy geodezyjnej na podstawie obserwacji ze stacji referencyjnych, jeśli posiadamy dostateczną wiedzę i odpowiednie oprogramowanie do wykonania takiego procesu. Drugie rozwiązanie, polecane, to wysłanie swoich obserwacji do jednego z automatycznych serwisów opracowujących obserwacje GPS (np. system OGSPS Politechnika Warszawska <http://ogpsp.gik.pw.edu.pl> lub OPUS <http://www.ngs.noaa.gov/OPUS>). W tym przypadku musimy sprawdzić, w jakim układzie będą wyniki obliczeń i czy będziemy musieli transformować je do układu ETRF.

• SYSTEM POL_EPN

System POL_EPN jest w pełni automatyczny, został wyposażony w mechanizmy zbierania, kontrolowania, analizy i przetwarzania danych. Dokładne jego opisanie na kilku stronach jest praktycznie niemożliwe, dlatego ograniczę się do najważniejszych elementów. Tworzą go trzy funkcjonalnie powiązane ze sobą moduły (rys. 1). Pierwszy odpowiada za pobieranie i wstępną kontrolę danych, drugi – za kontrolę pojedynczych, podwójnych i potrójnych różnic obserwacji fazowych oraz wyznaczenie nieoznaczoności fazy i trzeci – za

RYS. 1. SCHEMAT FUNKCYJNALNY SYSTEMU MONITOROWANIA SIECI STACJI REFERENCYJNYCH POL_EPN



wyznaczenie parametrów niewiadomych, wyrównanie i transformację współrzędnych do systemu ETRS89. Wszystkie moduły w większej lub mniejszej części wykorzystują do przetwarzania danych program Bernese 5.0, który nieznacznie został zmodyfikowany z uwagi na ustalenia międzynarodowe w zakresie opracowania obserwacji GPS (Steigenberger

i in., 2006) oraz potrzeby samego systemu obliczeniowego. Sterowanie procesem obliczeniowym odbywa się za pośrednictwem modułu BPE (moduł automatyki obliczeń pakietu Bernese) i systemu kolejowania klastra Torque 2.0. Współdziałanie systemu kolejowania i modułu BPE jest realizowane za pomocą skryptów napisanych w Perlu i Pythonie.

Strategia obliczeniowa systemu POL_EPN to zestaw precyzyjnie wyznaczonych parametrów brzegowych i modeli zjawisk fizycznych zasilających programy pakietu Bernese 5.0 oraz sposób ich współdziałania między sobą. Wartości parametrów w przeważającej wielkości są zgodne ze standardami obliczeniowymi stosowanymi przez lokalne centra analiz sieci EPN. Podobnie jak w EPN, nawiązanie polskiej sieci stacji referencyjnych odbywa się za pośrednictwem punktów fundamentalnych EPN. W tym celu zostały włączone do opracowania stacje fundamentalne, o których pisałem w pierwszej części artykułu, oraz większość stacji permanentnych krajów sąsiadujących z Polską.

Zanim omówimy niektóre z modeli i wartości parametrów brzegowych wykorzystanych w systemie POL_EPN, wejdźmy głębiej w jego architekturę. Widoczny na rys. 1 moduł A stanowi klucz zasilania danymi systemu obliczeniowego. Obserwacje w formacie RINEX są zbierane bezpośrednio ze stacji referencyjnych lub z globalnych i regionalnych baz danych IGS. Obserwacje z IGS są kontrolowane zanim zostaną redystrybuowane, natomiast dla polskich stacji referencyjnych system kontroli został zbudowany od podstaw w sposób umożliwiający jego modyfikacje. Podyktowane to było błędami w formacie RINEX i chęcią standaryzacji obserwacji z polskich stacji referencyjnych.

Głównym elementem systemu kontroli jest program TEQC (rozpowszechniany bezpłatnie, UNAVCO, 2007), który automatycznie przepisuje obserwacje do jednolitego formatu oraz dokonuje ich analizy, wyznaczając m.in. stosunek sygnału do szumu, poziom wielodrożności sygnału czy interferencji fal wtórnych. Oprócz obserwacji system zasilany jest wieloma modelami i parametrami na bieżąco wyznaczanymi i pobieranymi wprost z serwerów IERS, IGS, JPL, CODE. Należą do nich efemerydy precyzyjne (zależnie od poziomu systemu ultra, rapid lub final), parametry ruchu obrotowego Ziemi, model jonosfery, współrzędne katalogowe stacji fundamentalnych, model pływów oceanicznych i skorupy ziemskiej, informacje dotyczące stanu satelitów GPS itd. Wszystkie dane są uzupełniane w czasie rzeczywistym, tak aby procesy obliczeniowe mogły się rozpocząć już 2 godziny po zakończeniu dobowego cyklu obserwacyjnego.

Proces obliczeniowy rozpoczyna się od przepisania obserwacji z formatu RINEX na format Bernese (binarny), co jednocześnie jest kolejnym filtrem sprawdzającym

dane obserwacyjne. Na rysunku 1 oznaczono ten blok kolorem jasnoniebieskim, podobnie jak jeszcze kilka innych bloków. Wspólną ich cechą jest wykorzystanie pełnej mocy klastra komputerowego. Tylko w tych momentach udało się poprawnie powiązać system kolejkowania klastra z systemem BPE programu Bernese 5.0. W pozostałych przypadkach jest to niemożliwe ze względu na kod wykonawczy napisany w sposób skalarny. Równoległe ustawienie zadań na poziomie pojedynczych programów byłoby możliwe, gdyby zastosowane zostały w nich specjalne biblioteki, np. MPI lub PVM (Grma i in., 2003). Mimo tego braku elementy najbardziej czasochłonne są wykonywane równoległe na kilkunastu procesorach jednocześnie.

Drugi z kolei blok wykonywany równoległe analizuje obserwacje bezwzględne programem CODSP. Wykorzystywane są tutaj obserwacje fazowe i kodowe, a głównym zadaniem, oprócz sprawdzenia jakości obserwacji, jest wyznaczenie poprawek zegarów satelitów GPS. Na tym kończy się wykorzystanie obserwacji kodowych.

Program Bernese ma swoje ograniczenia, głównie pod względem liczby jednocześnie wyznaczanych parametrów. Dzięki zaletom klastra komputerowego w momencie przekroczenia liczby 50 jednocześnie opracowywanych stacji następuje automatyczny podział na dwie niezależne sieci, które posiadają minimum 6 punktów wspólnych (blok MKCLUS na rys. 1). Dalsza część opracowania zawarta w module B biegnie równoległe dla każdej z sieci. Na wstępie tworzone są pojedyncze różnice obserwacji fazowych pomiędzy wybranymi punktami opracowywanej sieci. Budowana jest sieć typu n-1, gdzie n jest liczbą stacji, których obserwacje są jednocześnie opracowywane. Kryterium doboru stacji jest maksymalna liczba poprawnych obserwacji. W module B badane są i eliminowane nieciągłości fazy oraz analizowane reszta obserwacji fazowych. Niejednokrotnie zdarza się, że część obserwacji z ciągu dobowego jest uszkodzona lub charakteryzuje się znacznie wyższym poziomem szumu, niż założony w obliczeniach. Powodów tego zjawiska może być kilka, np. wadliwie działający odbiornik, zakłócenia elektromagnetyczne, burze jonosferyczne lub magnetyczne. Mimo różnych źródeł ich powstania w obliczeniach, wywołują ten sam efekt, tzn. wzrost poziomu szumu obserwacyjnego. Testując dziesiątki obserwacji, ustalono po-

ziom reszduów dla kombinacji liniowej L3 obserwacji fazowych, która wynosi 2,5 mm. Przekroczenie tej wartości jest sygnałem o możliwości wprowadzenia do obliczeń błędów. Pozostaje jeszcze jedna ważna kwestia, a mianowicie wyznaczenie nieoznaczoności fazy, które zawsze towarzyszą obserwacjom fazowym. Metod wyznaczania nieoznaczoności fazy jest przynajmniej kilkanaście (Mervart, 1995). W systemie POL_EPN zastosowano rozwiązanie z implementacją różnych metod w zależności długości baz (wektorów) tworzących sieć, i tak:

- **0-20 km** – jednocześnie dla fazy na L1 i L2, metoda SIGMA;

- **20-200 km** – metoda dwustopniowa; w pierwszej części wyznaczane są nieoznaczoności „wide-lane”, a następnie na ich podstawie „narrow-lane” (L5/L3 SIGMA);

- **200-2000 km** – metoda QIF, jedностopniowa, wykorzystująca tylko obserwacje fazowe na dwóch częstotliwościach z modelowaniem krótkookresowych zaburzeń jonosferycznych (podejście stochastyczne).

Wyznaczanie nieoznaczoności metodą QIF oraz SIGMA kombinacją L5 powinno odbywać się z przyjętym a priori modelem jonosfery. Dzięki temu można zwiększyć liczbę wyznaczonych nieoznaczoności fazy o ok. 10-15%, co ma w konsekwencji istotny wpływ na precyzję opracowania (Figurski, 2005). Konstrukcja modułu B pozwala w momencie stwierdzenia błędu na wyeliminowanie stacji i powtórzenie obliczeń, co ma istotne znaczenie w przypadku dużej liczby stacji. Zakończenie pracy modułu B jest związane z wyznaczeniem parametrów, którymi są współrzędne punktów i parametry troposfery zapisane w plikach równań normalnych przeznaczonych do wyrównania programem ADDNEQ w module C.

W tym miejscu występuje pewien problem związany z układem odniesienia. Wspominałem już, że transformacja do systemu ETRS89 jest opracowana dla układu ITRF, natomiast efemerydy satelitów GPS są opracowane w układzie IGS. Zaproponowane w systemie POL_EPN rozwiązanie jest pewnym kompromisem i wykorzystuje obydwa wspomniane układy. Układ IGS stosowany jest w całym procesie obliczeniowym, czyli modułach A i B. W sposób naturalny wchodzi on do modułu C, gdzie przeprowadza się wyrównanie z założonym błędem a priori punktów fundamentalnych (0,0001 m). Ten sam proces wyrównania jest realizowany dla współrzędnych punktów fun-

TAB 2. WSPÓŁRZĘDNE PUNKTÓW REFERENCYJNYCH I STACJI PERMANENTNYCH W SYSTEMIE ETRS89 NA OBSZARZE POLSKI UZYSKANE W WYNIKU TRANSFORMACJI Z UKŁADU ITRF2005

Nazwa stacji	B			L			H
	[°]	[']	["]	[°]	[']	["]	[m]
BOGI	52	28	29,96043	21	02	06,75764	139,935
BOGO	52	28	33,40180	21	02	07,22153	149,633
JOZ2	52	05	52,19906	21	01	56,44827	152,527
JOZ3	52	05	52,15487	21	01	56,40944	152,558
JOZE	52	05	50,17982	21	01	53,52381	141,457
KATO	50	15	11,76498	19	02	08,27243	332,907
KLOB	50	54	19,87465	18	56	12,81872	301,648
KRAW	50	03	58,10484	19	55	13,70831	267,138
LAMA	53	53	32,63057	20	40	11,77460	187,029
LELO	50	40	58,38188	19	37	43,95464	306,324
IGPL	52	14	07,73188	21	05	08,08517	145,797
POZN	52	25	48,18128	16	56	05,77265	171,574
TARG	50	27	04,91136	18	51	30,26683	358,416
TORU	53	02	00,43065	18	37	50,48195	112,847
WAT1	52	15	13,78583	20	54	13,81176	151,674
WODZ	50	00	00,57565	18	27	30,32281	298,815
WROC	51	06	47,72915	17	03	43,32932	180,835
ZYWI	49	41	12,07790	19	12	21,42158	412,799
ELBL	54	09	19,98625	19	24	01,25279	52,717
LAM6	53	53	27,64719	20	40	14,02136	197,711
WLAD	54	47	48,32377	18	25	07,49341	34,756
WROL	51	06	47,75412	17	03	43,41586	180,707
KWB	51	14	23,13463	19	12	22,77186	238,195
PROS	50	11	30,25873	20	17	18,57610	279,957
CBKA	52	12	53,02900	21	04	03,68968	125,214
GDAN	54	21	16,29796	18	38	32,99662	69,814
NTAR	49	28	54,45969	20	01	56,92848	645,999
SACZ	49	37	6,35337	20	41	24,06727	334,777
TARN	50	00	57,88397	20	59	02,90751	277,099
CTP_	52	13	3,71527	21	00	16,41294	166,111

damentalnych wyrażonych w układzie ITRF. Możemy dokonać takiej operacji, ponieważ błąd systematyczny z tego tytułu jest mniejszy niż błąd średni wyznaczonych współrzędnych. Pamiętać należy, aby nie utożsamiać wprost różnic współrzędnych punktów w układzie ITRF i IGS, jako wartości błędów systematycznych między tymi układami. Do systemu współrzędnych ETRS89 transformowane są tylko współrzędne w układzie ITRF. Nie wolno transformować współrzędnych w układzie IGS, ponieważ można wprowadzić nieświadomie błąd systematyczny do wyznaczonych współrzędnych rzędu nawet kilku milimetrów!

Wszystkie obliczenia w programie Bernese odbywają się w przestrzeni ortokartezjańskiej, czyli w wyniku wyrównania uzyskujemy współrzędne kartezjańskie, które należy przeliczyć na elipsoidalne. Tabela 2 zawiera zestawione współrzędne punktów referencyjnych i stacji permanentnych w systemie ETRS89 na obszarze Polski, uzyskane w wyniku transformacji z układu ITRF2005. Tak w skrócie wygląda algorytm obliczeniowy zastosowany w systemie POL_EPN. Przedstawiony opis jest bardzo ogólny, jednak pokazuje skalę problemu i złożoność zagadnień, z którymi musimy sobie poradzić, i to jest zadanie geodetów nowego pokolenia.

● PARAMETRY BRZEGOWE I MODELE

Przez modele w kontekście opracowań GPS będziemy rozumieli wzory lub algorytmy obliczania wpływu różnych naturalnych zjawisk fizycznych i efektów instrumentalnych na wartości mierzone. W obliczeniach GNSS można doliczyć się około kilkudziesięciu różnych modeli, ale nie wszystkie są jednolicie stosowane. Operatorzy programów mają do czynienia tylko z tymi, które są aktualizowane, jak np. ruch bieguna.

System POL_EPN zasilany jest 5- i 30-sekundowymi obserwacjami „fazowymi” GPS, obserwacje „kodowe” użyte są tylko do synchronizacji zegarów odbiorników GPS. Przyjęto minimalną wysokość śledzenia satelitów, równą 3° z wagowaniem obserwacji w funkcji wysokości obserwowanych satelitów ($1/\cos^2 z$). W procesie modelowania parametrów zakłócających i przetwarzaniu numerycznym wykorzystana jest głównie kombinacja liniowa L_3 (iono-free) podwójnych różnic obserwacji fazowych. Refrakcja troposferyczna w systemie POL_EPN modelowana jest bez przyjętego a priori modelu, niezależnie dla części hydrostatycznej (w literaturze spo-

tykana jest nazwa *część sucha*, która jest nadużyciem) i *mokrej* z wykorzystaniem empirycznej funkcji odwzorowującej GMF – *Global Mapping Function* (Boehm i in., 2006). Funkcja GMF opracowana jest na podstawie numerycznych modeli pogody i zalecana szczególnie do opracowania obserwacji poniżej 10° nad horyzontem, gdzie wpływ refrakcji jest dominujący. Parametry całkowitego opóźnienia troposferycznego (składnika hydrostatycznego i mokrego) wyznaczone są w interwałach godzinnych z uwzględnieniem asymetrii azymutalnej (wyznaczany jest tzw. gradient troposferyczny).

W obliczeniach wykorzystywane są ponadto modele:

- Wariacji centrum fazowego anten odbiorników i satelitów **GPS – PHAS_IGS.05** – model absolutny.
- Pływów oceanicznych – **FES2004**.

Wstępna analiza poprawności i kompletności obserwacji nieróżnicowych zakłada, że odrzucane są stacje, które posiadają ponad 50% błędnych obserwacji lub o długości mniejszej niż 12 godzin.

Wymienione parametry i modele są najważniejsze z punktu widzenia nowych strategii obliczeniowych i systemu POL_EPN, ale na pewno nie wyczerpują tematu, jak prowadzić obliczenia i interpretować wyniki. Analizę wyników systemu POL_EPN zajmniemy się w ostatniej, 3. części artykułu.

DR HAB. INŻ. MARIUSZ FIGURSKI,
prof. WAT, prodziekan ds. naukowych
Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowej Akademii Technicznej
im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie
Recenzent: PROF. IRENEUSZ WINNICKI,
działek WILiG WAT w Warszawie

Literatura:

- Boehm J., Niell A., Tregoning P., Schuh H., 2006: Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, „Geophysical Research Letters”, Vol. 33

- Boucher, C., Alammi Z., 1992: The EUREF Terrestrial Reference System and its first realization, EUREF Meeting, Bern, Switzerland March 4-6, 1992.
- Boucher, C., Alammi Z., 2007: Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign, IGN, France.
- EPN, 2007, <http://www.epncb.oma.be/trackingnetwork/coordinates/index.php>
- Figurski M., 2001: Określenie wybranych parametrów atmosfery na podstawie permanentnych obserwacji GPS i ich wpływ na dokładność opracowań pomiarów GPS, BEL Studio, Warszawa.
- Figurski M., 2005: Monitorowanie regionalnych zmian jonosfery z godzinnych obserwacji GPS, Bell Studio, Warszawa.
- Grama A., Kumar V., Gupta A., Karypis G., 2003: Introduction to Parallel Computing, 2/E, Addison Wesley.
- Mervart L., 1995: 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.
- Kryński J., Rogowski J.B., 2004: Systemy i układy współrzędnych w geodezji, geodynamice i astronomii, „Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography”, nr 10, Warsaw 2004.
- Steigenberger P., Romero I., Fang P., 2006: Reprocessing Issues, Standardization, New models, IGS Workshop, 28.04.2006.
- UNAVCO, 2007, <http://www.unavco.org/>
- Zumberge J.F., Hefflin M.B., Jefferson D.C., Watkins M.M., Webb F.H., 1997: Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, „Journal of Geophysical Research 102”.