

Zofia Rzepecka\*, Alojzy Wasilewski\*

## Wpływ dołączenia pseudosatelity na wyznaczenia GPS w warunkach zasłon sfery niebieskiej

### 1. Wstęp

Pseudosatelity (PL) są to urządzenia symulujące satelity GPS, poprzez wysyłanie sygnałów elektromagnetycznych, takich samych jak sygnały satelity GPS. Ich lokalizacja wybierana jest przez użytkownika w zależności od potrzeb. Idea wykorzystania PL jest prosta: są one ustawiane na punktach o znanych współrzędnych i służą jako dodatkowy satelita [7, 6, 2, 4, 5]. Wspomagają wyznaczenia satelitarne, dzięki polepszeniu geometrii wyznaczenia.

Problemy związane z zastosowaniem PL streszcza się w literaturze następująco [Wang 2002]:

- efekt wielotorowości – zwykle mocniejszy i trudniejszy do wyeliminowania niż w przypadku sygnału dochodzącego od satelity, gdyż sygnał od PL rozchodzi się w pobliżu powierzchni ziemi;
- efekt bliski – daleki (*near-far*) – przy poruszającym się odbiorniku zachodzi bardzo szybka zmiana mocy odbieranego sygnału od PL, związana z dużymi zmianami odległości PL – odbiornik;
- błędy linearyzacji – z powodu niewielkiej odległości PL – odbiornik są one znacznie większe niż przy standardowej linearyzacji odległości satelita – odbiornik; z tym problemem wiąże się także konieczność bardzo dokładnego wyznaczenia pozycji anteny nadawczej PL, jak też konieczność dużo lepszej znajomości współrzędnych przybliżonych pozycjonowanej anteny odbiornika [7];
- znaczny efekt troposferyczny – opóźnienie troposferyczne w przypadku sygnału poruszającego się w pobliżu powierzchni ziemi jest duże, obowiązują inne modele niż w przypadku sygnału przybywającego od satelity.

---

\* Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski, Olsztyn

W Instytucie Geodezji UWM zrealizowano grant KBN nt. „Koncepcja wykorzystania zintegrowanego systemu monitoringu obiektów mostowych z wykorzystaniem techniki GPS i pseudolotów”, nr 4T12E 00426. W ramach grantu przeprowadzono kilka doświadczeń dotyczących badania wpływu dołączenia PL na wyniki pozycjonowania satelitarnego. Wszystkie doświadczenia przeprowadzono we współpracy z Wydziałem Geomatyki Uniwersytetu w New Brunswick (Kanada) kierowanego przez prof. Adama Chrzanowskiego. Obserwacje opracowane na potrzeby tego artykułu zostały wykonane w dniach nr 322 i 323, 2005 r., przy użyciu odbiorników GPS Novatel DL4 oraz pseudosatelity IN200 firmy IntegriNautics.

## 2. Opis oprogramowania

Do opracowania zarejestrowanych obserwacji zastosowano własny program do wyznaczeń satelitarnych [5]. Program ten został odpowiednio zmodyfikowany, w celu przystosowania go do obliczeń związanych z PL. Obliczenia wykonano wykorzystując surowe dane obserwacyjne w postaci formatu Rinex oraz znane współrzędne PL. Opracowanie wykonano sekwencyjnie, w oparciu o metodę najmniejszych kwadratów [9].

Opracowany program, o nazwie SEKWYR, służy do sekwencyjnego opracowania obserwacji GPS, z możliwością uwzględnienia obserwacji do PL. Program został w całości opracowany w Instytucie Geodezji. W etapie pierwszym, na podstawie standardowego formatu RINEX, tworzone są zbiory wejściowe zawierające obserwacje satelitarne oraz dane efemerydalne, w formatach dogodnych do dalszego opracowania.

W kolejnych procedurach program realizuje następujące czynności wstępne:

- obliczenie pozycji autonomicznych dla obu końców wektora, wraz z oceną ich dokładności; na tym etapie obliczane są też poprawki chodu zegarów obu odbiorników, potrzebne w dalszych obliczeniach,
- eliminacja *cycle slips* na podstawie potrójnie zróżnicowanych obserwacji fazowych (lub opcjonalnie – odrzucenie takich satelitów, których obserwacje zawierają tak dużo przerw w dostawie sygnału, że prawidłowe określenie *cycle slips* staje się niemożliwe),
- określenie wartości nieoznaczoności dla satelitów przyjętych do obliczeń, na podstawie rozwiązania wsadowego dla kilku (w programie przyjęto 5) pierwszych epok pomiarowych (planuje się taką aktualizację oprogramowania, aby parametry nieoznaczoności wyznaczone były także sekwencyjnie).

Każdy z powyższych etapów został przystosowany do ewentualnego przyjęcia obserwacji zarejestrowanych dla PL, przy czym operator musi podać na wstępie

z jakim numerem PRN stowarzyszone są obserwacje PL oraz jak najdokładniejsze współrzędne PL w układzie WGS 84. Obliczenie współrzędnych PL musi nastąpić przed przystąpieniem do obliczeń. W przypadku opracowania wyników eksperymentów przeprowadzonych w ramach realizowanego grantu, PL jest umieszczony centrycznie pod anteną odbiornika GPS, po obliczeniu współrzędnych anteny, na podstawie sesji statycznej (lub kilku) należy tylko w otrzymanych współrzędnych uwzględnić różnicę wysokości centrum fazowego PL i anteny GPS.

Algorytm działania programu na etapie obliczeń właściwych oparty jest o podwójnie zróżnicowane obserwacje fazowe na częstotliwości L1. W przypadku pierwszej napotkanej epoki pomiarowej, program realizuje klasyczną procedurę metody najmniejszych kwadratów, przy czym parametrami wejściowymi są: macierz tworząca  $A$ , wektor obserwacji i wyrazów wolnych  $L$  oraz macierz wagowa podwójnie zróżnicowanych obserwacji  $P$  (uwzględniająca korelacje podwójnych różnic), z przyjętym a priori błędem średnim obserwacji fazowych równym 2 mm. Parametrami wyjściowymi (obliczanymi) tej procedury są: wektor poprawek do współrzędnych przybliżonych  $\hat{d}_x$ , estymator współczynnika wariancji  $\hat{\sigma}_0^2 = m_0^2$ , oraz macierze  $(A^T P A)$  i  $(A^T P A)^{-1}$  – na podstawie czego jest liczona macierz kowariancji i wag wyników (wektora poprawek). W kolejnych epokach realizowana jest procedura wyrównania sekwencyjnego, wg wzorów zaczerpniętych z [9].

Obserwacje do PL traktowane są podobnie, jak obserwacje do satelitów GPS, różnice polegają na:

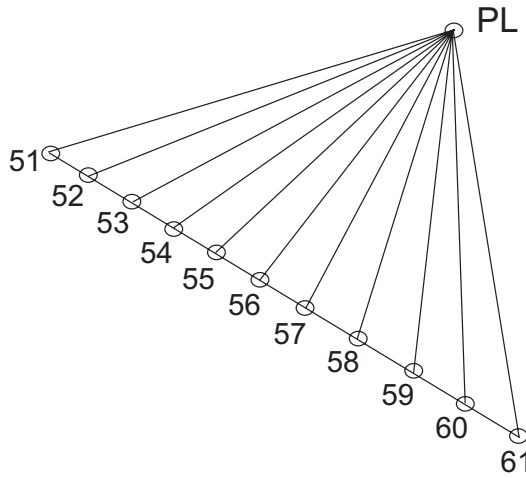
- przyjęciu stałych współrzędnych PL (zamiast obliczania orbity, jak jest w przypadku satelitów);
- zastosowaniu innego modelu poprawki troposferycznej dla PL [8].

### 3. Wyniki opracowania obserwacji GPS i PL

Badanie wpływu dołączenia PL realizowano porównując wyniki ze współrzędnymi otrzymanymi na podstawie wyrównanej sieci 11 wektorów, otrzymanych z 60-minutowych obserwacji statycznych opracowanych standardowym programem GPPS – do obliczania wektorów [1] i wyrównanych programem GEOLAB [3]. Należy nadmienić, że opracowanie tymi programami obserwacji PL jest niemożliwe. Otrzymane w ten sposób współrzędne przyjęto za prawdziwe w dalszych badaniach. Poglądowy szkic zmierzonej sieci umieszczono na rysunku 1.

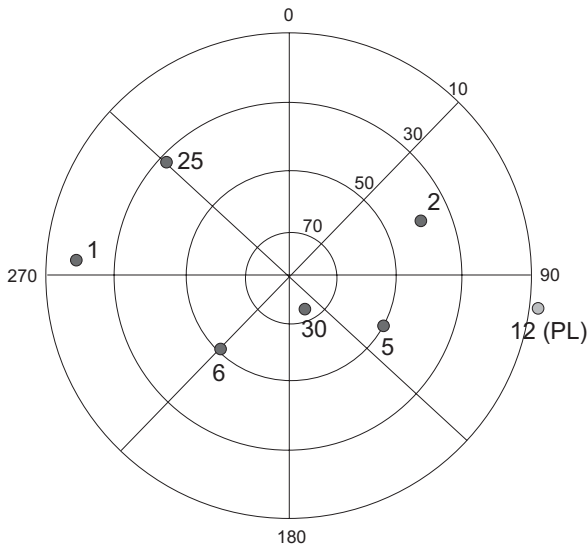
Sprawdzenia modelu poprawek troposferycznych, przyjętych dla obserwacji PL dokonano wcześniej [5]. W ramach tego sprawdzenia przetestowano wyniki opracowania wektora 60–61, długości ok. 100 m.

W tym artykule dokonano opracowania w różnych wariantach, najdłuższego z pomierzonych wektorów (51–61, długość ok. 1000 m).



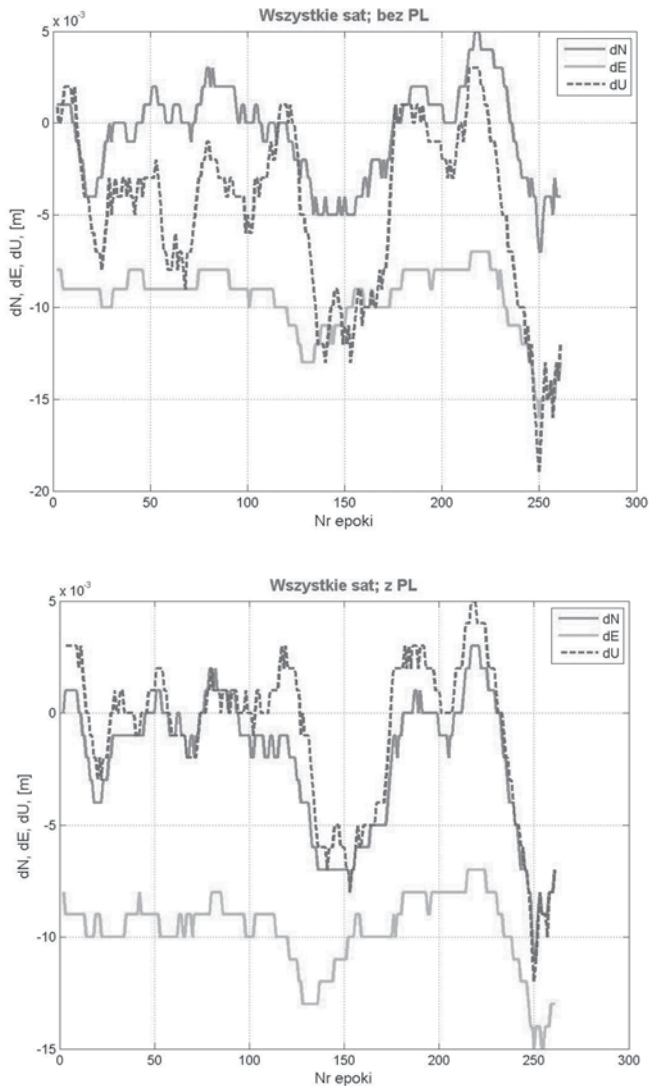
**Rys. 1.** Poglądowy szkic sieci eksperymentalnej (odległość 51–61 wynosi ok. 1000 m., azymut ok.  $299^{\circ}$ , odległość PL-56 ok. 175 m., bezpośrednio zmierzono wektory 51–52, ..., 60–61 oraz 51–61).

Poglądowe przedstawienie konfiguracji satelitów, wspólnie obserwowanych na obu końcach wektora, zamieszczono na rysunku 2. Satelita nr 30 został przyjęty za satelitę referencyjnego.



**Rys. 2.** Graficzne przedstawienie konfiguracji wspólnie obserwowanych satelitów na punktach 51–61 (odrzucono satelitę 21, z powodu złej jakości obserwacji)

W badaniach rozpatrzono wiele przypadków różnych zasłon, wyłączając z opracowania niektóre satelity. W przypadkach gdy jest duża liczba satelitów, wpływ dołączenia obserwacji do PL jest znikomy i w zasadzie nie ma znaczenia praktycznego. Wyniki obliczeń uzyskane dla pełnej konfiguracji satelitów, z PL i bez przedstawiono na rysunku 3 oraz w tabeli 1.



**Rys. 3.** Różnice pomiędzy współrzędnymi przyjętymi za prawdziwe a otrzymanymi z opracowania sekwencyjnego w kolejnych epokach obserwacji, bez PL i z PL

**Tabela 1.** Charakterystyka wyników i warunków pomiaru (wszystkie satelity)

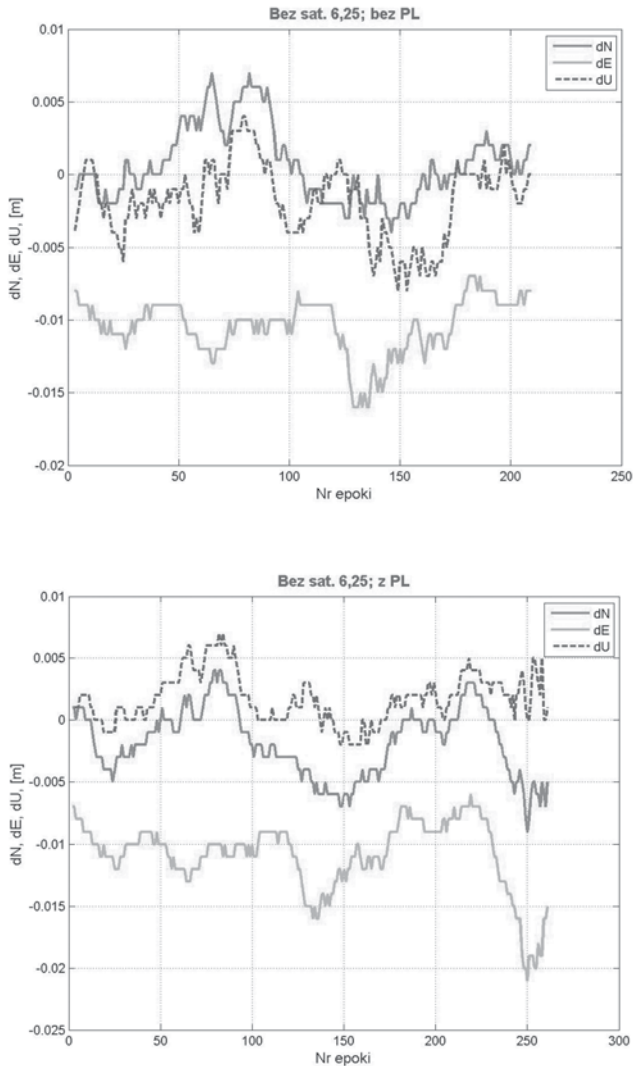
Charakterystyka	bez PL	z PL
średnie dN [m]	-0,001	-0,002
średnie dE [m]	-0,001	-0,010
średnie dU [m]	-0,005	-0,001
odchylenie stand, dN [m]	0,003	0,003
odchylenie stand, dE [m]	0,002	0,002
odchylenie stand, dU [m]	0,005	0,004
maksymalne dN [m]	0,007	0,011
maksymalne dE [m]	0,016	0,015
maksymalne dU [m]	0,019	0,012
RNDOP (od-do)	1,54-1,08	1,48-0,99
REDOP (od-do)	0,71-0,61	0,71-0,61
RVDOP (od-do)	1,64-1,39	1,54-1,35
RPDOP (od-do)	2,36-1,86	2,25-1,78

Widać niewielki wpływ dołączania obserwacji do PL.

W przypadkach odrzucania („zakrywania”) dwóch satelitów GPS, zbadano wszystkie możliwe kombinacje (bez odrzucania satelity nr 30 i zmieniania satelity referencyjnego).

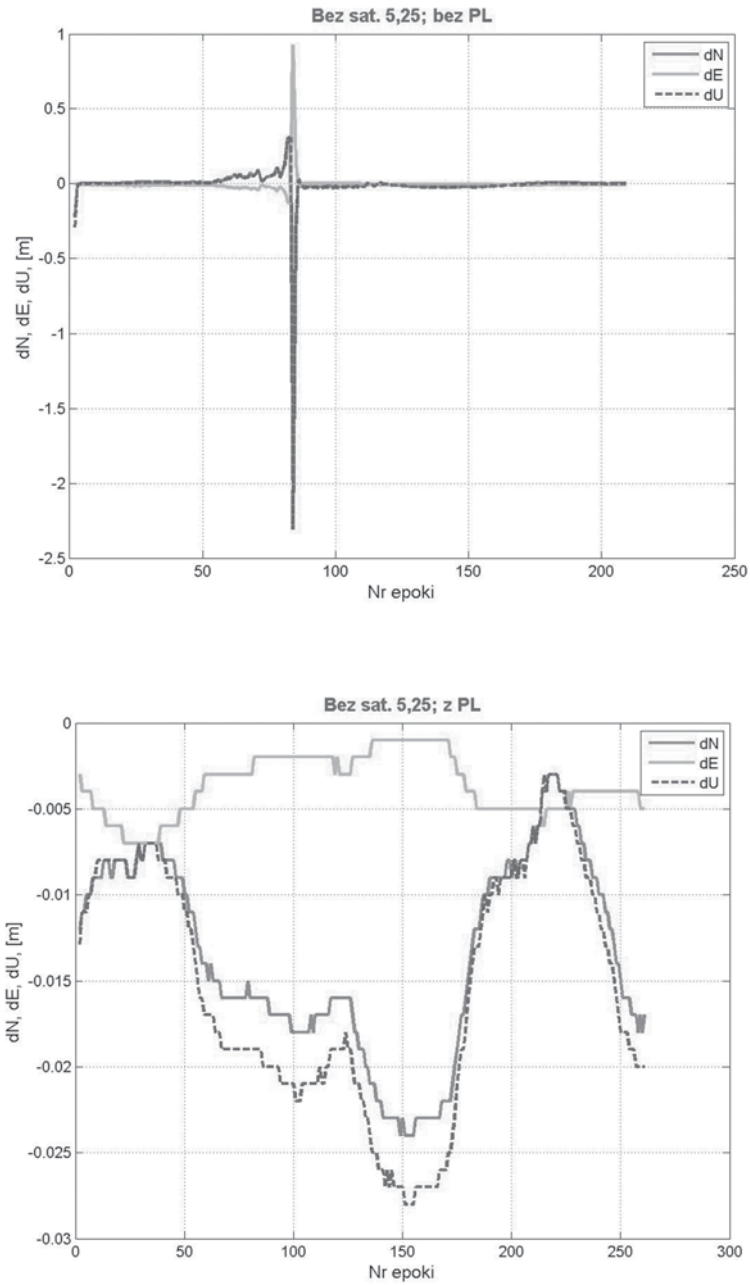
**Tabela 2.** Charakterystyka pomiarów i wyników (bez sat. 6 i 25)

Charakterystyka	bez PL (z I epoką)	bez PL (bez I epoki)	z PL
średnie dN [m]	-0,003	0,001	-0,002
średnie dE [m]	-0,010	-0,010	-0,011
średnie dU [m]	-0,003	-0,002	0,002
odchylenie stand, dN [m]	0,014	0,003	0,003
odchylenie stand, dE [m]	0,002	0,002	0,003
odchylenie stand, dU [m]	0,020	0,003	0,002
maksymalne dN [m]	0,206	0,007	0,009
maksymalne dE [m]	0,016	0,016	0,021
maksymalne dU [m]	0,292	0,008	0,007
RNDOP (od-do)	2,38-1,54	2,38-1,54	2,04-1,21
REDOP (od-do)	0,87-0,74	0,87-0,74	0,87-0,71
RVDOP (od-do)	1,81-1,68	1,81-1,68	1,80-1,68
RPDOP (od-do)	3,12-2,39	3,12-2,39	2,86-2,18



**Rys. 4.** Wyznaczenia przy niepełnej konfiguracji satelitów (pominięte satelity 6, 25), bez PL i z PL

Znaleziono przypadki zarówno niewielkiego wpływu dołączenia PL (rys. 4 i tab. 2), jak i przypadki, w których bez PL były bardzo duże błędy wyznaczeń, natomiast dołączenie PL powodowało znaczne polepszenie wyników (rys. 5 i tab. 3). Na rysunku 6 i w tabeli 4 przedstawiono przypadek, gdy bez PL błędy były rzędu kilku centymetrów, dołączenie PL zmniejszyło je.



Rys. 5. Wyznaczenia przy niepełnej konfiguracji satelitów (pominięte satelity 5, 25), bez PL i z PL

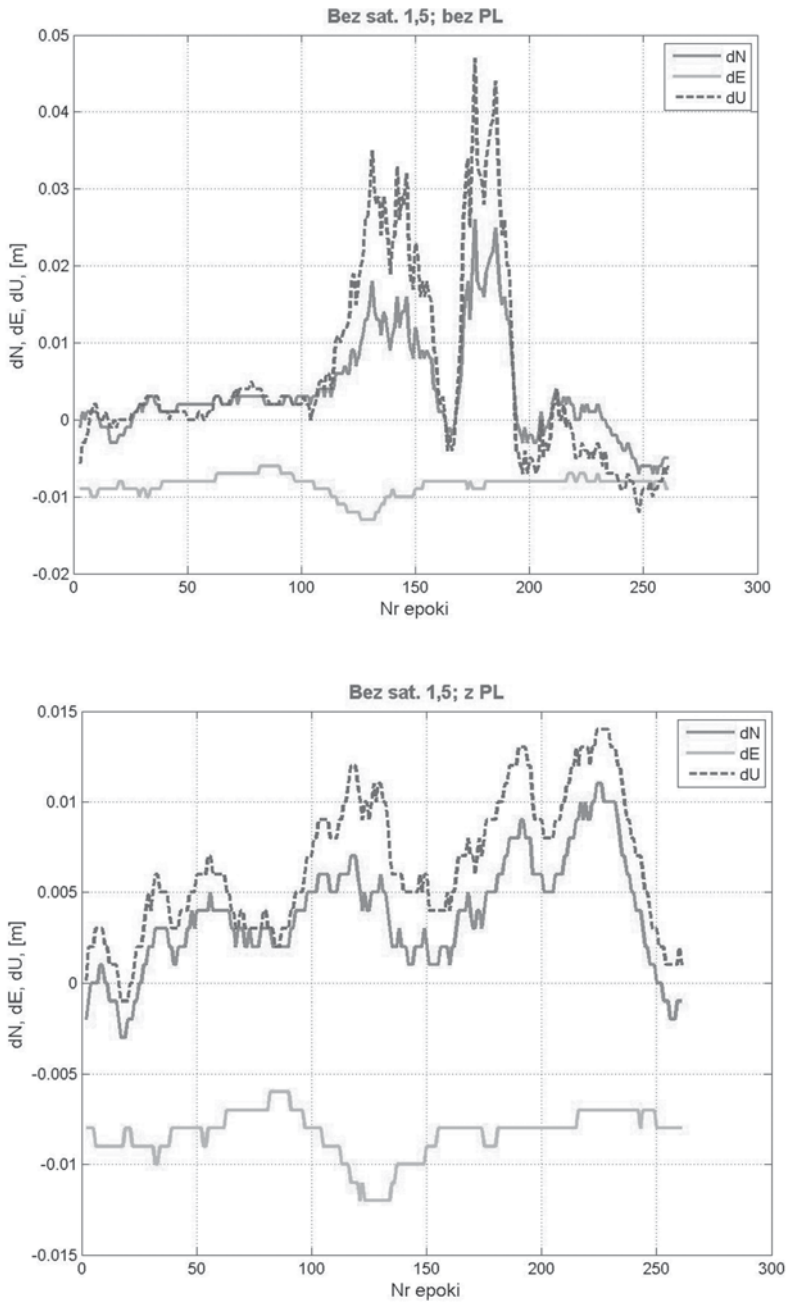


**Tabela 3.** Charakterystyka pomiarów i wyników (bez sat. 5 i 25)

Charakterystyka	bez PL	z PL
średnie dN [m]	-0,009	-0,014
średnie dE [m]	-0,006	-0,004
średnie dU [m]	-0,013	-0,015
odchylenie stand, dN [m]	0,166	0,006
odchylenie stand, dE [m]	0,067	0,012
odchylenie stand, dU [m]	0,167	0,007
maksymalne dN [m]	2,287	0,024
maksymalne dE [m]	0,925	0,007
maksymalne dU [m]	2,305	0,028
RNDOP (od-do)	4,09 – ponad 100	1,90 – 6,08
REDOP (od-do)	0,82 – ponad 100	0,77 – 1,10
RVDOP (od-do)	3,81 – ponad 100	2,63 – 7,83
RPDOP (od-do)	5,65 – ponad 100	3,11 – 9,95

**Tabela 4.** Charakterystyka pomiarów i wyników (bez sat. 1 i 5)

Charakterystyka	bez PL (z I epoką)	bez PL (bez I epoki)	z PL
średnie dN [m]	0,003	0,004	0,003
średnie dE [m]	-0,008	-0,008	-0,008
średnie dU [m]	0,004	-0,006	0,006
odchylenie stand, dN [m]	0,015	0,006	0,003
odchylenie stand, dE [m]	0,001	0,001	0,001
odchylenie stand, dU [m]	0,023	0,012	0,004
maksymalne dN [m]	0,216	0,026	0,011
maksymalne dE [m]	0,013	0,013	0,012
maksymalne dU [m]	0,307	0,047	0,014
RNDOP (od-do)	2,31 – ponad 100	2,31 – ponad 100	2,29 – 3,26
REDOP (od-do)	0,95 – ponad 100	0,95 – ponad 100	0,87 – 4,20
RVDOP (od-do)	3,25 – ponad 100	3,25 – ponad 100	2,73 – 4,38
RPDOP (od-do)	4,10 – ponad 100	4,10 – ponad 100	3,67 – 5,55



Rys. 6. Wyznaczenia przy niepełnej konfiguracji satelitów (pominięto satelity 1, 5), bez PL i z PL

#### 4. Wstępne wyniki badań pozycjonowania punktów przy symulowanym przemieszczeniu

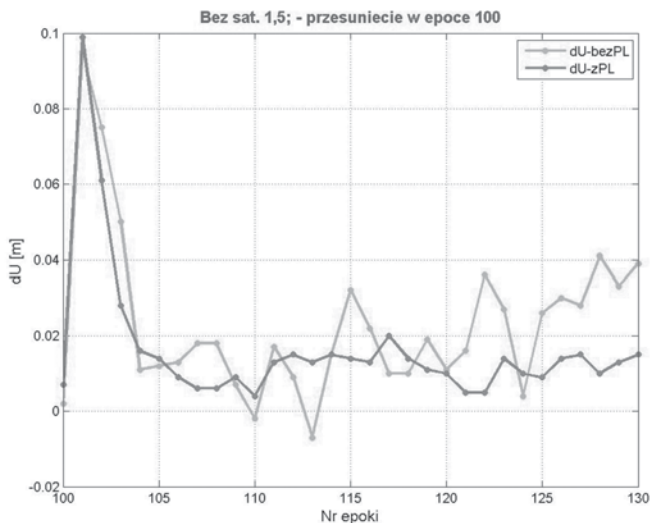
W ramach badania wpływu dołączenia PL do opracowania wyników pozycjonowania wykonano też wstępne obliczenia przy symulowanych przemieszczeniach punktu wyznaczanego.

Symulowano pionowe, 10-centymetrowe przemieszczenie, pomiędzy epoką 100 a 101, zmieniając odpowiednio pomiary fazowe o  $\Delta\phi$ , według wzoru

$$\Delta\phi = (odl\_new - odl\_old) / \lambda_1 \quad (1)$$

gdzie odpowiednie odległości ( $odl\_new$ ,  $odl\_old$ ) zostały policzone dla punktu przesuniętego i nie przesuniętego odpowiednio, na podstawie współrzędnych – zmienionych o odpowiednią wartość lub niezmienionych. Graficzne przedstawienie wyników dla epok od 100 do 130 znajduje się na rysunku 7, a liczbowa charakterystyka wyników – w tabeli 5.

Na podstawie podanych wyników widać, że z dołączonymi obserwacjami do PL, wyniki „trochę” szybciej reagują na przemieszczenie punktu wyznaczanego. Badania te nie są jeszcze kompletne, należy przeprowadzić je przy różnych wartościach współczynników DOP, różnej liczby satelitów, etc. Będzie to przedmiotem kolejnego artykułu.



Rys. 7. Wyniki wyznaczenia wysokości z PL i bez PL po wprowadzeniu symulowanego przemieszczenia punktu.

**Tabela 5.** Charakterystyka pomiarów i wyników (bez sat. 1 i 5), dla epok od 100 do 130, z symulowanym przemieszczeniem punktu wyznaczanego o  $\Delta h = 10$  cm

Charakterystyka	bez PL	z PL
średnie dN [m]	-0,011	-0,011
średnie dE [m]	-0,008	0,006
średnie dU [m]	-0,023	0,016
odchylenie stand, dN [m]	0,002	0,002
odchylenie stand, dE [m]	0,006	0,003
odchylenie stand, dU [m]	0,021	0,018
maksymalne dN [m]	0,014	0,014
maksymalne dE [m]	0,021	0,012
maksymalne dU [m]	0,095	0,099
RNDOP (od-do)	5,18 – 9,20	3,23 – 3,22
REDOP (od-do)	1,82 – 3,55	1,00 – 1,06
RVDOP (od-do)	8,83 – 16 – 67	4,26 – 4,38
RPDOP (od-do)	10,40 – 19,37	5,44 – 5,54

## 5. Wnioski

W przypadku dobrej konfiguracji satelitów wpływ dołączenia PL nie ma większego znaczenia praktycznego. W przypadkach złej konfiguracji – występujących zasłon sfery niebieskiej – dołączenie PL może znacznie polepszyć uzyskiwane wyniki. W wielu przypadkach dodanie obserwacji do PL było warunkiem koniecznym do uzyskania rozwiązania, bez PL układ stawał się nierozwiązywalny. W najbliższej przyszłości badania dotyczące dokładności wyznaczeń przemieszczeń techniką GPS wspomaganą PL zostaną uzupełnione. Kolejnym zagadnieniem przewidywanym do zbadania jest wpływ dołączenia obserwacji do PL na szybkość i wiarygodność wyznaczenia nieoznaczoności w pomiarach fazowych.

## Literatura

- [1] Ashtech Inc. 1992, *Ashtech XII GPPS (Manual)*, Sunnyvale, USA.
- [2] Barnes J., Rizos Ch., Wang J., Meng X., Cosser E., Dodson A.H., Roberts G.W.: *The Monitoring of bridge movements using GPS and Pseudolites*. International Sym-

- posium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, May 25–28, 2003, 563–571.
- [3] BitWise Ideas Inc.: *GeoLab (Manual)*, Kanada 1992.
- [4] Parkinson B.W., Spilker J.J. Jr.: *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. II, published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics 1996.
- [5] Rzepecka, Z., Wasilewski A., Cellmer S., Rapiński J.: *Integration of GPS and Pseudolites – effect on height determination accuracy*. FIG Symposium on Deformation Measurements, Baden, Austria, maj 2006.
- [6] Wang J.J., Wang J.L.: *Tropospheric Delay Estimation for Pseudolite Positioning*. GNSS 2004 – The 2004 International Symposium on GNSS/GPS, Sydney, Australia, 6–8 December 2004.
- [7] Wang J., Dai L., Tsujii T., Rizos C., Grejner-Brzezinska D., Toth C.K.: *GPS/INS/Pseudolite integration: Concepts, simulation and testing*. Proceedings of US Institute of Navigation GPS-2001, Salt Lake City, Utah, 11-14 September, 2001a, 2708–2715.
- [8] Wang J., Tsujii T., Rizos C., Dai L. & Moore M.: *GPS and pseudo-satellites integration for precise positioning*. Geomatics Research Australasia, 74: 2001b, 103–117.
- [9] Wiśniewski Z. *Rachunek wyrównawczy w geodezji*. Wydawnictwo UWM, Olsztyn 2005.