



Badania dokładności pozycjonowania techniką PPP w zależności od długości sesji obserwacyjnej oraz wykorzystanych systemów pozycjonowania satelitarnego

KATARZYNA STĘPNIAK, PAWEŁ WIELGOSZ, JACEK PAZIEWSKI

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej,
Instytut Geodezji, 10-719 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 1,
katarzyna.stepniak@umw.edu.pl, pawel.wielgosz@umw.edu.pl, jacek.paziewski@umw.edu.pl

Streszczenie. Precyzyjne pozycjonowanie absolutne GPS-PPP — coraz częściej znajduje zastosowanie we współczesnej geodezji. Dotychczas przeprowadzono wiele badań dotyczących dokładności wyznaczania współrzędnych za pomocą tej techniki na podstawie opracowania dobowych sesji obserwacyjnych. Niniejsza praca przedstawia wyniki analiz dokładności precyzyjnego pozycjonowania absolutnego dla sesji obserwacyjnych o długości od 1 do 24 godzin z wykorzystaniem precyzyjnych produktów służby IGS. Ponadto zaprezentowano wyniki badań nad przydatnością obserwacji systemu GLONASS poprzez wyznaczenie pozycji absolutnej z łącznego opracowania obserwacji GPS+GLONASS. Wszystkie testy numeryczne przeprowadzono, wykorzystując oprogramowanie Bernese 5.0. Otrzymane wyniki pokazują, że opracowanie już dwugodzinnych sesji pomiarowych pozwala na otrzymanie absolutnej pozycji trójwymiarowej o dokładności 2-3 cm. Stwierdzono także, że opracowanie łączne obserwacji GPS+GLONASS daje zawsze najlepsze wyniki, a przewaga tego rozwiązania rośnie wraz ze skróceniem długości sesji obserwacyjnych oraz z pogorszeniem warunków obserwacyjnych.
Słowa kluczowe: Geodezja Satelitarna, GPS, GLONASS, precyzyjne pozycjonowanie absolutne (PPP)

1. Wprowadzenie

Satelitarne precyzyjne pozycjonowanie absolutne (ang. *PPP — Precise Point Positioning*) jest obecnie dojrzałą techniką geodezyjną. Metody i algorytmy PPP były i są szeroko rozwijane przez środowisko naukowe od ostatnich 10 lat [1, 2, 3].

Obecnie technika ta stała się bardzo wartościowym narzędziem w wielu aplikacjach wykorzystywanych w geodezji, geofizyce i meteorologii. Podstawową zaletą PPP jest możliwość wyznaczenia pozycji o wysokiej dokładności za pomocą tylko jednego dwuczęstotliwościowego odbiornika GNSS, bez konieczności wykorzystania danych ze stacji referencyjnych. Fakt ten eliminuje konieczność utrzymania drogiej infrastruktury naziemnej oraz umożliwia wykonywanie pomiarów w obszarach o słabo rozwiniętej infrastrukturze technicznej. Osiągnięcie wysokich dokładności możliwe jest dzięki wykorzystaniu precyzyjnych produktów udostępnianych przez służbę IGS (ang *International GNSS Service*), takich jak orbity satelitów podawane z interwałem piętnastominutowym, zegary satelitów generowane co 30 s oraz parametry ruchu obrotowego ziemi. Dokładność publikowanych efemeryd satelitów systemu GPS jest szacowana na około 2,5 cm, natomiast dla systemu GLONASS około 5 cm. Informacje o niektórych produktach IGS przedstawiono w tabeli 1.

Powszechnie wiadomo, że technika PPP pozwala na uzyskanie milimetrowych dokładności współrzędnych z opracowania 24-godzinnych sesji obserwacyjnych [1]. Jednak w większości zastosowań przeprowadzanie dobowych obserwacji jest niepraktycznie lub niemożliwe. Dlatego warto sprawdzić, jaką dokładność można osiągnąć przy wykorzystaniu krótszych sesji.

Dokładność pozycjonowania, dostępność oraz niezawodność techniki PPP zależy m.in. od ilości satelitów widocznych nad horyzontem, która w terenach zurbanizowanych, w górach oraz innych — o zasłoniętym horyzoncie, może być niewystarczająca. Obecnie pozycjonowanie PPP opiera się najczęściej na przetwarzaniu samych obserwacji GPS, zaś dodanie obserwacji systemu GLONASS mogłoby poprawić dokładność wyznaczanej pozycji. Badania dotyczące integracji obserwacji GPS i GLONASS w metodach PPP przeprowadzono na danych z 2007 r. w pracy Cai i Gao [4]. Wówczas konstelacja GLONASS składała się z 12 satelitów, a opracowanie to bazowało tylko na jednej 12-godzinnej sesji obserwacyjnej. Biorąc pod uwagę dynamiczny rozwój rosyjskiego systemu satelitarnego, który w 2011 roku ponownie osiągnął pełną operacyjność, zaistniała potrzeba przeprowadzenia nowych badań wpływu włączenia obserwacji GLONASS do procesu wyznaczania pozycji techniką PPP. Przewiduje się, że spowoduje to zwiększenie liczby obserwowanych satelitów, co poprawi geometrię rozwiązania. Należy jednak mieć na uwadze ciągle niższą jakość produktów IGS związanych z systemem GLONASS (orbity, zegary).

TABELA 1

Wybrane produkty IGS wykorzystywane w technice PPP (dane na 2009 r.)

	Dokładność	Opóźnienie	Aktualizacje	Interwał
Efemerydy satelitów				
Rapid	~2,5 cm	17-41 h	codziennie o 17 czasu UTC	15 minut
Final	~2,5 cm	12-18 dni	w każdy czwartek	15 minut

cd. tabeli 1

Zegary satelitów					
Rapid		~ 75 ps RMS ⁽¹⁾	17-41 h	codziennie o 17 czasu UTC	5 minut
		~ 25 psSDev ⁽²⁾			
Final		~ 75 ps RMS	12-18 dni	w każdy czwartek	30 sekund
		~ 25 psSDev			
Parametry ruchu obrotowego Ziemi					
Rapid	Ruch bieguna	~ 40 μ s ⁽³⁾	17-41 h	codziennie o 17 czasu UTC	codziennie o 12 czasu UTC
	Zmiana parametrów ruchu bieguna	~ 200 μ s/dzień			
	Długość dnia	~ 10 μ s ⁽⁴⁾			
Final	Ruch bieguna	~ 30 μ s	11-17 dni	w każdy czwartek	codziennie o 12 czasu UTC
	Zmiana parametrów ruchu bieguna	~ 150 μ s/dzień			
	Długość dnia	~ 10 μ s			

⁽¹⁾ RMS — błąd średni; ⁽²⁾ SDev — odchylenie standardowe;⁽³⁾ 100μ s = 3,1 mm obrotu równikowego; ⁽⁴⁾ 10μ s = 4,6 mm obrotu równikowego.(Źródło: <http://igsch.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, dn. 12.01.2011)

2. Metodyka

W niniejszej pracy do opracowania obserwacji satelitarnych wykorzystano oprogramowanie Bernese GPS Software v 5.0 [5]. Bernese jest obecnie jednym z najbardziej zaawansowanych pakietów oprogramowania służących precyzyjnemu opracowaniu obserwacji GNSS. Jest powszechnie używane do wyrównywania sieci kontynentalnych, modelowania jonosfery i troposfery, orbit i zegarów satelitów GNSS, ruchu obrotowego Ziemi itp. W jednej z ostatnich wersji oprogramowania wprowadzono możliwość precyzyjnego opracowania obserwacji absolutnych techniką PPP.

W celu przeprowadzania testów numerycznych opracowano dwa skrypty kontrolne PCF dla Bernese, służące oddzielnie dla opracowania obserwacji GPS oraz GPS + GLONASS.

2.1. Równania obserwacyjne

Precyzyjne pozycjonowanie absolutne oparte jest zarówno na obserwacjach kodowych jak i fazowych na obydwu częstotliwościach f_1 i f_2 . Równania obserwa-

cyjne odpowiednio pomiarów kodowych oraz fazowych na częstotliwości f_1 można opisać następującymi wzorami [6]:

$$P1_i^k = \rho_i^k + c \cdot (\Delta t_i - \Delta t^k) + \delta T_i^k + \delta I_i^k + c \cdot (\delta b_{p1,i} - \delta t_{p1}^k) + \varepsilon, \quad (1)$$

$$\Phi 1_i^k = \rho_i^k + c \cdot (\Delta t_i - \Delta t^k) + \delta T_i^k - \delta I_i^k - \lambda_1 \cdot N_i^k + c \cdot (\delta b_{L1,i} - \delta t_{L1}^k) + \varepsilon, \quad (2)$$

gdzie: $P1_i^k$ — pseudoodległość od satelity k do odbiornika i [m];
 $\Phi 1_i^k$ — obserwacja fazowa odbiornika i od satelity k [m];
 ρ_i^k — odległość geometryczna między satelitą k a odbiornikiem i [m];
 $\Delta t_i, \Delta t^k$ — błąd zegara odbiornika i oraz satelity k [s];
 δT_i^k — opóźnienie sygnału spowodowane refrakcją troposferyczną [m];
 δI_i^k — opóźnienie sygnału spowodowane refrakcją jonosferyczną [m];
 δb — opóźnienia sprzętowe [m];
 N — całkowita liczba pełnych długości fal sygnału GNSS, nieoznaczoność;
 λ — długość fali nośnej na częstotliwości f_1 lub f_2 [m];
 c — prędkość światła w próżni [m/s];
 ε — błędy przypadkowe.

Parametry wyznaczone w procesie obliczeń to współrzędne odbiornika, błąd zegara odbiornika, nieoznaczoności oraz opóźnienie troposferyczne. Należy tu podkreślić, że rozwiązanie PPP zaimplementowane w Bernese dostarcza rozwiązania typu „float” z nieoznaczonościami będącymi liczbami rzeczywistymi. Błąd zegara satelity oraz błędy efemeryd zredukowane są poprzez wykorzystanie precyzyjnych produktów IGS. Po ich użyciu stosuje się kombinację liniową *ionosphere-free* (oznaczana jako IF lub L3/P3) w celu wyeliminowania wpływu jonosfery. Zabieg ten wykonuje się zarówno dla obserwacji kodowych jak i fazowych [5, 4, 1]:

$$P_{IFi}^k = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_i^k + c \Delta t_i + \delta T_i^k + \varepsilon_{IF}, \quad (3)$$

$$\Phi_{IFi}^k = \frac{f_1^2 \Phi_1 - f_2^2 \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_i^k + c \Delta t_i + \delta T_i^k + \lambda N_{IFi}^k + \varepsilon_{IF}. \quad (4)$$

Parametryzując opóźnienie troposferyczne δT jako opóźnienie zenitalne (*ZTD* — *zenith total delay*) mapowane (odwzorowywane) do odpowiedniego opóźnienia skośnego (*STD*) z wykorzystaniem funkcji mapującej (M) (np. funkcji Niell), można uzyskać następujący model matematyczny w postaci [1]:

$$\rho_i^k + c \Delta t_i + M \cdot ZTD - P_{IFi}^k = 0, \quad (5)$$

$$\rho_i^k + c \Delta t_i + M \cdot ZTD + \lambda N_{IFi}^k - \Phi_{IFi}^k = 0. \quad (6)$$

2.2. Rozwiązanie modelu matematycznego

Rozwiązanie modelu matematycznego przeprowadza się metodą najmniejszych kwadratów. Linearyzację równań obserwacyjnych (5) i (6) z wykorzystaniem parametrów „a priori” oraz obserwacji można wyrazić za pomocą układu równań:

$$A\delta + W - V = 0, \quad (7)$$

gdzie: A — macierz współczynników;
 δ — wektor przyrostów do wartości „a priori” wyznaczanych parametrów X ;
 $W = f(X^0, l)$ — wektor wyrazów wolnych;
 V — wektor poprawek.

Macierz A tworzą pochodne cząstkowe równania obserwacji względem następujących parametrów: współrzędnych stacji (x_i, y_i, z_i), błędu zegara odbiornika (Δt_i), zenitalnego opóźnienia troposferycznego (ZTD), nieoznaczoności (N) [1]:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(X, P)}{\partial x_i} & \frac{\partial f(X, P)}{\partial y_i} & \frac{\partial f(X, P)}{\partial z_i} & \frac{\partial f(X, P)}{\partial \Delta t_i} & \frac{\partial f(X, P)}{\partial ztd} & \frac{\partial f(X, P)}{\partial N_{(k=1, nast)}^k} \\ \frac{\partial f(X, \Phi)}{\partial x_i} & \frac{\partial f(X, \Phi)}{\partial y_i} & \frac{\partial f(X, \Phi)}{\partial z_i} & \frac{\partial f(X, \Phi)}{\partial \Delta t_i} & \frac{\partial f(X, \Phi)}{\partial ztd} & \frac{\partial f(X, \Phi)}{\partial N_{(k=1, nast)}^k} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

przy czym:

$$X = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ \Delta t_i \\ ZTD \\ N_{(k=1, nast)}^k \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Rozwiązanie układu równań normalnych z wartościami „a priori” (X^0) oraz odpowiednią macierzą wag obserwacji (P_i) oraz wyraża się wzorem:

$$\delta = -(A^T P_i A)^{-1} A^T P_i W. \quad (10)$$

Wyrównane parametry otrzymuje się z równania:

$$\hat{X} = X^0 + \delta. \quad (11)$$

Macierz kofaktorów przyjmuje postać:

$$Q_{\hat{x}} = (A^T P_l A)^{-1}, \quad (12)$$

zaś macierz wariancyjno-kowariancyjna wyrównanych parametrów:

$$C_{\hat{x}} = m_0^2 (A^T P_l A)^{-1}, \quad (13)$$

gdzie m_0 — estymator współczynnika wariancji obliczony ze wzoru:

$$m_0 = \sqrt{\frac{V^T P_l V}{n - m}}. \quad (14)$$

3. Eksperymenty numeryczne

3.1. Opis eksperymentu

W celu przeprowadzenia analizy dokładności techniki PPP wykorzystano dane obserwacyjne o interwale 30 sekund ze stacji LAMA, BOGO i BOR1 z okresu 31.01-20.02.2010 roku (21 dni). Informacje dotyczące współrzędnych i anten stacji umieszczono w tabeli 2. Ze zgromadzonych obserwacji utworzono pliki obserwacyjne o długości: 1, 2, 4, 8, 24 godzin. Otrzymano 504 sesje jednogodzinne, 252 sesje dwugodzinne, 126 sesji czterogodzinnych, 63 sesje ośmiogodzinne i 21 sesji 24-godzinnych. Następnie przeprowadzono niezależne opracowanie każdej sesji za pomocą oprogramowania *Bernese GPS Software* wersja 5.0, w którym zastosowano metodę precyzyjnego pozycjonowania absolutnego. Dla wszystkich stacji wykonano obliczenia, wykorzystując obserwacje GPS oraz uwzględniając precyzyjne finalne produkty IGS. Ponadto przeprowadzono analizy dotyczące przydatności obserwacji systemu GLONASS poprzez wykonanie dodatkowych obliczeń dla stacji LAMA z wykorzystaniem danych pomiarowych GPS + GLONASS. Obliczenia te wykonano również dla sesji obserwacyjnych o różnych długościach. Dodatkowo przeprowadzono analizę przydatności obserwacji z systemu GLONASS w trudnych warunkach obserwacyjnych na przykładzie sesji dwugodzinnych z maską elewacji podniesioną z 10° do 40°. Przeprowadzono również eksperyment, mający na celu określenie różnic w osiąganych dokładnościach współrzędnych otrzymanych z wykorzystaniem produktów IGS typu „final” i „rapid”. Możliwa była jedynie realizacja wyznaczenia współrzędnych stacji LAMA na podstawie obserwacji GPS, ponieważ dla satelitów systemu GLONASS nie są publikowane „szybkie” produkty IGS.

Otrzymane współrzędne porównano ze współrzędnymi referencyjnymi stacji z oficjalnego rozwiązania IGS na średnią epokę kampanii testowej w układzie ITRF2005. Analizie poddano średnie wartości odchyłek współrzędnych od współrzędnych referencyjnych, ich odchylenie standardowe oraz procent pozycji

horyzontalnych w przedziale ± 2 cm od pozycji referencyjnej zaznaczonym na rysunkach poniżej.

TABELA 2

Współrzędne stacji GNSS oraz wykorzystywane typy anten

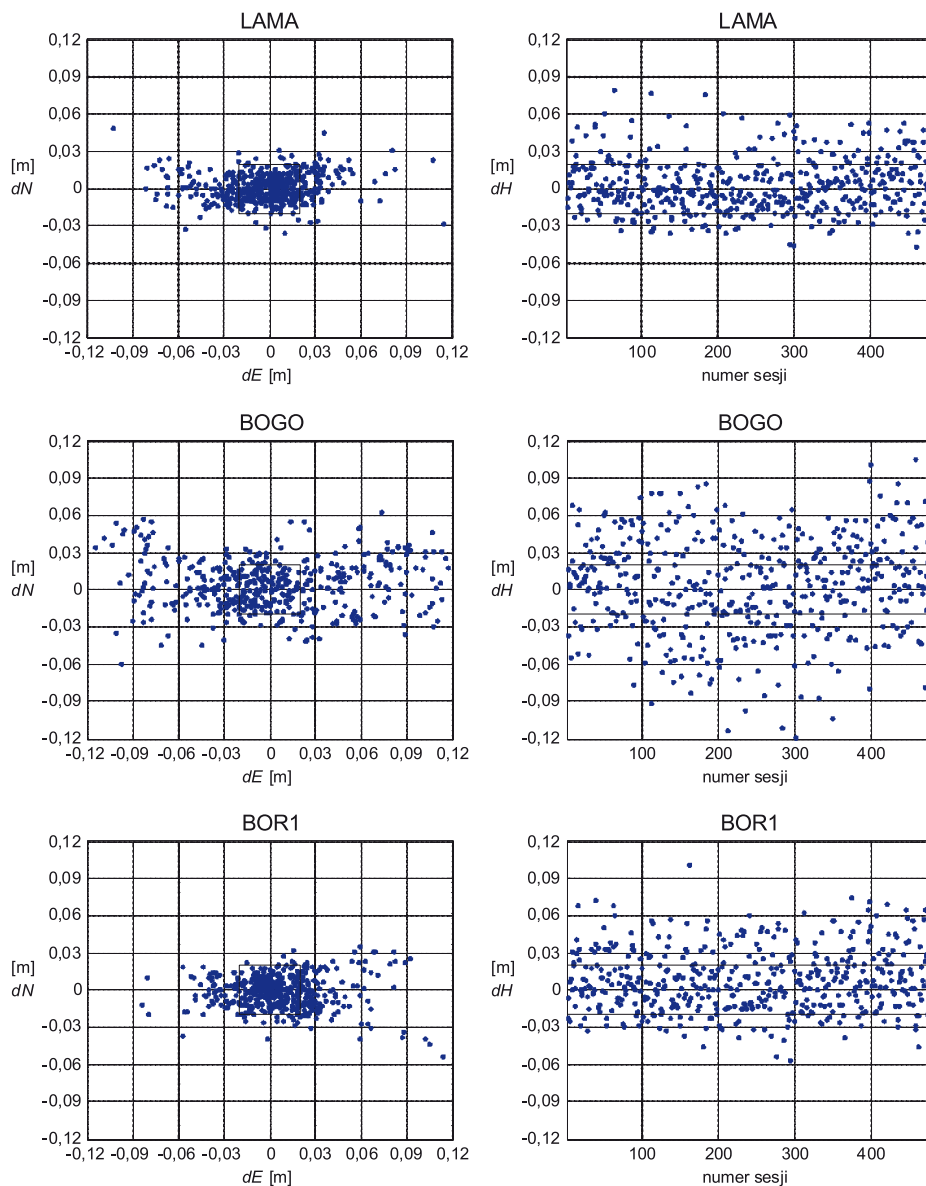
Stacja	Współrzędne			Antena
	<i>B</i>	<i>L</i>	<i>H</i>	
LAMA	53°53'32,63057"	20°40'11,77460"	187,029 m	Leica L1/L2 Choke Ring (LEIAT504GG LEIS)
BOGO	53°28'33,40180"	21°02'07,22153"	149,633 m	Ashtech L1/L2 Choke Ring (ASH700936C_M SNOW)
BOR1	52°16'37,04679"	17°04'24,44840"	124,361m	Dorne Margolin T Choke Ring (AOAD/M_T NONE)

3.2. Wyniki eksperymentu

3.2.1. Wyniki opracowania obserwacji GPS

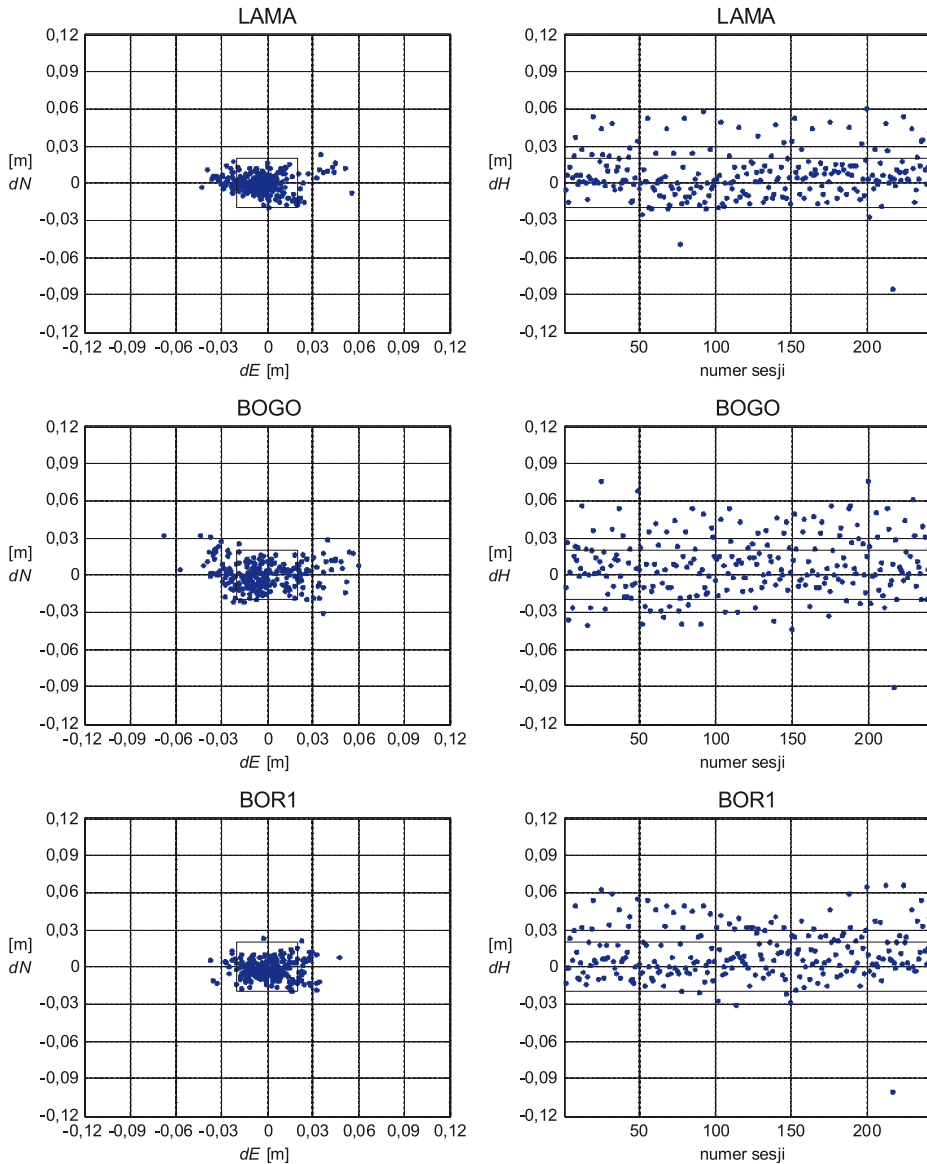
Na rysunku 1 przedstawiono odchyłki współrzędnych względem pozycji referencyjnej, uzyskane na podstawie sesji jednogodzinnych. Pogrubioną linią zaznaczono prostokąt ograniczający składowe dN , dE i dH do wartości ± 2 cm. Maksymalne różnice pomiędzy współrzędnymi referencyjnymi a obliczonymi stacji LAMA wynoszą: 0,106 m dla współrzędnej północnej, $-0,553$ m dla wschodniej oraz $-0,170$ m dla wysokości. Średnie odchyłki współrzędnych stacji wynosiły: $dN = 0,002$ m; $dE = -0,003$ m; $dH = 0,003$ m. Analizując rysunek, można zauważyć, że uzyskany rezultat dla stacji BOGO jest o niższej dokładności, szczególnie dla składowej wschodniej i wysokości. Maksymalne wartości odchyłek współrzędnych wynoszą: 0,269 m dla składowej północnej, 0,351 m dla wschodniej oraz $-0,184$ m dla wysokości. W przypadku stacji BOR1 uzyskano następujące wartości maksymalne: 0,105 m dla współrzędnej północnej, 0,294 m dla wschodniej oraz $-0,151$ m dla wysokości. Najlepsze wyniki uzyskano dla stacji LAMA, gdzie 57,3% odchyłek współrzędnych horyzontalnych mieściło się w przedziale ± 2 cm, bardzo zbliżone wyniki uzyskano dla stacji BOR1, a dla stacji BOGO tylko 25,5% odchyłek zmieściło się w założonym przedziale (tab. 3). Różnice te mogą wynikać z różnego sprzętu pomiarowego używanego na analizowanych stacjach GNSS.

Na rysunku 2 przedstawiono odchyłki współrzędnych stacji względem pozycji referencyjnej, uzyskane na podstawie opracowania obserwacji podzielonych na dwugodzinne sesje dla systemu GPS. Analizując rysunki, można zauważyć wzrost



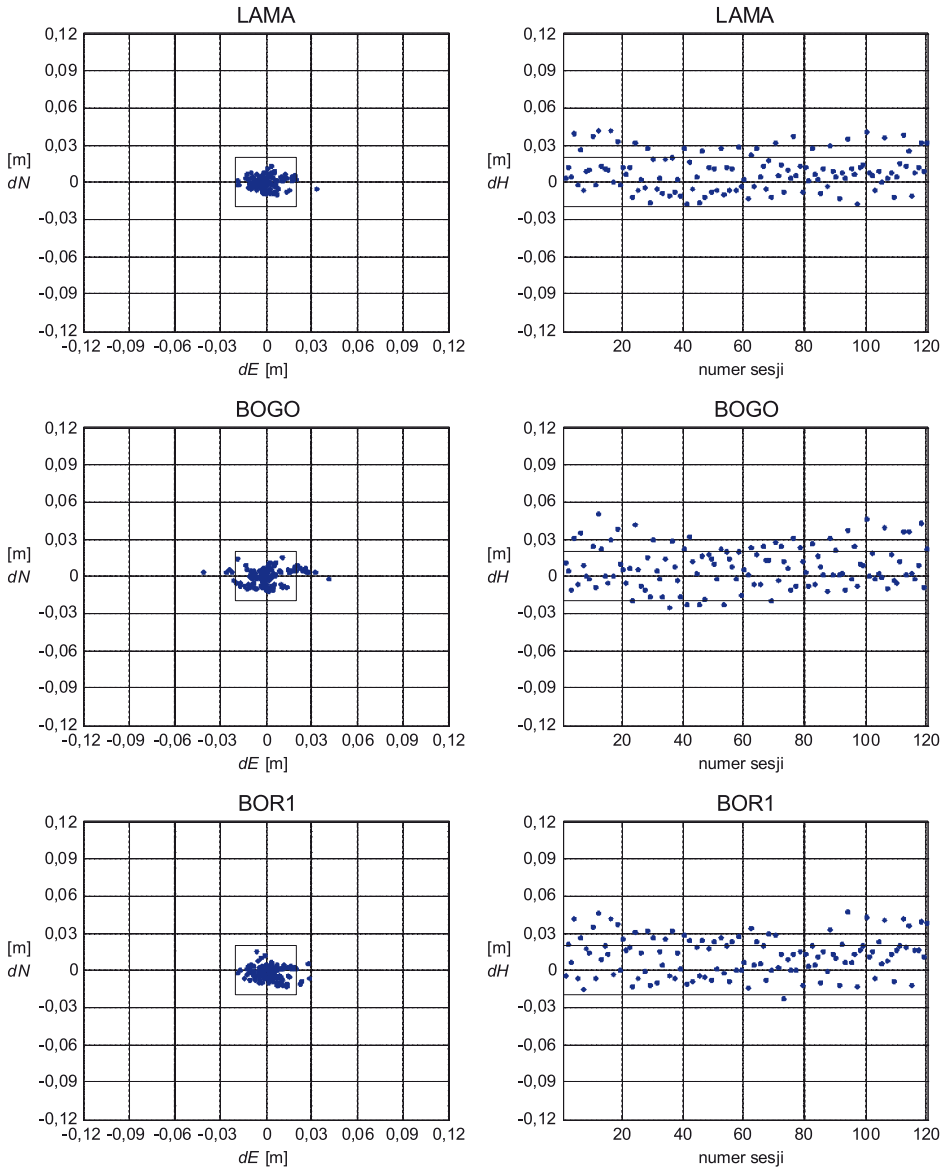
Rys. 1. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA, BOGO i BOR1 względem pozycji referencyjnej, sesje 1 h, system GPS

dokładności otrzymanej pozycji, jednak podobnie jak w przypadku sesji jednogodzinnych — błędy o największych wartościach zanotowano przy opracowaniu obserwacji stacji BOGO, gdzie maksymalne wartości odchyłek wynoszą: 0,058 m dla składowej północnej, 0,154 m dla wschodniej oraz $-0,090$ m dla wysokości.



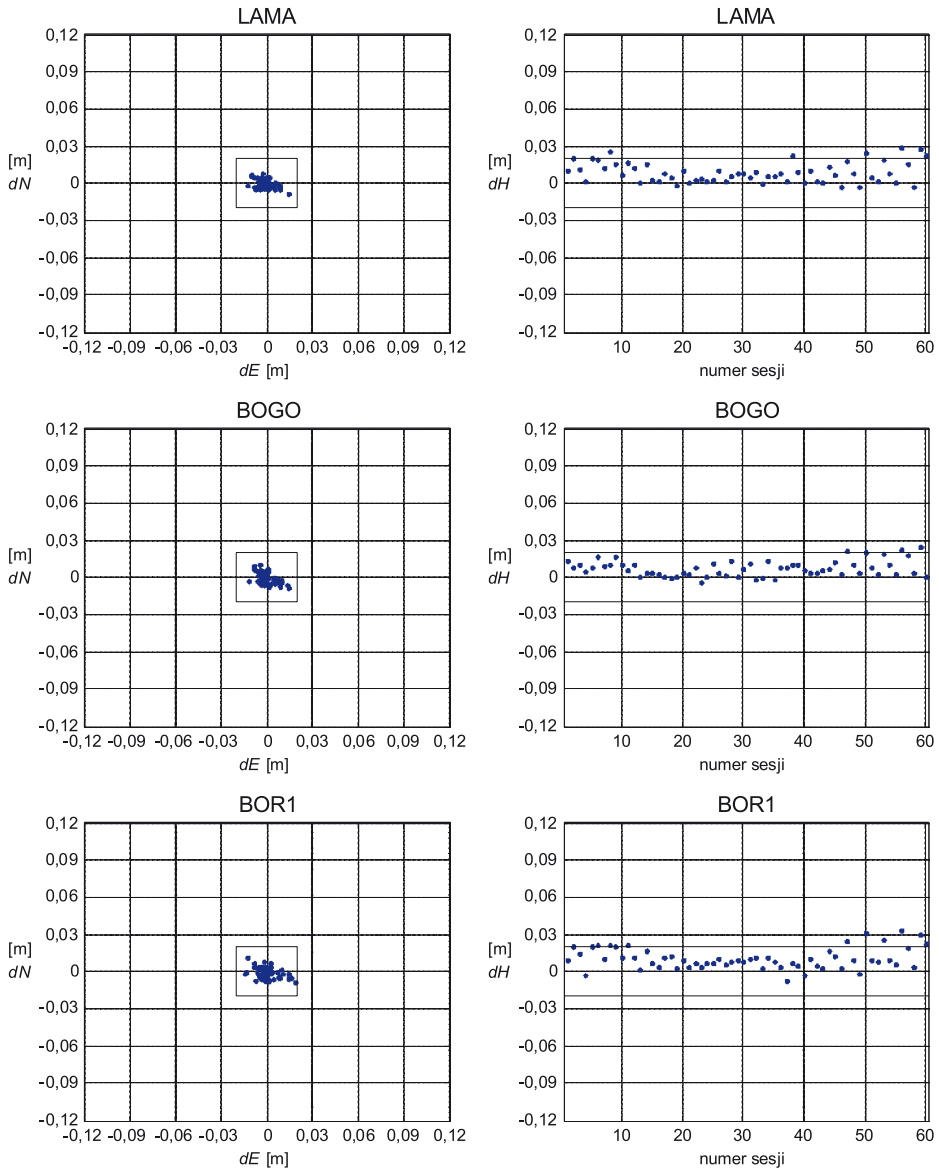
Rys. 2. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA, BOGO i BOR1 względem pozycji referencyjnej, sesje 2 h, system GPS

Dla wszystkich stacji najwyższą dokładnością charakteryzuje się współrzędna północna, której odchyłki nie przekroczyły 0,060 m. Dla sesji dwugodzinnych od 61,9% do 82,5% otrzymanych pozycji horyzontalnych zmieściło się w przedziale ± 2 cm od pozycji referencyjnej.



Rys. 3. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA, BOGO i BOR1 względem pozycji referencyjnej, sesje 4 h, system GPS

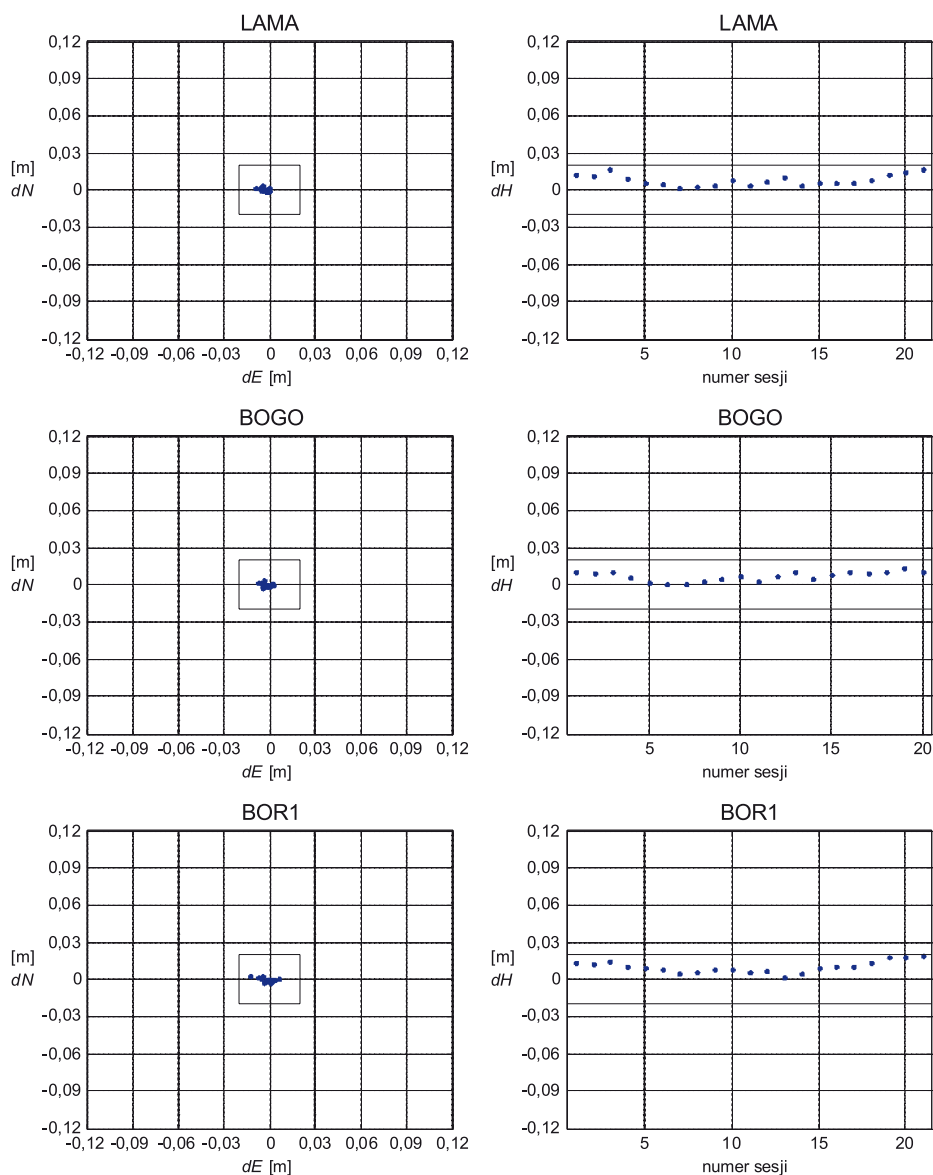
Na rysunku 3 zaprezentowano wyniki rozwiązania sesji czterogodzinnych dla poszczególnych stacji. Analizując powyższe rysunki, można wywnioskować, że możliwe jest uzyskanie dwuwymiarowej pozycji o dokładności 2 cm oraz wysokości o dokładności 3 cm z opracowania czterogodzinnych sesji, korzystając tylko z obserwacji systemu



Rys. 4. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA, BOGO i BOR1 względem pozycji referencyjnej, sesje 8 h, system GPS

GPS. Dla sesji o tej długości już 88,3-99,2% odchyłek współrzędnych horyzontalnych mieści się w granicach ± 2 cm od pozycji referencyjnej. Oznacza to, że wykorzystując technikę PPP, możemy wyznaczyć absolutną pozycję horyzontalną z dokładnością ± 2 cm, dysponując obserwacjami już z czterogodzinnej sesji.

Na rysunku 4 przedstawiono odchyłki współrzędnych stacji względem pozycji referencyjnej, uzyskane na podstawie opracowania obserwacji podzielonych na ośmiogodzinne sesje. Na podstawie rysunków dotyczących opracowania sesji ośmiogodzinnych można zauważyć, że błędy pomiaru składowej północnej



Rys. 5. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA, BOGO i BOR1 względem pozycji referencyjnej, sesje 24 h, system GPS

i wschodniej oscylują w granicach 1 cm, natomiast wysokość wyznaczono z dokładnością 2-3 cm. W tabeli 3 pokazano, że 100% współrzędnych horyzontalnych mieści się w przedziale ± 2 cm.

Ostatnia analiza dotycząca tylko systemu GPS opiera się na sesjach 24-godzinnych. Wyniki przedstawiono na rysunku 5. W przypadku sesji 24-godzinnych dla systemu GPS maksymalne różnice współrzędnych obliczonych i prawdziwych uzyskały następujące wartości:

- dla stacji LAMA — 0,004 m dla składowej północnej, -0,009 m dla wschodniej oraz 0,017 m dla wysokości,
- dla stacji BOGO — 0,005 m dla składowej północnej, -0,008 m dla wschodniej oraz 0,014 m dla wysokości,
- dla stacji BOR1 — 0,003 m dla składowej północnej, -0,013 m dla wschodniej oraz 0,020 m dla wysokości.

Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że 24-godzinne sesje pozwalają uzyskać dokładności milimetrowe.

TABELA 3

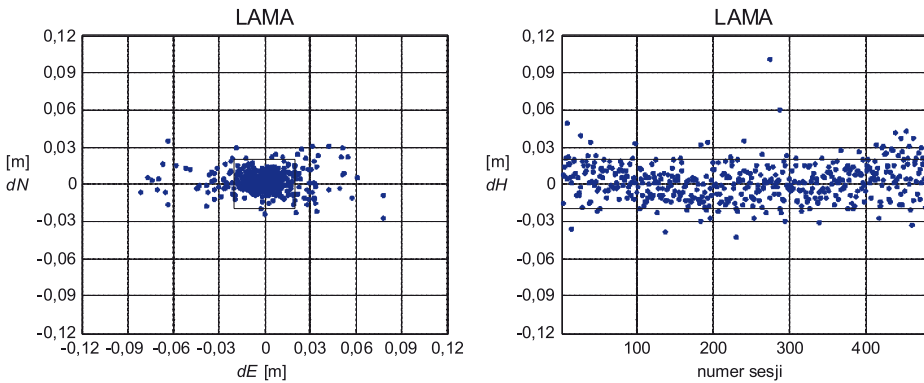
Statystyki dotyczące wyników opracowania obserwacji GPS

Długość sesji	Średnie odchyłki [cm]			STD [cm]			% ± 2 cm
	dN	dE	dH	N	E	H	NE
	LAMA						
1 h	0,2	-0,3	0,3	1,3	4,1	2,3	57,3
2 h	0,1	-0,4	0,7	0,8	1,9	1,9	74,6
4 h	0,1	0,0	1,0	0,5	0,8	1,5	99,2
8 h	0,0	-0,2	1,0	0,4	0,5	0,8	100
24 h	0,1	-0,3	0,9	0,1	0,2	0,5	100
	BOGO						
1 h	0,4	0,2	0,4	2,5	6,1	4,1	25,5
2 h	0,1	-0,2	0,9	1,2	2,4	2,5	61,9
4 h	0,1	0,0	0,9	0,6	1,2	1,7	88,3
8 h	0,0	0,0	0,8	0,5	0,6	0,7	100
24 h	0,0	-0,2	0,8	0,2	0,3	0,4	100
	BOR1						
1 h	0,0	0,8	0,8	1,5	3,4	2,6	55,2
2 h	-0,1	0,1	1,2	0,9	1,7	2,1	82,5
4 h	-0,1	0,1	1,3	0,5	0,9	1,6	96,7
8 h	-0,1	0,0	1,1	0,4	0,7	0,8	100
24 h	0,0	-0,2	1,1	0,2	0,4	0,5	100

W tabeli 3 przedstawiono średnie odchyłki, uzyskanych współrzędnych oraz ich odchylenia standardowe (STD). Ostatnia kolumna zawiera informacje o procentowej ilości współrzędnych horyzontalnych o odchyłce mniejszej niż ± 2 cm. Analizując zaprezentowane dane, potwierdzono zależność między długością sesji obserwacyjnych a dokładnością uzyskiwanych współrzędnych, tj. największy rozrzut otrzymano dla najkrótszych sesji, natomiast najmniejszy — dla sesji 24-godzinnych. Natomiast średnie dN , dE , dH posiadają podobne wartości. Bazując na danych zawartych w tabeli 3 oraz przedstawionych powyżej rysunkach, można stwierdzić, że obecnie technika PPP umożliwia otrzymanie współrzędnych absolutnych o dokładności 2-3 cm z opracowania od 2 do 4 godzin obserwacji GPS.

3.2.2. Wyniki opracowania obserwacji GPS + GLONASS

Kolejnym etapem eksperymentu było zastosowanie do obliczenia współrzędnych stacji LAMA danych obserwacyjnych, do pozyskania których wykorzystano jednocześnie system GPS oraz GLONASS. Zastosowano podobną procedurę postępowania jak w przypadkach opisanych w poprzednim podrozdziale. W pierwszej kolejności wyznaczono odchyłki współrzędnych względem pozycji referencyjnej, otrzymane z opracowania sesji jednogodzinnych. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 6.

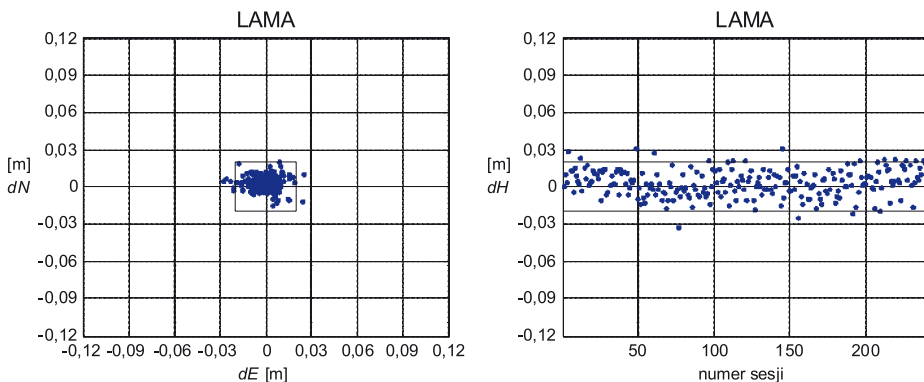


Rys. 6. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA względem pozycji referencyjnej, sesje 1 h, system GPS+GLONASS

Przeprowadzając analizę rysunku 6, można stwierdzić, że przy równoczesnym zastosowaniu obydwu systemów GNSS dla sesji jednogodzinnych, nastąpiła poprawa dokładności, a odchylenia od pozycji referencyjnej znacznie się zmniejszyły. Maksymalne wartości odchyłek wynoszą: $-0,041$ m dla współrzędnej północnej, $0,078$ m dla wschodniej, $0,102$ m dla wysokości, natomiast średnie są równe: $dN = 0,004$ m; $dE = -0,002$ m; $dH = 0,003$ m. W tabeli 4 pokazano, że 79,4% odchyłek współrzędnych

horyzontalnych zmieściło się w przedziale ± 2 cm (57,3% dla opracowania samych obserwacji GPS).

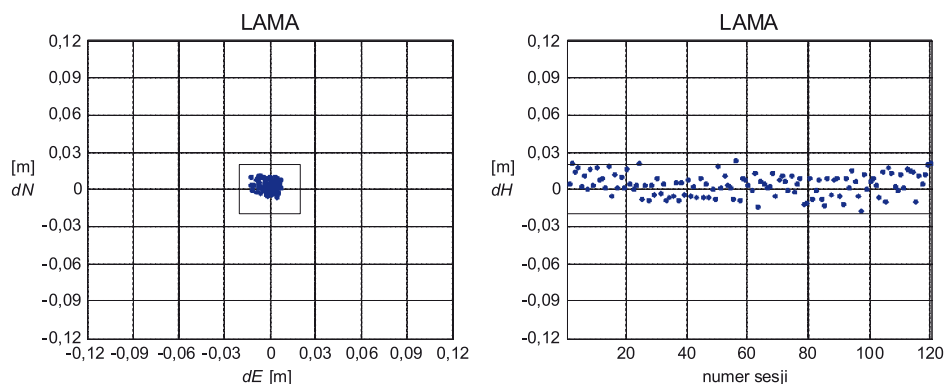
Na rysunku 7 zaprezentowano wartości odchyłek, otrzymanych podczas opracowania obserwacji GPS i GLONASS, podzielonych na dwugodzinne sesje. Można zaobserwować, że odchyłka wysokości obliczonej od wysokości referencyjnej znacznie zmniejszyła się przy wykorzystaniu systemów GPS i GLONASS w porównaniu z przypadkiem zastosowania jedynie jednego systemu satelitarnego. Nastąpiło również zwiększenie dokładności przy wyznaczaniu pozycji horyzontalnej. W tym przypadku maksymalne odchyłki współrzędnych od pozycji referencyjnej są równe: 0,021 m dla składowej północnej, -0,028 m dla wschodniej, 0,033 m dla wysokości. Średnie wartości wynoszą: $dN = 0,003$ m; $dE = -0,001$ m; $dH = 0,004$ m. W tym przypadku 96,7% odchyłek współrzędnych horyzontalnych mieści się w granicach ± 2 cm (74,6% dla samego GPS), co pozwala stwierdzić, że już dla sesji dwugodzinnych technika PPP pozwala na uzyskiwanie dokładności pozycji płaskiej rzędu 2 cm, gdy wykorzystuje się dane z obu systemów pozycjonowania.



Rys. 7. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA względem pozycji referencyjnej, sesje 2 h, system GPS+GLONASS

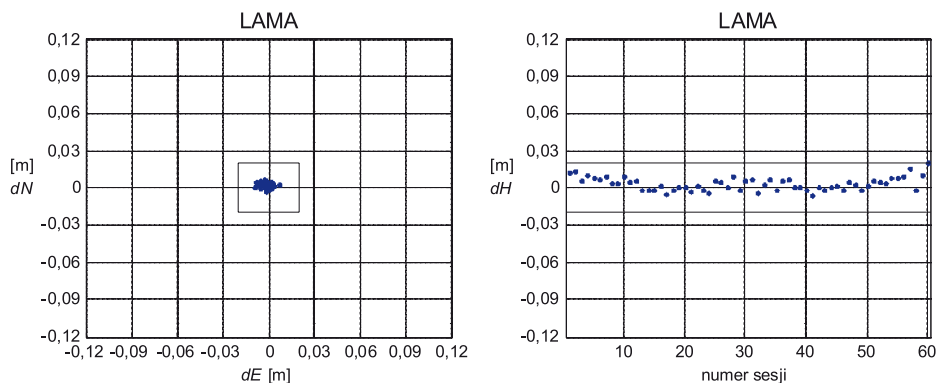
Na rysunku 8 przedstawiono odchyłki współrzędnych obliczonych na podstawie obserwacji GPS + GLONASS, podzielonych na sesje czterogodzinne. Maksymalne wartości odchyłek współrzędnych obliczonych względem współrzędnych prawdziwych wynoszą: 0,012 m dla współrzędnej północnej, -0,013 m dla wschodniej, 0,024 m dla wysokości, natomiast średnie osiągają wartości: $dN = 0,003$ m; $dE = -0,001$ m; $dH = 0,005$ m. W przypadku obserwacji GPS + GLONASS podzielonych na czterogodzinne sesje, dokładność wyznaczenia pozycji znacznie poprawiła się w porównaniu z wynikami opracowania, przedstawionymi na rysunku 3. Wszystkie (100%) pozycje horyzontalne mieszczą się w przedziale ± 2 cm (99,2% dla GPS).

W dalszej części eksperymentu opracowano obserwacje GPS + GLONASS, podzielone na ośmiogodzinne sesje obserwacyjne. Otrzymane wartości odchyłek



Rys. 8. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA względem pozycji referencyjnej, sesje 4 h, system GPS+GLONASS

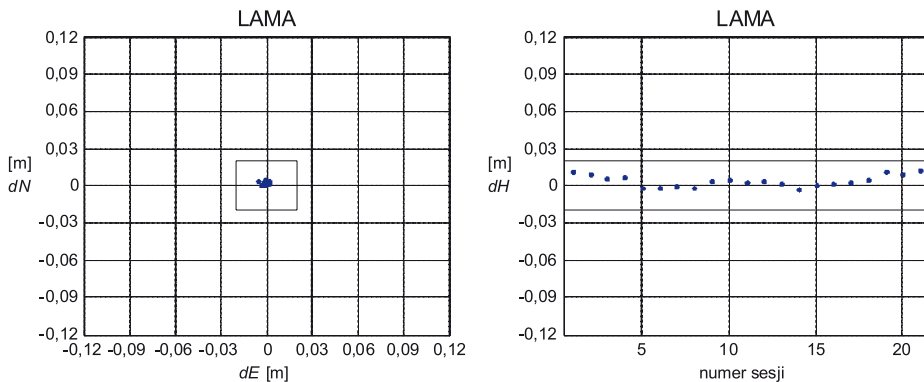
współrzędnych przedstawiono na rysunku 9. Na podstawie rysunku można wnioskować, że podobnie jak w przypadku oddzielnego opracowania obserwacji systemu GPS istnieje możliwość uzyskania centymetrowej dokładności pozycji horyzontalnej. Jednak w wyniku opracowania jednocześnie danych obserwacyjnych GPS i GLONASS uzyskujemy możliwość dokładniejszego wyznaczenia wysokości stacji — dokładność lepsza niż 1 cm. Maksymalne różnice współrzędnych obliczonych i prawdziwych uzyskały następujące wartości: 0,007 m dla współrzędnej północnej, $-0,009$ m dla wschodniej, 0,021 m dla wysokości, natomiast średnie są równe: $dN = 0,003$ m; $dE = -0,002$ m; $dH = 0,004$ m.



Rys. 9. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA względem pozycji referencyjnej, sesje 8 h, system GPS+GLONASS

Ostatnim etapem tej części eksperymentu było wyznaczenie współrzędnych stacji LAMA, obliczonych na podstawie obserwacji podzielonych na 24-godzinne sesje obserwacyjne, z wykorzystaniem systemów GPS oraz GLONASS. Wyniki

opracowania przedstawiono na rysunku 10. Podczas analizy wyników opracowania 24-godzinnych sesji można określić krytyczne wartości odchyłek współrzędnych obliczonych względem pozycji referencyjnej, które wynoszą: 0,005 m dla składowej północnej, $-0,006$ m dla wschodniej, 0,013 m dla wysokości. Uzyskane średnie są równe: $dN = 0,003$ m; $dE = -0,001$ m; $dH = 0,005$ m. Porównując wyniki opracowania obserwacji GPS+GLONASS, można stwierdzić, że podobne wartości uzyskano podczas oddzielnego opracowania danych obserwacyjnych GPS podzielonych na 24-godzinne sesje.



Rys. 10. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA względem pozycji referencyjnej, sesje 24 h, system GPS+GLONASS

W tabeli 4 przedstawiono średnie odchyłki pozycji stacji oraz ich odchylenia standardowe, otrzymane w wyniku opracowania obserwacji GPS + GLONASS.

TABELA 4
Statystyki dotyczące wyników opracowania obserwacji GPS + GLONASS

Długość sesji	Średnie odchyłki [cm]			STD [cm]			% ± 2 cm
	dN	dE	dH	N	E	H	NE
	LAMA						
1 h	0,4	-0,2	0,3	0,9	2,7	1,5	79,4
2 h	0,3	-0,1	0,4	0,6	0,8	1,1	96,7
4 h	0,3	-0,1	0,5	0,4	0,4	0,9	100
8 h	0,3	-0,2	0,4	0,2	0,3	0,5	100
24 h	0,3	-0,1	0,5	0,1	0,2	0,5	100

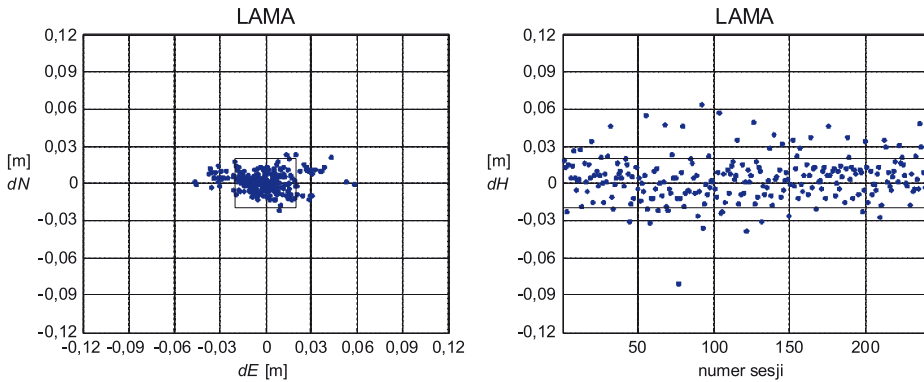
Na podstawie danych z tabel 3 i 4 oraz rysunków 1-10 można stwierdzić, że wykorzystanie obserwacji z obu systemów, GPS + GLONASS, wyraźnie poprawia

dokładność wyznaczanych współrzędnych. Największy wzrost dokładności występuje przy opracowaniu krótkich sesji i już sesje dwugodzinne pozwalają na otrzymanie pozycji o dokładności ok. 2 cm. W przybliżeniu można stwierdzić, że zastosowanie obserwacji GLONASS pozwala skrócić wymaganą długość sesji dla uzyskania założonej dokładności w przybliżeniu o połowę. Na uwagę zasługuje fakt, że obserwacje GLONASS pozwalają na poprawę jakości wyznaczonej pozycji pomimo gorszej jakości produktów IGS dla tego systemu. Świadczy to o tym, że większe znaczenie dla dokładności pozycji ma liczba obserwowanych satelitów i ich geometria. Jedynie dla sesji 24-godzinnych wartości odchylenia standardowego dla wszystkich wariantów opracowań są zbliżone.

3.2.3. Wykorzystanie „szybkich” produktów IGS

We wszystkich powyższych opracowaniach wykorzystywano finalne precyzyjne produkty IGS. Charakteryzują się one wysoką dokładnością, jednak są publikowane z kilkunastodniowym opóźnieniem. Wobec tego w pracy przeprowadzono eksperyment, polegający na wykonaniu obliczeń, opierających się na produktach „rapid”, które są dostępne z opóźnieniem od 17 do 41 godzin. Eksperyment ten miał na celu sprawdzenie różnic w osiągniętych dokładnościach współrzędnych otrzymanych z wykorzystaniem produktów „final” i „rapid”. Należy mieć na uwadze, iż w przypadku techniki PPP ze względu na brak różnicowania obserwacji, jakość tych produktów będzie miała większy wpływ na dokładność wyznaczenia pozycji niż w klasycznych technikach pozycjonowania względnego. Możliwa była jedynie realizacja wyznaczenia współrzędnych stacji na podstawie obserwacji GPS, ponieważ dla satelitów systemu GLONASS nie są publikowane „szybkie” produkty IGS. Poniżej na rysunku 11 przedstawiono przykładowe wyniki opracowania obserwacji GPS podzielonych na dwugodzinne sesje obserwacyjne.

Maksymalne wartości odchyłek współrzędnych obliczonych w programie *Bernese GPS Software* względem prawdziwej pozycji stacji LAMA wynoszą: 0,024 m dla składowej północnej, 0,057 m dla składowej wschodniej oraz -0,080 m dla wysokości. Zestawiając uzyskane wyniki z rezultatami analogicznego opracowania z wykorzystaniem produktów „final”, można zauważyć, że osiągnięte dokładności są porównywalne. Podobne wnioski można wyciągnąć na podstawie analizy danych zawartych w tabeli 5. Korzystając z „szybkich” produktów IGS i stosując do obliczeń technikę PPP, możliwe jest uzyskanie dokładności podobnego rzędu jak przy zastosowaniu produktów „final”. Można stwierdzić, że w sytuacji, gdy konieczne jest wykonanie obliczeń natychmiast po wykonaniu pomiarów, a więc w okresie poprzedzającym udostępnienie ostatecznych parametrów, możliwe jest korzystanie z produktów „rapid” bez pogorszenia dokładności wyników.



Rys. 11. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA względem pozycji referencyjnej, sesje 2 h, system GPS, produkty „rapid”

TABELA 5
Statystyki opracowania obserwacji GPS z wykorzystaniem różnych produktów IGS

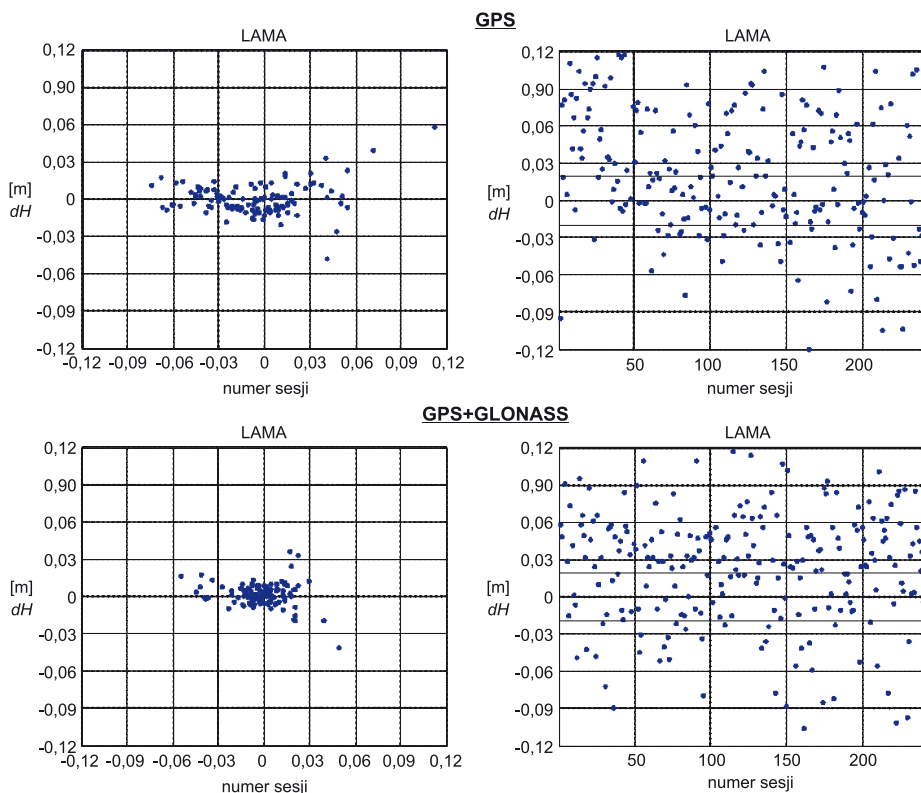
	Średnie odchyłki [cm]			STD [cm]			% ±2 cm
	<i>dN</i>	<i>dE</i>	<i>dH</i>	<i>N</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>NE</i>
2 h, GPS FINAL	0,1	-0,4	0,7	0,8	1,9	1,9	74,6
2 h, GPS RAPID	0,2	-0,1	0,5	0,8	1,7	1,8	78,8

3.2.3. Wyniki opracowania obserwacji z maską elewacji 40°

W ostatnim etapie eksperymentu przeprowadzono analizę przydatności obserwacji z systemu GLONASS w trudniejszych warunkach obserwacyjnych na przykładzie sesji dwugodzinnych z maską elewacji ustawioną na 40 stopni. Testy te były podyktowane chęcią sprawdzenia przydatności dodatkowych obserwacji (GLONASS) w warunkach zasłoniętego horyzontu, co często się zdarza w trakcie prowadzenia pomiarów przy ścianie lasu lub pomiędzy wysokimi budynkami. Wyniki opracowania przedstawiono w tabeli 6 oraz na rysunku 12.

TABELA 6
Statystyki opracowania obserwacji GPS oraz GPS+GLONASS, maska elewacji 40°

	Średnie odchyłki [cm]			STD [cm]			% ±2 cm
	<i>dN</i>	<i>dE</i>	<i>dH</i>	<i>N</i>	<i>E</i>	<i>H</i>	<i>NE</i>
2 h, GPS	0,8	-0,4	1,3	3,8	5,2	11,8	49,4
2 h, GPS+GLONASS	0,2	-0,2	2,4	0,8	2,0	5,4	80,3



Rys. 12. Odchyłki współrzędnych stacji LAMA względem pozycji referencyjnej, sesje 2 h, maska elewacji 40°

Uzyskane wyniki potwierdzają wysoką przydatność dodatkowych obserwacji przy ograniczonej widoczności satelitów. Wspólne opracowanie danych z GPS i GLONASS pozwoliło na znaczną redukcję rozrzutu wyników. W takim przypadku ponad 80% pozycji horyzontalnych miało dokładność lepszą niż ± 2 cm. Zaś przy opracowaniu samych obserwacji GPS niecałe 50% wyników uzyskało taką dokładność.

4. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie analizy dokładności techniki precyzyjnego pozycjonowania absolutnego w zależności od długości sesji obserwacyjnych oraz wykorzystanych systemów satelitarnych. W wyniku eksperymentu wyznaczono współrzędne stacji LAMA, BOGO, BOR1 za pomocą oprogramowania *Bernese GPS Software* przy wykorzystaniu obserwacji GPS. Wykonano również opracowanie obserwacji GPS + GLONASS pochodzących ze stacji LAMA, a także

przeprowadzono analizę wyznaczenia współrzędnych, przy zastosowaniu produktów IGS typu „rapid”.

Na podstawie wyników eksperymentów można stwierdzić, że opracowanie łącznie obserwacji GPS + GLONASS daje zawsze najlepsze wyniki, a przewaga tego rozwiązania rośnie wraz ze skróceniem długości sesji obserwacyjnych oraz z pogorszeniem warunków obserwacyjnych (zasłony). Podczas opracowania dwugodzinnych sesji, przy wykorzystaniu obserwacji GPS + GLONASS, możliwe jest uzyskanie pozycji trójwymiarowej o dokładności około 2-3 cm. W celu osiągnięcia lepszych dokładności, konieczne jest stosowanie dłuższych sesji obserwacyjnych. Opracowanie 8 godzin obserwacji GPS pozwala pozyskać współrzędne horyzontalne o błędzie wynoszącym około 1 cm oraz wysokość o błędzie około 3 cm. Aby otrzymać mniejszy błąd wysokości, rzędu 2 cm, należy wykorzystać łącznie obserwacje GPS i GLONASS. Sesje 24-godzinne pozwalają uzyskać dokładności milimetrowe bez względu na wybór systemu satelitarnego.

Należy zauważyć, że obecnie liczebność konstelacji GLONASS wzrosła z 16 (w czasie przeprowadzenia eksperymentów) do 21 aktywnych satelitów (stan na dzień 25.01.2011 r.), można zatem oczekiwać jeszcze bardziej znaczącej poprawy dokładności wyników uzyskiwanych z zastosowaniem obserwacji systemu GLONASS.

Badania nad dokładnością opracowania z wykorzystaniem „szybkich” produktów pozwoliły wywnioskować, że w celu uzyskania wyników o wysokiej dokładności, nie jest konieczne oczekiwanie na publikację finalnych produktów IGS. Produkty typu „rapid” zastosowane w technice PPP umożliwiają osiągnięcie dokładności wyznaczenia współrzędnych na podobnym poziomie, jak w przypadku opracowania z wykorzystaniem produktów „final”.

Artykuł wpłynął do redakcji 25.03.2011 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2011 r.

LITERATURA

- [1] J. KOUBA, P. HÉROUX, *Precise point positioning using IGS orbit and clock products*, GPS Solutions, 5, 2, 2001, 12-28.
- [2] Y. GAO, K. CHEN, *Performance analysis of precise point positioning using real-time orbit and clock products*, Journal of Global Positioning Systems, 3, 1-2, 2004, 95-100.
- [3] R.F. LEANDRO, M.C. SANTOS, R.B. LANGLEY, *Analyzing GNSS data in precise point positioning software*, GPS Solutions, 15, 1, 2009, 1-13.
- [4] CH. CAI, Y. GAO, *Precise point positioning using combined GPS and GLONASS observations*, Journal of Global Positioning Systems, 6, 1, 2007, 13-22.
- [5] R. DACH, U. HUGENTOBLE, P. FRIDEZ, M. MEINDL, *Bernese GPS Software version 5.0*, Stämpfli Publications AG, Berno, 2007.
- [6] S. SCHAER, *Mapping and predicting the Earth's Ionosphere using the Global Positioning System*, PhD thesis, University of Bern, 1999.
<http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>, dn. 12.01.2011
<ftp://garner.ucsd.edu>, marzec 2010

K. STĘPNIAK, P. WIELGOSZ, J. PAZIEWSKI

**Analysis of PPP accuracy depending on observing session duration
and GNSS systems used**

Abstract. GPS Precise Point Positioning (PPP) is becoming increasingly used in contemporary geodesy. There were numerous research presented on PPP accuracy based on processing of daily observing sessions. This paper presents PPP accuracy analysis depending on the length of the observing sessions, where sessions from 1 to 24 hours were processed and analyzed. In addition, the results of studies on usefulness of GLONASS data in PPP are presented. These results are based on a joint processing of the GPS and GLONASS observables. All the numerical tests were carried out using Bernese software v. 5.0.

The obtained results show that the processing of just 2 hours of GNSS data allows for 3D positioning with accuracy of 2-3 cm. Also, joint processing of GPS and GLONASS data always provides better results comparing to GPS-only solution. The advantage of the GPS+GLONASS solution is more distinct with shorter sessions or worse observing conditions.

Keywords: Satellite Geodesy, GPS, GLONASS, Precise Point Positioning (PPP)