



Ultra szybkie statyczne pozycjonowanie GNSS z zastosowaniem systemów GPS i Galileo

JACEK PAZIEWSKI, MARTA KRUKOWSKA

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej,
Instytut Geodezji, 10-719 Olsztyn, ul. Oczapowskiego 1, jacek.paziewski@uwm.edu.pl

Streszczenie. Środowisko naukowe podejmowało już niejednokrotnie problem łącznego wykorzystania obserwacji z niezależnych systemów GNSS, jednak przedmiotem badań był najczęściej model luźnej integracji. Istnienie dwóch korespondujących częstotliwości L1/E1 oraz L5/E5a w systemach globalnego pozycjonowania GPS oraz Galileo stwarza możliwość ścisłej integracji obserwacji w jednym modelu matematycznym, co może mieć pozytywny wpływ na wyniki precyzyjnego pozycjonowania względnego. W artykule przedstawiono rezultaty zastosowania powyższego podejścia do opracowania obserwacji GPS+Galileo w trybie szybkiego pozycjonowania statycznego. Eksperyment bazował na opracowaniu obserwacji pochodzących ze sprzętowego symulatora sygnałów GNSS Spirent. Wyniki wskazują, że możliwe jest znaczne poprawienie rezultatów precyzyjnego pozycjonowania przy ściśle zintegrowanym opracowaniu obserwacji pochodzących z dwóch niezależnych systemów GPS i Galileo

Słowa kluczowe: geodezja satelitarna, GPS, Galileo, szybkie statyczne pozycjonowanie

1. Wprowadzenie

Obecnie w precyzyjnym pozycjonowaniu satelitarnym najpowszechniej wykorzystywany jest system GPS z dostępnymi obserwacjami kodowymi i fazowymi na dwóch częstotliwościach L1 i L2. Głównym ograniczeniem systemu GPS jest niewielka liczba sygnałów transmitowanych z satelitów do użytkowników systemu. Modernizacja systemu GPS zwiększy liczbę dostępnych sygnałów do trzech częstotliwości (L1, L2, L5). W rozwijanym europejskim systemie Galileo planowane jest wykorzystanie większej liczby częstotliwości oznaczonych jako E1, E5a, E5b, E6, E5(E5a+E5b). Używanie w systemach GPS i Galileo tych samych częstotliwości 1 575.420 MHz dla L1 i E1 oraz 1 176.450 MHz dla L5 i E5a da możliwość tworzenia

różnic obserwacji (podwójnych oraz potrójnych różnic obserwacji kodowych i fazowych) nie tylko w ramach satelitów systemu, lecz także pomiędzy satelitami obu systemów.

TABELA 1

Częstotliwości sygnałów w systemie Galileo

Oznaczenie	Częstotliwość	Długość fali
E1	1 575,420	19,0
E6	1 278,750	23,4
E5	1 191,795	25,2
E5a	1 176,450	25,5
E5b	1 207,140	24,8

Podstawą precyzyjnego, szybkiego pozycjonowania jest szybkie i prawidłowe rozwiązanie nieoznaczoności pomiarów fazowych. Łączne zastosowanie dwóch niezależnych systemów GPS i Galileo znacznie zwiększy liczbę dostępnych obserwacji, co będzie miało duże znaczenie dla prawidłowego rozwiązania nieoznaczoności pomiarów fazowych przy niewielkiej liczbie epok obserwacyjnych. Również w przypadku występowania znacznych zasłon terenowych, np. w gęstej zabudowie miejskiej, każde dodatkowe obserwacje z satelitów mają niebagatelne znaczenie dla zwiększenia prawdopodobieństwa prawidłowego rozwiązania nieoznaczoności. Z większą liczbą dostępnych częstotliwości będzie możliwe również utworzenie większej liczby kombinacji liniowych o większej długości fali. To zwiększy możliwości szybkiego i wiarygodnego rozwiązania nieoznaczoności.

Środowisko naukowe prowadziło już analizy wpływu nowych sygnałów na precyzyjne satelitarne pozycjonowanie. Rezultaty badań pozwalają sądzić, że możliwe jest znaczne skrócenie wymaganej sesji obserwacyjnej przy zachowaniu, a nawet podniesieniu dokładności i wiarygodności wyników, wykorzystując wielosystemowe obserwacje [1-8]. Szczegółowe wyniki teoretycznych badań prowadzonych przez Tiberiusa [1] wskazują na znaczną poprawę wiarygodności rozwiązania nieoznaczoności pomiarów fazowych przy wykorzystaniu systemów GPS i Galileo. Julien przedstawił wstępne rezultaty wieloczęstotliwościowego pozycjonowania względnego GPS+Galileo [2]. Również współautor pracy prowadził już analizy dotyczące precyzyjnego pozycjonowania względnego GPS+Galileo. We wcześniejszych pracach [3] przedstawiono sposób pozycjonowania z pojedynczej epoki z wykorzystaniem sieciowych poprawek atmosferycznych i wieloczęstotliwościowych obserwacji GPS+Galileo. Badania dotyczące pozycjonowania autonomicznego GPS+Galileo prowadzone były przez Zhao [4]. Zastosowanie nowych obserwacji Galileo było również analizowane pod kątem modyfikacji i rozwoju metod rozwiązywania nieoznaczoności pomiarów fazowych [5, 6]. Wcześniejsze badania prowadzone przez

autorów potwierdziły także pozytywny wpływ łącznego opracowania obserwacji GPS oraz EGNOS w precyzyjnym pozycjonowaniu względnym [5].

W pracy przedstawiono wyniki badań nad precyzyjnym wyznaczaniem pozycji na podstawie opracowania obserwacji z krótkich statycznych sesji obserwacyjnych GNSS. Przeanalizowano wpływ włączenia kodowych i fazowych obserwacji z satelitów Galileo na dokładność współrzędnych wynikowych oraz skuteczność rozwiązania nieoznaczoności obserwacji fazowych w precyzyjnym pozycjonowaniu względnym. Do obliczeń wykorzystano autorskie oprogramowanie GINPOS [9].

2. Metodyka precyzyjnego pozycjonowania GPS+Galileo

Poniżej przedstawiono zgeneralizowany (na podstawie [10]) model matematyczny precyzyjnego pozycjonowania względnego z wykorzystaniem podwójnych różnic obserwacji fazowych i kodowych na wybranej częstotliwości oznaczonej jako n :

$$\begin{aligned}\lambda_n \varphi_{kl,n}^{ij} - s_{kl}^{ij} + T_{kl}^{ij} + I_{kl,n}^{ij} + \lambda_n N_{kl,n}^{ij} &= 0, \\ P_{kl,n}^{ij} - s_{kl}^{ij} + T_{kl}^{ij} - I_{kl,n}^{ij} &= 0,\end{aligned}\tag{1}$$

gdzie: λ_n — długości fali dla wybranej częstotliwości n ;

$\varphi_{(kl,n)}^{ij}$ — podwójnie zróżnicowane obserwacje fazowe pomiędzy satelitami i, j a stacjami k, l na wybranej częstotliwości n ;

$P_{(kl,n)}^{ij}$ — podwójnie zróżnicowane obserwacje kodowe na wybranej częstotliwości n ;

s_{kl}^{ij} — podwójnie zróżnicowana odległość geometryczna będąca funkcją odległości geometrycznych;

$N_{kl,n}^{ij}$ — nieoznaczoności pomiarów fazowych;

T_{kl}^{ij} — podwójnie zróżnicowane opóźnienie troposferyczne;

$I_{kl,n}^{ij}$ — podwójnie zróżnicowane opóźnienie jonosferyczne.

W przypadku większej niż jeden liczby sygnałów równania tworzone są dla każdej częstotliwości. Model rozwiązywany jest metodą najmniejszych kwadratów z wagowaniem parametrów [10]. Ze względu na dużą liczbę równań obserwacyjnych oraz parametrów wyrównanie przeprowadzane jest sekwencyjnie. Poszukiwanie najlepszego zestawu ze zbioru nieoznaczoności będących liczbami całkowitymi przeprowadzane jest metodą LAMBDA, która charakteryzuje się bardzo dobrymi rezultatami w sytuacji opracowywania niewielkiej liczby danych obserwacyjnych [11].

Jednym z istotniejszych etapów obliczeń w precyzyjnym pozycjonowaniu jest walidacja rozwiązania nieoznaczoności obserwacji fazowych. Walidacja nieoznaczoności ma sprawdzić, czy wybrany zestaw nieoznaczoności jest prawidłowy i najbardziej prawdopodobny. W prezentowanych badaniach do sprawdzenia prawidłowości rozwiązania nieoznaczoności wykorzystano test W -ratio oraz F -ratio [12]. Wartość współczynnika W można obliczyć z zależności:

$$W = \frac{d}{\sqrt{\text{Var}(d)}}, \quad (2)$$

gdzie: $d = \Omega_s - \Omega_m$;
 Ω_m, Ω_s — oznaczają wartości sumy kwadratów poprawek do obserwacji z rozwiązania, przyjmując najlepszy oraz drugi najlepszy zestaw nieoznaczoności. Wartość współczynnika dla testu F -ratio można wtedy obliczyć z zależności:

$$F = \frac{\Omega_s}{\Omega_m}. \quad (3)$$

Wartość krytyczna współczynnika dobierana jest często doświadczalnie, najczęściej na poziomie 2,0-3,0 [12]. Wartości krytyczne dla współczynników mogą być też obliczane, przyjmując wybrany rozkład prawdopodobieństwa z odpowiednim poziomem ufności. Przy walidacji nieoznaczoności zakłada się wysoki poziom ufności na poziomie 95%, 99 lub 99,9%. Dla testu W -ratio może to być *test Studenta*, dla testu F -ratio *Fishera*. Dla prezentowanych wyników zastosowano wartość krytyczną dla testu W -ratio na poziomie 3,0, określoną doświadczalnie na podstawie wcześniejszych testów oraz przeglądu literatury przedmiotu [12].

3. Eksperyment obliczeniowy

3.1. Pozyskanie symulowanych sygnałów satelitarnych systemów nawigacyjnych

Obecny stan zaawansowania prac nad budową systemu Galileo oraz modernizacją systemu GPS uniemożliwia w pełni wykorzystanie prawdziwych danych obserwacyjnych do łącznego opracowania obserwacji z obu systemów — tworzenia różnic obserwacji pomiędzy satelitami dwóch systemów. Z tego względu w prezentowanych badaniach jako materiał obserwacyjny posłużyły obserwacje GPS i Galileo zdobyte w oparciu o sygnały z symulatora nawigacyjnych systemów satelitarnych Spirent uzyskane podczas stażu naukowego w centrum Europejskiej

Agencji Kosmicznej ESTEC (*European Space Research and Technology Centre* w Noordwijk w Holandii [13]).

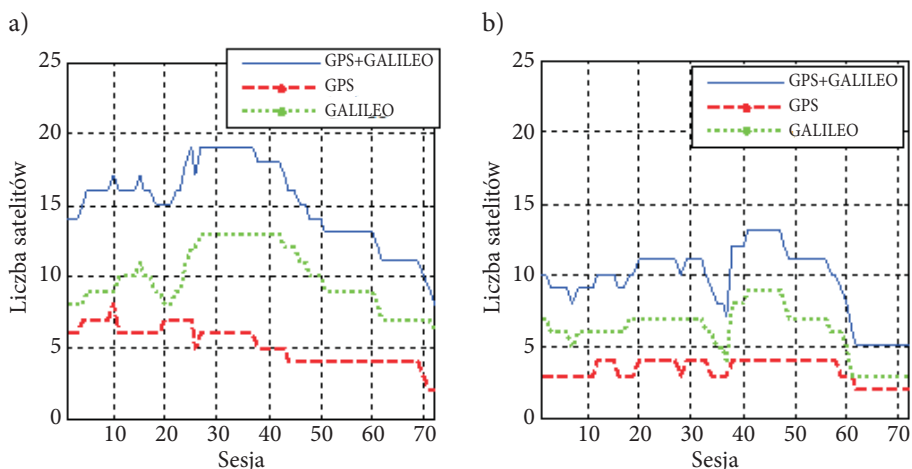


Rys. 1. Wykorzystany symulator sygnałów nawigacyjnych systemów satelitarnych Spirent GSS7700/7800

Oprogramowaniem, które w przypadku symulatorów Spirent umożliwia zarządzanie scenariuszem symulacji, jest SimGen pracujący na komputerze klasy Windows PC. Scenariusz symulacji posiada unikalną nazwę oraz łączy zbiór plików źródłowych — wejściowych. Baza danych umożliwia połączenie plików źródłowych oraz ustawień scenariusza. Stworzony i zapisany scenariusz może być odtwarzany dowolną liczbę razy przy takich samych ustawieniach konstelacji [14, 15].

Symulacje sygnałów satelitarnych dla dwóch konstelacji GPS i Galileo przeprowadzono dla wybranych lokalizacji: jednej stacji wyznaczanej — oznaczonego RR01 oraz dwóch najbliższych stacji sieci ASG-EUPOS — KUTN i KONI. Dzięki ustawieniu w symulacji lokalizacji stacji o położeniu, w którym istnieją prawdziwe stacje systemu ASG-EUPOS, wyniki przeprowadzonego eksperymentu umożliwiają określenie wpływu ewentualnego dołączenia obserwacji z systemu Galileo na rezultaty precyzyjnego wyznaczania pozycji w warunkach polskiej sieci ASG-EUPOS [16, 17]. Okres rejestracji obserwacji wynosił 6 godzin. Czas ten podzielono następnie na 72 niezależne sesje obserwacyjne. Do rejestracji obserwacji satelitarnych wykorzystano odbiornik Septentrio TUR-N będący na wyposażeniu laboratorium ESTEC/ESA.

Przez cały okres rejestracji w godzinach 10:00-16:00 istotnie więcej widocznych było satelitów systemu Galileo niż GPS. Pod koniec sesji zaobserwowano znaczny spadek liczby widocznych satelitów (rys. 2).



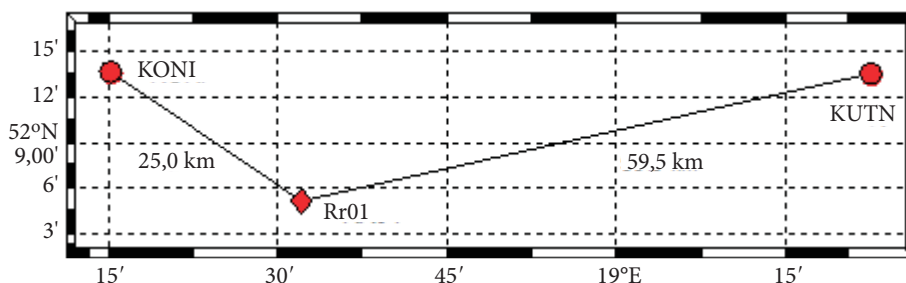
Rys. 2. Liczba satelitów wykorzystanych w opracowaniu wektora KONI-RR01: a) powyżej 10° nad horyzontem powyżej — panel lewy oraz b) 30° nad horyzontem — panel prawy

3.2. Rezultaty testów numerycznych precyzyjnego pozycjonowania

W celu oceny wpływu ściśle zintegrowanego opracowania obserwacji GPS+Galileo analizie poddano rezultaty precyzyjnego pozycjonowania względnego. Wskaźnikami oceny jakości precyzyjnego pozycjonowania były parametry opisujące skuteczność rozwiązania nieoznaczoności pomiarów fazowych oraz statystyki dokładności współrzędnych wyznaczanych. Skuteczność rozwiązania nieoznaczoności analizowano na podstawie empirycznego wskaźnika udziału procentowego sesji, które pozytywnie przeszły test walidacji do liczby wszystkich sesji (AVR — *ambiguity validation rate*) [3, 9]. Średnie odchyłki współrzędnych oraz odchylenia standardowe obliczane były na podstawie sesji z pozytywnym wynikiem testu walidacji rozwiązania nieoznaczoności.

Obliczenia przeprowadzono dla pojedynczych wektorów o długościach 25 oraz 60 km. W każdym przypadku stacją wyznaczaną był punkt RR01 w nawiązaniu do stacji KONI lub KUTN. Rysunek 3 przedstawia lokalizację stacji, dla których przeprowadzono symulację i obliczenia.

W opracowaniu tworzone podwójne różnice, obserwacje pomiędzy sygnałami z satelitów z dwóch systemów w jednym modelu funkcjonalnym (1). Wykorzystano obserwacje fazowe i kodowe na zbieżnych w obu systemach częstotliwościach L1 i L5 (GPS) oraz E1 i E5a (Galileo) [7]. W celu eliminacji refrakcji troposferycznej wykorzystano model *a priori* troposfery UNB3m [18] z estymacją rezydualnego opóźnienia troposferycznego części mokrej. Na estymowane rezydualne opóźnienia troposferyczne nałożono jednak ściśle ograniczenia w modelu wyrównania metodą najmniejszych kwadratów z wagowaniem parametrów [10, 19]. Wcześniejsze badania



Rys. 3. Szkic rozmieszczenia punktów oraz wektorów poddanych opracowaniu

pokazały, że takie podejście jest zalecane w przypadku krótkich sesji obserwacyjnych, kiedy zmiana geometrii satelitów jest niewielka [19, 20].

Opracowanie obserwacji zakładało wykorzystanie zewnętrznego globalnego modelu jonosfery. Z uwagi na to, że obserwacje pochodziły z symulatora, możliwe było intencjonalne zmniejszenie oryginalnych wartości opóźnień jonosferycznych o 33% w celu zasymulowania wprowadzenia poprawek jonosferycznych z modelu jonosfery analogicznie do metodyki przedstawionej w pracy [7]. Należy zaznaczyć, że skuteczność eliminacji wpływu opóźnienia jonosferycznego przez modele takie jak Klobuchar jest szacowana na poziomie 50% [10].

Przeanalizowano cztery scenariusze opracowania obserwacji statycznych dla krótkich sesji obserwacyjnych. W tym celu całą sześciogodzinną sesję podzielono na 72 sesje o długości 5 minut. Pierwsze dwa scenariusze zakładały pozyskanie obserwacji przy pełnej widoczności satelitów. W tym przypadku w obliczeniach wykorzystywano obserwacje z satelitów powyżej 10° nad horyzontem. Dwa ostatnie scenariusze zakładały pozyskanie obserwacji przy ograniczonej widoczności satelitów (np. w terenie zurbanizowanym). Przyjęto wtedy wykorzystanie obserwacji z satelitów widocznych powyżej 30° nad horyzontem.

Scenariusze obliczeniowe zakładały wykorzystanie obserwacji dwuczęstotliwościowych:

1. L1/L5 GPS pełna widoczność satelitów;
2. L1/L5 GPS + E1/E5a Galileo pełna widoczność satelitów;
3. L1/L5 GPS ograniczona widoczność satelitów;
4. L1/L5 GPS + E1/E5a Galileo ograniczona widoczność satelitów.

W tabelach 2 oraz 3 zaprezentowano analizowane statystyki rozwiązania dla sesji o długości 5 minut z interwałem 30 sekund (10 epok) dla wektorów o długości odpowiednio 25 oraz 60 km.

Najlepsze rezultaty pod względem dokładności otrzymano w przypadku rozwiązania wektora o długości 25 km przy pełnej widoczności satelitów i z jednoczesnym opracowaniem obserwacji GPS i Galileo (tab. 2). W tej sytuacji średnie odchyłki od pozycji referencyjnej dla składowych w kierunkach N, E, U wyniosły odpowiednio -1 mm, 1 mm i 2 mm, z odchyleniami standardowymi 2 mm, 2 mm, 3 mm. Przy braku

występowania zasłon terenowych (obcięcie horyzontu 10°) i długości wektora 25 km nie zauważono znaczącej poprawy rezultatów walidacji rozwiązania nieoznaczoności na skutek włączenia obserwacji Galileo. Zaobserwowano jednakże czterokrotne zmniejszenie odchylenia standardowego dla wysokości w przypadku dołączenia obserwacji Galileo (odchylenie standardowe 3 mm) w stosunku do GPS (12 mm). Włączenie obserwacji z satelitów systemu Galileo zwiększyło udział procentowy sesji z pozytywnym wynikiem testu walidacji nieoznaczoności (parametr AVR) z 95,8 do 100%. Większy efekt poprawienia wskaźnika AVR jest widoczny w przypadku opracowywania obserwacji w utrudnionych warunkach obserwacyjnych (scenariusze 3 i 4 — znacznie ograniczony horyzont). Wtedy udział procentowy sesji, które pozytywnie przeszły walidację nieoznaczoności, zwiększył się niemal dwukrotnie z poziomu 47,9% do poziomu 100%. Uzyskano dwukrotne zmniejszenie wartości odchylenia standardowego dla składowej N do wartości 3 mm, przy jednoczesnym zwiększeniu wartości dla komponentu E z wartości 3 mm do 5 mm. Odchylenie standardowe wysokości dla opracowania obserwacji GPS oraz GPS+Galileo przy ograniczonej widoczności satelitów wyniosło 18 mm. Średnie odchyłki od pozycji referencyjnej w przypadku opracowywania wektora o długości 25 km w sesjach 5-minutowych nie przekraczają ± 7 mm dla każdej składowej współrzędnych.

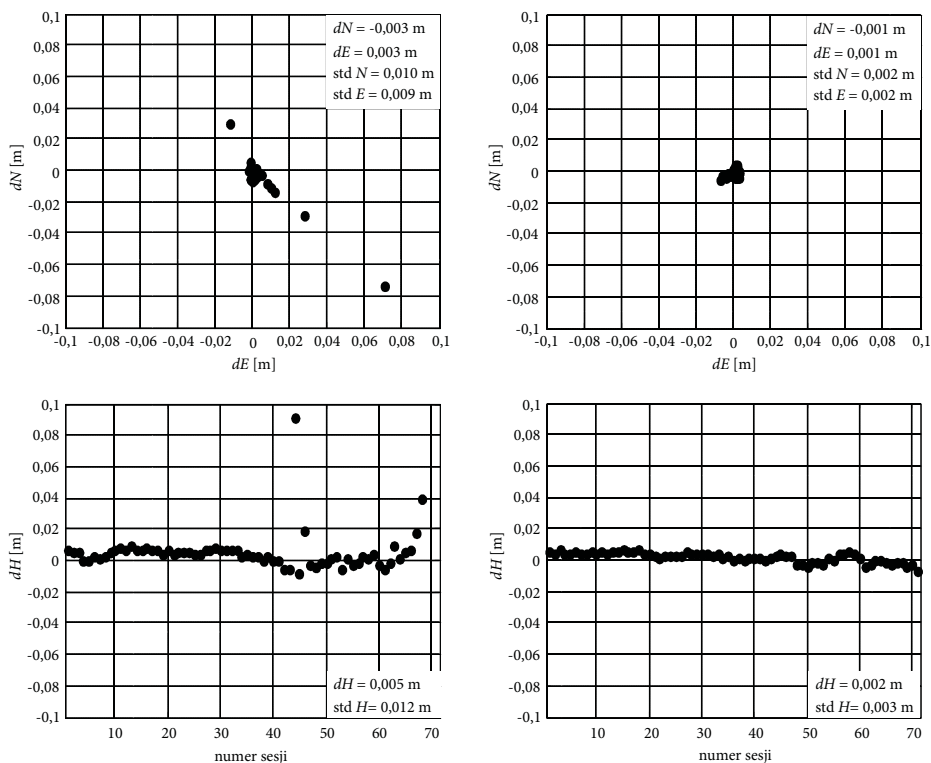
TABELA 2

Statystyki wyznaczenia pozycji punktu RR01 w sesjach 5-minutowych dla wektora KONI-RR01 o dł. 25 km (odch. std. — odchylenie standardowe, śred. odch. — średnia odchyłka od pozycji referencyjnej, AVR — udział sesji z pozytywnym wynikiem testu walidacji)

	składowa	Pełna widoczność satelitów		Ograniczona widoczność satelitów	
		GPS	GPS+Galileo	GPS	GPS+Galileo
śr. odch.	N [cm]	-0,3	-0,1	0,1	0,1
odch. std		1,0	0,2	0,6	0,3
śr. odch.	E [cm]	0,3	0,1	0,0	-0,2
odch. std		0,9	0,2	0,3	0,5
śr. odch.	U [cm]	0,5	0,2	0,7	-0,5
odch. std		1,2	0,3	1,8	1,8
AVR [%]		95,8	100	47,9	100

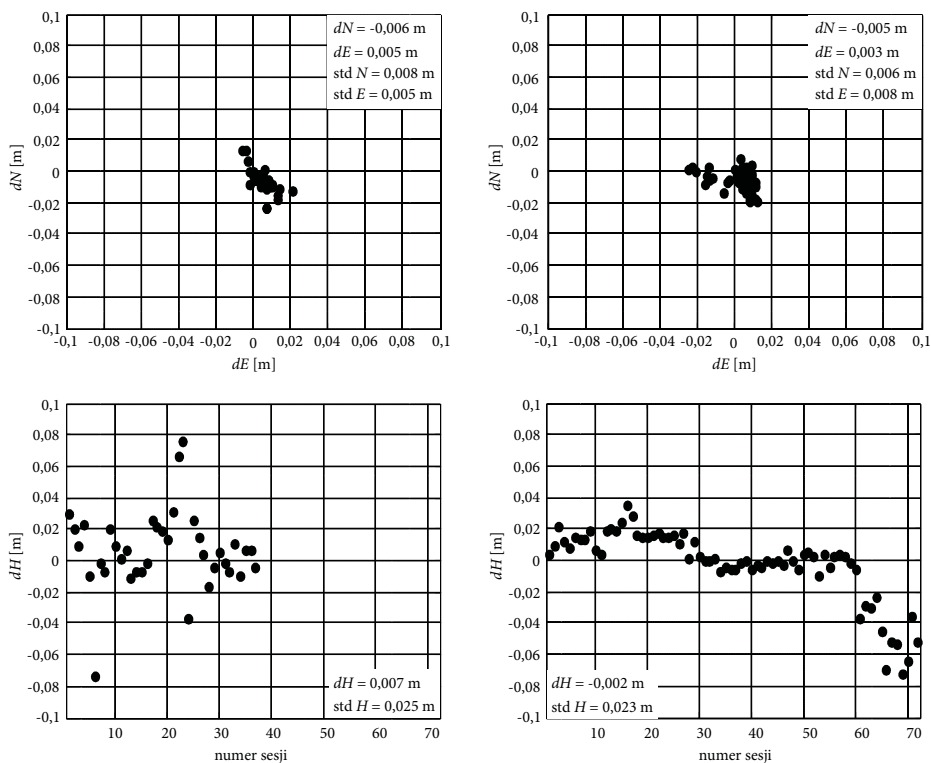
Mniejsza liczba obserwowanych satelitów pod koniec sesji obserwacyjnej ma swoje bezpośrednie odzwierciedlenie w wynikach rozwiązania pozycji dla stacji wyznaczonej RR01. Na wykresach 4 i 5 z łatwością można zaobserwować większe odchyłki składowej wysokościowej pod koniec okresu poddanego opracowaniu.

W przypadku wyznaczenia pozycji stacji RR01 w nawiązaniu do stacji KUTN (długość wektora 60 km) otrzymano nieznacznie gorsze rezultaty zarówno pod



Rys. 4. Odchyłki pozycji wyznaczonej punktu RR01 w stosunku do pozycji referencyjnej z rozwiązania wektora KONI-RR01 o długości 25 km z wykorzystaniem obserwacji satelitów powyżej 10° systemu GPS (panel lewy) oraz GPS+Galileo z sesji 5-minutowej (panel prawy)

względem dokładności (średnie odchyłki od pozycji referencyjnej i ich odchylenie standardowe), jak i walidacji rozwiązania nieoznaczoności czy istnienia rozwiązania w ogóle dla tych scenariuszy opracowania, które zakładały wykorzystanie obserwacji tylko systemu GPS (tab. 3). W obu przypadkach jednoczesnego opracowania obserwacji GPS+Galileo otrzymano stuprocentowy udział sesji, które pozytywnie przeszły walidację nieoznaczoności. W przypadku wykorzystania tylko obserwacji GPS przy ograniczonej widoczności satelitów tylko 38,6% sesji ze wszystkich 72 sesji pozytywnie przeszło walidację rozwiązania nieoznaczoności. Przy pełnej widoczności satelitów parametr AVR wyniósł 87,3%, a więc niewiele mniej niż w analogicznej sytuacji, ale dla krótszego wektora KONI-RR01. Z drugiej jednak strony, analizując odchylenia standardowe dochodzące do kilkunastu centymetrów oraz średnie odchyłki otrzymane w tym scenariuszu, można wnioskować, że walidację nieoznaczoności musiały przejść pozytywnie również te sesje, dla których wybrany zestaw nieoznaczoności nie był prawidłowy. Na tej podstawie można sądzić, że należałoby przeprowadzić bardziej szczegółowe analizy dotyczące doboru



Rys. 5. Odchyłki pozycji wyznaczonej punktu RR01 w stosunku do pozycji referencyjnej z rozwiązania wektora KONI-RR01 o długości 25 km z wykorzystaniem obserwacji satelitów powyżej 30° systemu GPS (panel lewy) oraz GPS+Galileo z sesji 5-minutowej (panel prawy)

wartości krytycznej dla testu W -ratio przy ograniczonej widoczności satelitów bądź też zastosowania innego testu.

TABELA 3

Statystyki wyznaczenia pozycji punktu RR01 w sesjach 5-minutowych dla wektora KUTN-RR01 o dł. 60 km (odch. std. — odchylenie standardowe, śred. odch. — średnia odchyłka od pozycji referencyjnej, AVR — udział sesji z pozytywnym wynikiem testu walidacji)

	składowa	Pełna widoczność satelitów		Ograniczona widoczność satelitów	
		GPS	GPS+Galileo	GPS	GPS+Galileo
śr. odch.	N [cm]	4,9	-0,2	-0,3	-0,1
odch. std		13,8	0,3	0,5	0,3
śr. odch.	E [cm]	-3,3	-0,5	0,0	-0,1
odch. std		11,9	1,0	0,6	0,3

cd. tabeli 3

śr. odch.	U [cm]	-5,1	0,1	-1,1	0,3
odch. std		13,4	2,8	4,0	1,1
AVR [%]		87,3	100	38,6	100

4. Wnioski

W badaniach przeanalizowano kilka strategii opracowania obserwacji bazujących na wykorzystaniu obserwacji pochodzących z dwóch niezależnych systemów satelitarnego pozycjonowania GPS i Galileo w precyzyjnym pozycjonowaniu z ultrakrótkich sesji obserwacyjnych.

Włączenie obserwacji z satelitów Galileo znacznie zwiększyło liczbę prawidłowo rozwiązanych sesji. Największy pozytywny wpływ łącznego opracowania GPS+Galileo zaobserwowano w trudnych warunkach obserwacyjnych, przy dużej liczbie zasłon terenowych. Nawet w tak niekorzystnych warunkach zastosowanie sygnałów GPS+Galileo umożliwiło uzyskanie wiarygodnej pozycji. Otrzymano wtedy ponad dwukrotnie większy udział sesji, z pozytywnym wynikiem testu walidacji nieoznaczoności, osiągając wartość 100%.

Ścisła integracja obserwacji GPS i Galileo miała także istotny wpływ na dokładność precyzji wyznaczenia współrzędnych zarówno w przypadku pełnej, jak i ograniczonej widoczności satelitów. Przy pełnej widoczności satelitów zastosowanie obserwacji GPS i Galileo spowodowało około czterokrotne zmniejszenie wartości odchyłeń standardowych dla wszystkich współrzędnych dla wektora 25 km w stosunku do wykorzystania tylko systemu GPS. W tym przypadku udało się otrzymać wartości odchyłeń standardowych współrzędnych w układzie topocentrycznym N, E, U odpowiednio na poziomie 2 mm, 2 mm i 3 mm. Większą poprawę zaobserwowano dla dłuższego z wektorów.

Należy jednak mieć na uwadze, że wyniki oparte są na danych pochodzących ze sprzętowego symulatora GNSS. Z tego względu uzyskiwane dokładności wyznaczenia współrzędnych punktów mogą nie odzwierciedlać wyników, które będą uzyskiwane przy wykorzystaniu rzeczywistych sygnałów.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach grantu DEC 2011/03/N/ST10/05317.

Podziękowanie

Autorzy wyrażają podziękowania Jaronowi Samsonowi z centrum badawczego ESTEC Europejskiej Agencji Kosmicznej za udostępnienie symulatora sygnałów satelitarnych.

Artykuł wpłynął do redakcji 3.02.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 15.04.2014 r.

LITERATURA

- [1] TIBERIUS C., PANY T., EISSFELLER B., JOOSTEN P., VERHAGEN S., *0.99999999 confidence ambiguity resolution with GPS and Galileo*, GPS Solut, 6, 2002, 96-99, DOI: 10.1007/s10291-002-0022-6.
- [2] JULIEN O., ALVES P., CANNON M. E., LACHAPPELLE G., *Improved triple-frequency GPS/Galileo carrier phase ambiguity resolution using a stochastic ionosphere modeling*, Proc. ION-NTM-2004, Institute of Navigation, San Diego, California, 2004, 441-452.
- [3] PAZIEWSKI J., WIELGOSZ P., *Assessment of GPS+Galileo and multi-frequency Galileo single-epoch precise positioning with network corrections*, GPS Solut, online first, 2013, DOI 10.1007/s10291-013-0355-3.
- [4] ZHAO C., OU J., YUAN Y., *Positioning accuracy and reliability of GALILEO, integrated GPS-GALILEO system based on single positioning model*, Chin. Sci. Bull., 50(12), 2005, 1252-1260, DOI: 10.1007/BF03183701.
- [5] JI S., CHEN W., ZHAO C., DING X., CHEN Y., *Single epoch ambiguity resolution for Galileo with the CAR and LAMBDA methods*, GPS Solut, 11, 2007, 259-268, DOI: 10.1007/s10291-007-0057-9.
- [6] CELLMER S., PAZIEWSKI J., WIELGOSZ P., *Fast and precise positioning using MAFA method and new GPS and Galileo signals*, Acta Geodyn. Geomater., 10, 3(171), 2013, 393-400, DOI: 10.13168/AGG.2013.0038.
- [7] PAZIEWSKI J., WIELGOSZ P., KRUKOWSKA M., *Application of SBAS pseudorange and carries phase signals to precise instantaneous single-frequency positioning*, Acta Geodyn. Geomater., 10(4), 2013, 421-430, DOI:10.13168/AGG.2013.0041.
- [8] STĘPNIAK K., WIELGOSZ P., PAZIEWSKI J., *Badania dokładności pozycjonowania techniką PPP w zależności od długości sesji obserwacyjnej oraz wykorzystywanych systemów pozycjonowania satelitarneho*, Biul. WAT, 1, 2012, 429-450.
- [9] PAZIEWSKI J., *Nowe algorytmy do precyzyjnego wyznaczania pozycji z wykorzystaniem sygnałów europejskich systemów satelitarnych Galileo i EGNOS*, rozprawa doktorska, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, 2012.
- [10] LEICK A., *GPS Satellite Surveying*, 3rd edn. Wiley, New Jersey, 2004.
- [11] TEUNISSEN P.J.G., *The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation*, J. Geod., 70, 1995, 65-82, DOI: 10.1007/BF00863419.
- [12] WANG J., STEWART M., TSAKIRI M., *A discrimination test procedure for ambiguity resolution on-the-fly*, J. Geod., 72, 1998, 644-653, DOI: 10.1007/s001900050204.
- [13] http://www.esa.int/About_Us/ESTEC, 2014.
- [14] HORNBOSTEL A., KONOVALTSEV A., DENKS H., ANTREICH F., *Simulation of Multi-Element Antenna Systems for Navigation Applications*, IEEE Systems Journal, 2, 1, 2008.
- [15] <http://www.spirent.com/Products/SimGEN>, 2014.
- [16] BOSY J., GRASZKA W., LEONCZYK M., *ASG-EUPOS — a multifunctional precise satellite positioning system in Poland*, Eur. J. Nav., 5(4), 2007, 2-6.
- [17] SZAFRANEK K., BOGUSZ J., FIGURSKI M., *GNSS reference solution for permanent station stability monitoring and geodynamical investigations: the ASG-EUPOS case study*, Acta Geodyn. Geomater., 10(1), 2013, 67-75.
- [18] LEANDRO R.F., LANGLEY R.B., SANTOS M.C., *UNB3m_pack: A neutral atmosphere delay package for GNSS*, GPS Solut, 12, 1, 2008, 65-70.
- [19] WIELGOSZ P., PAZIEWSKI J., BARYŁA R., *On constraining zenith tropospheric delays in processing of local GPS networks with Bernese software*, Surv. Rev., 43, 323, 2011, 472-483, DOI: 10.1179/003962611X13117748891877.

- [20] WIELGOSZ P., PAZIEWSKI J., KRANKOWSKI A., KROSCZYNSKI K., FIGURSKI M., *Results of the Application of Tropospheric Corrections from Different Troposphere Models for Precise GPS Rapid Static Positioning*, Acta Geophysica, 60, 4, 2011, 1236-1257, DOI: 10.2478/s11600-011-0078-1.

J. PAZIEWSKI, M. KRUKOWSKA

Ultra fast static GNSS positioning with GPS and Galileo systems

Abstract. Scientific community has already carried out research concerning combining observations from separate GNSS systems. However, these studies were mostly related to loose combining approach. Two overlapping frequencies L1/E1 and L5/E5a in GPS/Galileo systems allow tightly combining observations in one mathematical model. In this paper, first results of the tightly combined GPS+Galileo fast precise positioning carried out at the UWM Olsztyn were presented. The experiment was based on the simulated data obtained from SPIRENT GSS7700/7800 hardware signal simulator. Research shows that application of the tightly combined GPS+Galileo observations gives improvement in the results of the precise positioning.

Keywords: satellite geodesy, GPS, Galileo, ultrafast precise positioning

