Niwelacja satelitarna podwyższonej precyzji

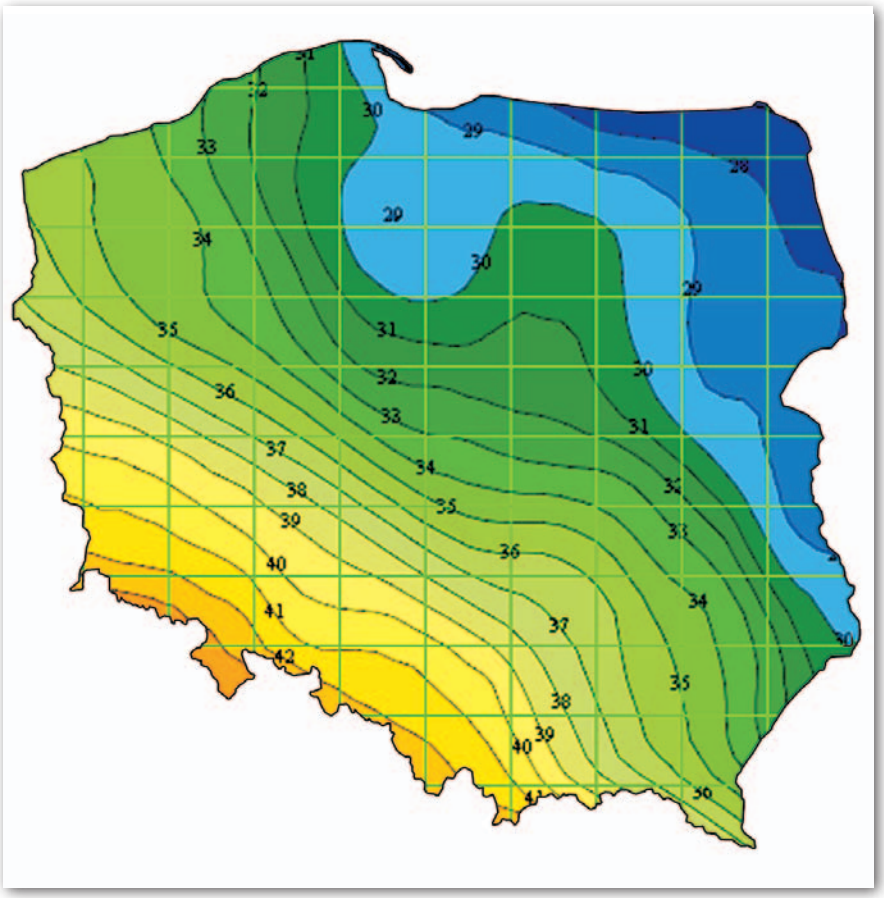
AKTYWNIE I WIRTUALNIE Z GEOIDĄ

Aktywna sieć geodezyjna stanowi alternatywę nie tylko dla poziomych osnów geodezyjnych, o czym pisałem w GEODECIE 1/2011 i 4/2011, ale również – zastępując pomiary niwelacyjne – dla klasycznych osnów wysokościowych.

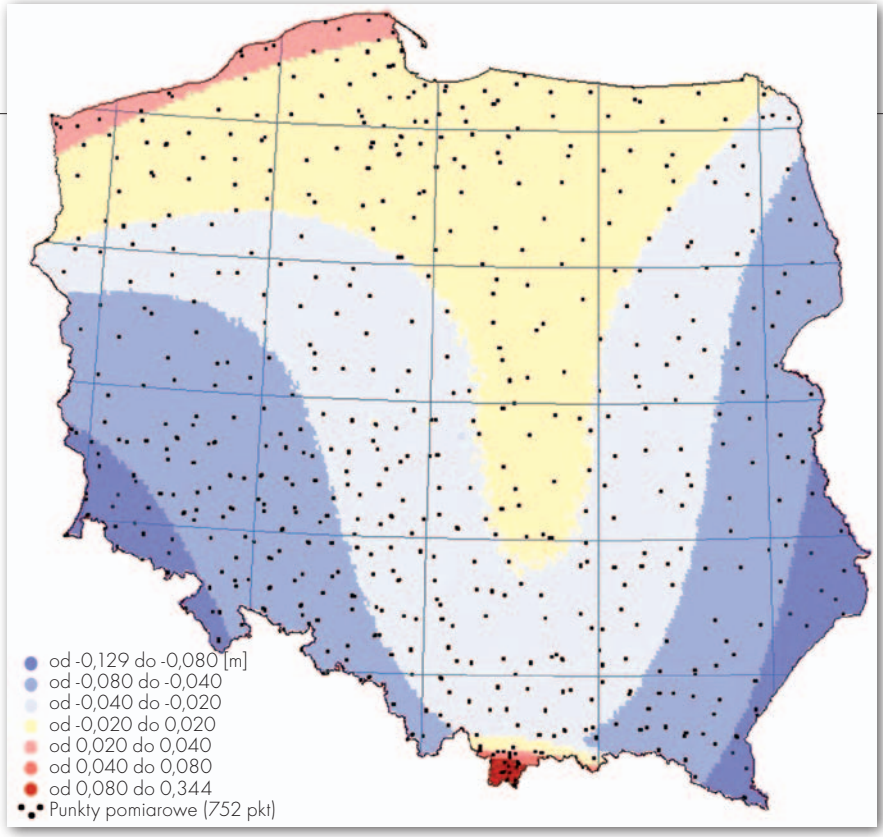
RYSZARD PAŻUS

W przypadku niwelacji satelitarnej wymagane jest spełnienie dwóch warunków. Po pierwsze, model geoidy musi zapewniać dokładność równoważną wysokościowej osnowie geodezyjnej III klasy według obowiązujących standardów technicznych (4 mm/km). Po drugie, zarówno procedury pomiarowe, jak i obliczeniowe muszą odpowiadać określonym kryteriom, z kontrolą jakości rezultatów włącznie.

Funkcję osnowy wysokościowej spełnia model geoidy niwelacyjnej 2001 (rys. 1) [1]. Jego opracowanie było niezbędnym warunkiem rozpoczęcia prac nad tworzeniem aktywnej sieci geodezyjnej na potrzeby gospodarki krajowej. Podstawą modelowania były zbiory sieci wysokościowych: EUVN (62 punkty), EUREF-POL (11 punktów), POLREF (348 punktów), i dodatkowo wysokości pozyskane z WSSG (Wojskowa Szczegółowa Sieć Geodezyjna – 554 punkty) uzupełnione specjalnie wykonaną siecią TATRY (23 punkty). Do opracowania pasa przygranicznego wykorzystano model geoidy grawimetrycznej QUASI97B [2],



Rys. 1. Geoida niwelacyjna 2001



Rys. 2. Mapa różnic odstępów N pomiędzy geoidą niwelacyjną 2001 i modelem QUASI97b

poza obszarem Tatr i Podhala, dla którego model ten był na tyle niedokładny (rys. 2), że wymagane było wykonanie pomiarów uzupełniających.

Łączenie dwóch źródeł modelowania geoidy pozwoliło stworzyć model hybrydowy. Takie podejście jest już powszechnie stosowane w innych krajach. Dla przykładu, w USA najnowszą wersją geoidy jest *hybrid model GEOID09* [3]. Niezbędne testy dokładnościowe geoidy niwelacyjnej 2001 wskazywały na jej wysoką dokładność, spełniającą założenia „geoidy centymetrowej". W związku z opracowaniem nowszego modelu quasigeoidy grawimetrycznej quasi05 [5] wydaje się zasadne zweryfikowanie modelu 2001 w pasie przygranicznym, zwłaszcza że doszły też punkty zagraniczne w tym pasie, których w 2001 roku nie było. Pas przygraniczny w modelu geoidy niwelacyjnej 2001 sięga 4' poza granicę państwową węzłami siatki 1' x 1' szerokości i długości geodezyjnej.

Dysponując modelem geoidy niwelacyjnej 2001, możemy z powodzeniem wyznaczać wysokości metodą satelitarną. Wymagane jest tylko doprecyzowanie procedur: pomiarowej i obliczeniowej. Procedury te wywodzą się z już wcześniej opisanych metod wykorzystania punktów wirtualnych [5,6]. Podobnie jak w poprzednich artykułach założeniem naszym jest, by rozwiązania były możliwie najtańsze bez straty dokładności rezultatów.

Dla wyznaczania wysokości metodami satelitarnymi językiem u wagi jest nie tyle odbiornik, co jego antena. Musi mieć ona stabilne położenie centrum fazowego względem ARP (Antenna Reference Point). Najprostsze i najtańsze rozwiązanie to korzystanie tylko z anten dla częstotliwości GPS L1. Już wykorzystywanie anten GPS L1/L2 sprawę gmatwa, bo centra fazowe takiej anteny zaczynają „pływać" w zależności od odległości zenitalnej do satelity. Wymagane są odpowiednie kalibracje, a cena takich konstrukcji dość raptownie rośnie.

Jeszcze gorzej wygląda to w przypadku zastosowania systemu GLONASS działającego na innych częstotliwościach L1/L2, co rzutuje na położenie centrum fazowego – różne dla każdej częstotliwości. Nasuwa się wątpliwość, czy przy wielu systemach GNSS i zmiennych częstotliwościach barierą dla dokładnych pomiarów nie będzie trudność w konstruowaniu anten. Ale gdyby nawet problem został technicznie rozwiązany, koszty produkcji takich anten będą nieracjonalnie wysokie. Temat ten jest, jak dotąd, skrzętnie pomijany przy różnego rodzaju lobbingu na rzecz budowy coraz bardziej skomplikowanych konstrukcji i systemów GNSS.

Rys. 3. Rozmieszczenie mierzonych reperów

Optymalną metodą niwelacji satelitarnej – czyli redukującą koszty do minimum i zapewniającą wysokie dokładności – jest metoda wykorzystująca punkty wirtualne w pobliżu punktów wyznaczanych. W tym konkretnym przypadku, kiedy głównym celem jest wyznaczenie wysokości, można powiedzieć, że tworzymy repery wirtualne dla wyznaczenia wysokości reperów fizycznych. Podobnie jak w dwóch poprzednich artykułach [5, 6] najlepiej procedurę pomiarową i metodę obliczeń pokazać na przykładzie. Wyko-

Rys. 4. Lokalizacja reperu nr 2

Rys. 5. Lokalizacja reperu nr 1

Rys. 6. Lokalizacja reperu nr 3

Rys. 6a. Reper nr 3 – tak wygląda reper przekazany w 2003 roku pod ochronę władającemu, czyli Urzędowi Gminy Stare Babice (zasypany gruzem i bez pokrywy)

Rys. 7. Lokalizacja reperu nr 6

Rys. 7a i 7b. Reper nr 6 – tak wygląda reper przekazany w 2003 roku pod ochronę władającemu, czyli Urzędowi Dzielnicy Warszawa-Bielany

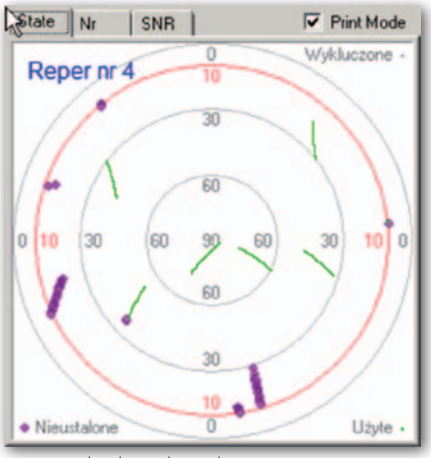
rzystamy w tym celu pomiar i wyznaczenie wysokości sześciu reperów zlokalizowanych jak na rys. 3.

Odległość między skrajnymi reperami nr 1 i nr 6 wynosi 7 km. Na reperach tych wykonałem sesje pomiarowe jednym odbiornikiem AZUS Star. Dla kontroli obserwacje powtórzyłem innego dnia i o innej porze, aby obserwacje były z innych satelitów. Na dodatek pomiary wykonano innym odbiornikiem AZUS Star z przypisaną mu anteną. Wszystko po to, aby w procedurze pomiarowej było jak najmniej drobnych błędów o charakterze systematycznych. Centrum fazowe użytej anteny typu „L1 Survey" jest wyznaczone z dokładnością ± 2 mm. Antena – wykonana w technologii FFI (Four Feeds Improvement Technique), stabilizującej centrum fazowe – była umieszczana wyłącznie na tyczce teleskopowej, by zwiększyć dokładność pomiaru wysokości ARP nad reperem do 1 mm. Zaletą użycia tyczki teleskopowej jest możliwość podniesienia anteny do 5 metrów nad punktem.

Sesje pomiarowe nie muszą być długie, ale z powodu przeszkód terenowych niektóre z nich wydłużałem (najkrótsza 26 minut, najdłuższa 41 minut). Miało to też związek z zamiarem pokazania opcjonalnego rozwiązania przy użyciu systemu EUREF, którego stacje referencyjne rejestrują pomiary w interwale 30 sekund. Do testu wybrałem repery o zróżnicowanej lokalizacji. Tylko jeden (nr 2) miał warunki idealnie otwartego horyzontu (rys. 4). Pozostałe miały w większej lub mniejszej odległości przeszkody terenowe, czyli typową lokalizację krajową. Wokół reperu nr 1 znajdują się nieliczne drzewa i słupy linii energetycznych (rys. 5), reper nr 3 jest w ulicy z luźną zabudową (rys. 6, 6a), reper nr 4 jest na skraju lasu, reper nr 5 w szerokiej przecince leśnej, a nr 6 obok dużego, wysokiego wysypiska śmieci i kilka metrów od drzewa (rys. 7, 7a, 7b). Na dwóch reperach: nr 4 (rys. 8, 8a, 8b) i nr 6 zarejestrowano obserwacje z przerwami spowodowanymi przeszkodami terenowymi.

Zasadnicze obserwacje wykonano w ciągu dwóch dni: 30 i 31 marca br. Ponieważ 31 marca udało się odsłonić zalany reper nr 6, dodatkową sesję dla tego reperu wykonano 4 kwietnia (rys. 7a i 7b).

W dniach tych stan jonosfery był w miarę stabilny, ale, jak wiadomo, informacja o jonosferze dociera a posterio-



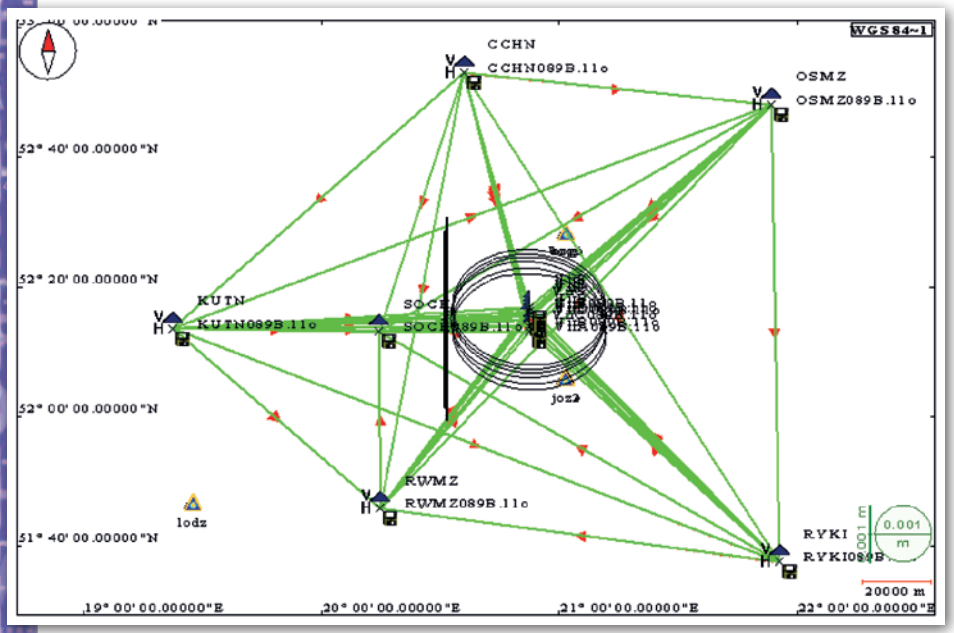
Rys. 8, 8a, 8b. Reper nr 4 reper położony na północno-wschodnim skraju lasu przy torze kolejowym. Przerwy w odbiorze sygnałów z satelitów (kolor fioletowy)

ri. Zadbałem natomiast o to, by sesje pomiarowe były realizowane w okresach, dla których wskaźnik PDOP < 2,0.

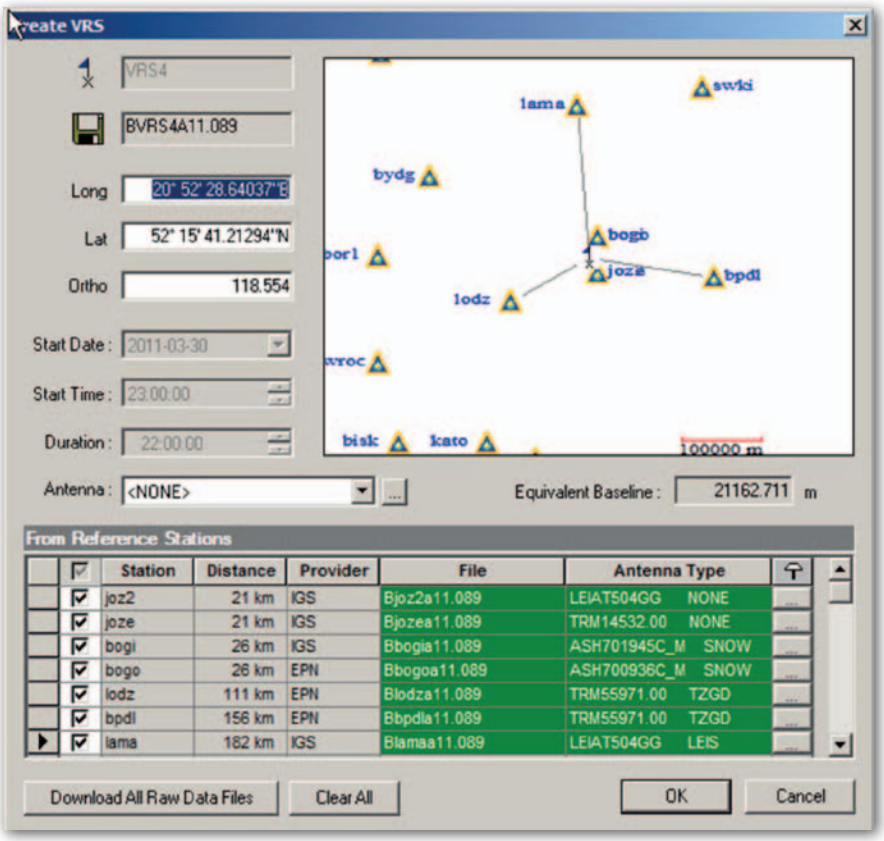
Obliczenia wykonano w kilku wersjach. W pierwszej wykorzystano punkty wirtualne utworzone przez serwis ASG-EUPOS. Dla każdego reperu wygenerowano w jego pobliżu plik wirtualny dla sesji 22-godzinnej z interwałem 5 sekund (dla zmniejszenia objętości pliku). Z każdym takim punktem wirtualnym związano nasze obserwacje fizyczne poprzez jeden wektor. Dlatego metoda ta wymaga powtórzenia niezależnym pomiarem. Wtedy mamy dopiero pełne i skontrolowane jakościowo wyznaczenie wysokości. Na dokładność rzutuje przede wszystkim dokładność wyznaczenia wysokości punktu wirtualnego, czyli tego punktu z sesji 22-godzinnej. Istotne jest też, z ilu stacji fizycznych taka sesja wirtualna była generowana. Tych informacji, niestety, serwis POZGEO D nie dostarcza. Ale na ocenę dokładności jest sposób. Trzeba wysłać jeden z plików wygenerowanych przez ten serwis do serwisu POZGEO (rys. 9). Jak widać, błąd wysokości

Rys. 9. Raport z POZGEO dla jednego z punktów wirtualnych (anomalia wysokości nie jest tu liczona z modelu geoidy 2001, brak informacji o modelu)

```
**********************************************************************************
     ASG-EUPOS Serwis POZGEO wersja 1.65
**********************************************************************************

UŻYTKOWNIK      :c980
PLIK            :VirA089B.11o
CZAS POBRANIA   :2011-04-05 07:25:48
CZAS OBLICZEŃ   :2011-04-07 11:30:28

--------------------------------------------------------------------------------
RINEX - INFORMACJE
Nazwa punktu       : Virtual_21
Numer punktu       :
Wersja RINEX       : 2.10
Program            : GPServer 2.74 3724
Instytucja         : Virtual Rinex Gen.
Model anteny       : LEIAT504GG      LEIS
Numer seryjny ant. : Typ_ABS_7
Wysokość anteny : 0
Interwał rejestracji : 60
Początek obserwacji:
2011-3-30 1:0:0.0000  Tydzień GPS: 1629  sek. GPS: 262800.0000
Koniec obserwacji:
2011-3-30 22:59:0.0000  Tydzień GPS: 1629  sek. GPS: 341940.0000
Czas obserwacji [hh:mm:ss]: 21:59:00.0000

--------------------------------------------------------------------------------
Lista satelitów w pliku RINEX
  G5 G16 G21 G25 G29 G30 G31 G6 G18 G3 G22 G26 G15 G19 G7 G14 G11 G24 G32 G28 G20
G17 G23 G4 G13 G2 G10 G8 G27 G9 G12

--------------------------------------------------------------------------------
OBLICZENIA WEKTORÓW MANUALNE

--------------------------------------------------------------------------------
WYRÓWNANIE MANUALNE

--------------------------------------------------------------------------------
WYNIKI OSTATECZNE
ETRS89 Współrzędne kartezjańskie
X: 3653659.001  Y: 1393489.998 Z: 5022039.000
mx: 0.002 my: 0.0015 mz: 0.002 mp: 0.003

ETRS89 Współrzędne geodezyjne
B: 52° 16' 49.93198''   L: 20° 52' 35.89787''  h_el: 98.458

Układ 1992
X: 492160.841  Y: 627981.197
mx: 0.001 my: 0.001 mp: 0.001

Układ 2000 strefa 7
X: 5794119.857  Y: 7491581.475
mx: 0.001 my: 0.001 mp: 0.001

Układ 1965 strefa 2
X: 5725949.770  Y: 4560398.676
mx: 0.030 my: 0.030 mp: 0.042

Układ UTM strefa 35
X: 5792248.212  Y: 4491584.195
mx: 0.001 my: 0.001 mp: 0.001

WYZNACZONE WYSOKOŚCI PUNKTU:
Wysokość elipsoidalna: 98.458   mh: 0.003
Anomalia wysokości   : 31.381
Kronsztadt 86        : 67.077   mH: 0.015
```



Rys. 10. Szkic sieci kontrolnej dla punktów wirtualnych z pominięciem bliskich stacji referencyjnych: bogi, bogo, joze, joz2, soch



Rys. 11. Punkty wirtualne obliczane z wszystkich stacji referencyjnych EUREF w promieniu 200 km

jest niewielki m_h=0,003 m. I w tym, poza dokładnością modelu geoidy, tkwi sedno sprawy. Gdybyśmy generowali sesję wirtualną jednogodzinną (interwał 5 s), to dla tego przykładu m_h=0,021 m. Dla sesji półgodzinnej (interwał 1 s) dokładność spada do m_h=0,038 m. Te dokładności dotyczą już generowania najnowszym oprogramowaniem serwisu POZGEO D, czyli VRS3Net.

Poza tymi kontrolami wykonano jeszcze dodatkowy test dokładności wyznaczenia punktów wirtualnych z pominięciem najbliższych stacji referencyjnych, którymi są: bogi, bogo, joze, joz2. Pozwala to rozszerzyć wnioski o dokładności tej metody na obszar całego kraju (rys.10). Zmiany wysokości elipsoidalnych punktów wirtualnych otrzymały stałe przesunięcie rzędu 14 mm.

No i oczywiście istotne znaczenie ma tu dokładność modelu geoidy. Pozostałe błędy, takie jak wysokości centrum fazowego anteny, wpływ jonosfery, troposfery, błędy orbit, błędy zegarów, w sesji 22-godzinnej powinny być w sumie, według oceny szacunkowej, rzędu 3-5 mm. Analiza wektorów trywialnych, tzn. tych z wysokościami przyjmowanymi jako stałe, też potwierdza, że wyznaczenie ich poprzez serwis POZGEO D było dokładne, rzędu 3 milimetrów.

W drugiej wersji obliczeń wykorzystywano aktywną sieć geodezyjną EUREF i punkty wirtualne generowane przez program GNSS Solutions. W tym przypadku mamy zdecydowanie więcej wpływu na procedurę obliczeniową. Przede wszystkim sami decydujemy, z których stacji referencyjnych chcemy tworzyć punkty wirtualne. Nie ma więc potrzeby ograniczać się do najbliższych punktów, możemy skorzystać – jak np. w naszym przypadku – ze wszystkich punktów w promieniu 200 km (rys. 11). Wszystkie nasze punkty w tej wersji zostały obliczone poprzez punkty wirtualne przy podobnych założeniach jak w wersji pierwszej, tzn. generowano pliki RINEX dla sesji 22-godzinnej (tutaj z interwałem 30 sekund, bo taka jest typowa rejestracja na punktach EUREF).

W wersji trzeciej procedura obliczeniowa była taka sama jak w wersji drugiej. Różnica jest tu w generowaniu punktów wirtualnych, które były wyznaczane z dwóch częstotliwości GPS L1/L2+GLONASS. W wersji drugiej przyjęte były dane o orbitach, zegarach i jonosferze typu *rapid*; w trzeciej – typu *precise* (dostępne dopiero po 13 dniach od pomiaru).

Podsumowanie rezultatów znajduje się w zestawieniu zbiorczym (rys. 12). Ponieważ nasze punkty są równocześnie reperami państwowej osnowy wysokościowej II klasy, mamy możliwość dodatkowego zweryfikowania wyników. Na podstawie tych testów potwierdzona została całkowicie teza o bardzo dobrej dokładności modelu geoidy niwelacyjnej 2001. Poza tym wykazano, że generowanie plików wirtualnych jest w programach zastosowanych w POZGEO D niemalże identyczne z ty-

	30.03.2011	31.03.2011	4.04.2011	Różnica dwóch pomiarów	Średnia z dwóch pomiarów	Dane banku osnów H(Kronsztad'86)	Odchyłka ΔH
	ASG-EUPOS						
Reper1	107.974	107.973		-0.001	107.974	107.9831	0.010
Reper2	107.487	107.486		-0.001	107.487	107.4905	0.004
Reper3	106.125	106.129		0.004	106.127	106.1282	0.001
Reper4	105.394	105.424		0.030	105.409	105.4046	-0.004
Reper5	102.827	102.826		-0.001	102.827	102.8278	0.001
Reper6		98.094	98.091	0.003	98.093	98.0930	0.001
	EUREF (IGS Rapid Orbits, Clocks, Ionospheric Grids)					∑ΔH/n=	0.0020
Reper1	107.962	107.969		0.007	107.966	107.9831	0.018
Reper2	107.490	107.485		-0.005	107.488	107.4905	0.003
Reper3	106.124	106.118		-0.006	106.121	106.1282	0.007
Reper4	105.403	105.429		0.026	105.416	105.4046	-0.011
Reper5	102.817	102.864		0.047	102.841	102.8278	-0.013
Reper6		98.098	98.091	0.007	98.095	98.0930	-0.001
	EUREF (GPS L1/L2+GLONASS, IGS Precise Orbits,..)					∑ΔH/n=	0.0004
Reper1	107.961	107.969		0.008	107.965	107.9831	0.018
Reper2	107.492	107.484		-0.008	107.488	107.4905	0.002
Reper3	106.112	106.116		0.004	106.114	106.1282	0.014
Reper4	105.403	105.397		-0.006	105.400	105.4046	0.005
Reper5	102.797	102.803		0.006	102.800	102.8278	0.028
Reper6		98.099	98.082	0.017	98.091	98.093	0.003
						∑ΔH/n=	0.0116

Rys. 12. Porównanie zbiorcze rezultatów trzech wersji obliczeń

mi oferowanymi przez Ashtech (GNSS Solutions). To chyba oznacza zastosowanie identycznych algorytmów obliczeń. Potwierdza się też wcześniejszy wniosek, że jeżeli w pomiarach statycznych wykorzystamy dane o orbitach, zegarach i jonosferze typu *rapid* lub *precise*, to nie ma potrzeby pomiaru na dwóch częstotliwościach GPS L1/L2 i GLONASS. Wystarczy, że stacje referencyjne takie pomiary wykonują, bo właśnie z tych stacji generowane są te parametry.

W załączonych tutaj testach nie widać potrzeby korygowania lokalnie modelu geoidy. Zresztą nie ma obecnie takiej możliwości. Z chwilą kiedy stacje referencyjne otrzymają wyznaczenia wysokości w obowiązującym układzie Kronsztad'86, będzie możliwe uzupełniające skorygowanie modelu geoidy niwelacyjnej [7].

Rys. 13. Odbiornik GPS z 1988 roku GPS L1, 8-kanałowy (20 kg + antena + akumulator samochodowy)

Zaprezentowana tu alternatywa dla wyznaczania wysokości punktów nie wymaga stosowania struktury hierarchicznej, typowej w sieciach zakładanych metodą niwelacji geometrycznej. Pomiary były wykonywane jednoosobowo, najtańszym na rynku odbiornikiem jednoczęstotliwościowym z anteną typu „GPS L1 Survey". I o to chodziło autorowi, kiedy rozpoczynał przygodę z aktywną siecią geodezyjną.

O możliwościach niwelacji satelitarnej z wykorzystaniem odpowiedniego modelu geoidy niwelacyjnej przekonałem się już w 1988 roku, bo wtedy po raz pierwszy wykonywałem takie wyznaczenia wysokości. Odbiornik był 8-kanałowy, jednoczęstotliwościowy, ważył 20,2 kg, pamięć to dyskietki 3½" (MINI-MAC 1816 firmy Western Atlas International z oprogramowaniem AIMS10 – Automatic Interferometric MINI-MAC Software) – rys. 13. Na orbitach było tylko 6 satelitów GPS. Teraz doszły te wyznaczenia wirtualne, które tak znacząco zmieniają sytuację.

RYSZARD PAŻUS
(GeoDigitalGPS)

Literatura:
•1. Pażus R., Osada E., Olejnik S., 2002: Geoida niwelacyjna 2001, GEODETA 5 (84), Warszawa;
•2. Raport z realizacji umowy pomiędzy GUGiK a CBK PAN dotyczący utworzenia dla potrzeb GUGiK systemu obliczania odstępów quasigeoidy od elipsoidy GRS80, Warszawa 1997;
•3. Daniel R. Roman, Yan Ming Wang, Jarir Saleh, and Xiaopeng Li: Final National Models for the United States: Development of GEOID09 NOAA/National Geodetic Survey http://www.ngs.noaa.gov/GEOID/GEOID09/GEOID09_tech_details.pdf;
•4. Kryński, J., 2007: Precyzyjne modelowanie quasigeoidy na obszarze Polski – wyniki i ocena dokładności, Instytut Geodezji i Kartografii, seria monograficzna nr 13, Warszawa;
•5. Pażus R., 2011: Aktywnie i wirtualnie z POZGEO D, GEODETA 1 (188), Warszawa;
•6. Pażus R., 2011: Aktywnie i wirtualnie z EUREF, GEODETA 4 (191), Warszawa;
•7. Borowski Ł., Banasik P., 2011: Osnowa bardziej zintegrowana, GEODETA 3 (190), Warszawa.

Wykorzystano oprogramowanie:
•GNSS Solutions firmy Ashtech wersja 3.60.1 (postprocessing)
•AZUS_Star firmy GeoDigitalGPS wersja 1.1.3.0 (preprocessing)