

Bogdan Skorupa\*

PRAKTYCZNA REALIZACJA ALGORYTMU ESTYMACJI  
LOKALNEJ RÓŻNICOWEJ REFRAKCJI JONOSFERYCZNEJ I TROPOSFERYCZNEJ  
NA OBSZARZE OGRANICZONYM SIECIĄ STACJI PERMANENTNYCH ASG-PL\*\*

---

## 1. Wstęp

W związku ze wzrostem liczby stacji permanentnych GPS działających na obszarze Polski oraz planami budowy sieci stacji permanentnych w ramach projektu ASG-EUPOS [10], użytkownicy systemu GPS w naszym kraju stają przed perspektywą znacznej poprawy efektywności swojej pracy. Do najważniejszych sposobów zwiększania efektywności i niezawodności pomiarów GPS na podstawie obserwacji z sieci stacji permanentnych należą wciąż udoskonalane metody estymacji i redukcji wpływu refrakcji na pomiary fazowe GPS [3, 8, 11].

W niniejszej pracy autor prezentuje metodę wyznaczania oraz uwzględniania wpływu różnicowej refrakcji jonosferycznej i troposferycznej w pomiarach fazowych GPS, zarejestrowanych na obszarze ograniczonym lokalną siecią stacji permanentnych lub innych stacji o precyzyjnie wyznaczonych współrzędnych geodezyjnych w danym jednolitym układzie odniesienia. Ideę tej metody zaczerpnięto z opracowań [2, 6].

## 2. Sformułowanie problemu estymacji lokalnej refrakcji różnicowej

W niniejszym opracowaniu pod pojęciem stacji referencyjnej rozumie się stację permanentną GPS lub inną stację, na której zarejestrowano pomiary fazowe sygnałów GPS za pomocą odbiornika dwuczęstotliwościowego. Ponadto zakłada się, że stacja referencyjna posiada precyzyjnie wyznaczone współrzędne geodezyjne w danym jednolitym układzie odniesienia. Stacją wyznaczaną będziemy nazywali punkt o nieznanach współrzędnych, na którym wykonano pomiary fazowe sygnałów GPS na jednej lub dwu częstotliwościach.

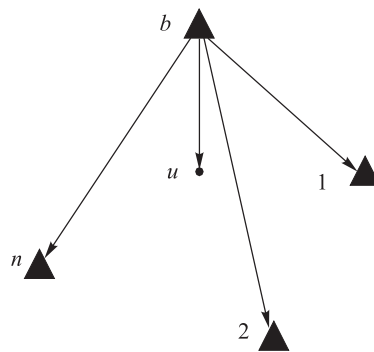
---

\* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

\*\* Praca wykonana w ramach badań statutowych nr. 11.11.150.478

Prezentowaną metodę estymacji lokalnej różnicowej refrakcji realizuje się przy użyciu następujących danych:

- wyznaczonych z wysoką precyzją współrzędnych geodezyjnych stacji referencyjnych 1, 2,  $b$ , ...,  $n$  (rys. 1) w danym jednolitym układzie odniesienia;
- pomiarów fazowych sygnałów GPS na stacjach referencyjnych 1, 2,  $b$ , ...,  $n$  i stacji wyznaczonej  $u$ , uzyskanych w wyniku wspólnej sesji pomiarowej;
- obliczonych dla danej sesji pomiarowej, całkowitych początkowych nieoznaczoności cykli fazowych w drugich różnicach, względem wspólnego dla wszystkich stacji satelity odniesienia oraz wybranej stacji referencyjnej  $b$  (tzw. stacji bazowej).



**Rys. 1.** Szkic sieci stacji referencyjnych  
Objaśnienia w tekście

Na wstępie pomiary fazowe ze wszystkich stacji należy poprawić ze względu na zmienność centrum fazowego anteny odbiornika GPS. Zbiory zawierające charakterystyki anten GPS są dostępne na stronie internetowej NGS (National Geodetic Survey) <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>. Algorytm uwzględniania tych poprawek w pomiarach fazowych GPS opisano szczegółowo w pracy [5].

Następnie należy opracować – dla zadanego interwału czasu – pomiary GPS zarejestrowane na stacjach referencyjnych w celu wyznaczenia całkowitych początkowych nieoznaczoności cykli fazowych w drugich różnicach dla wektorów określonych przez stację bazową i pozostałe stacje referencyjne.

Obliczone całkowite początkowe nieoznaczoności cykli fazowych można poddać kontroli, jeżeli odnoszą się do równoczesnych pomiarów GPS zarejestrowanych na co najmniej trzech stacjach referencyjnych. Kontrola wykorzystuje zasadę, zgodnie z którą dla dowolnej liczby  $n$  wektorów GPS tworzących figurę zamkniętą suma całkowitych początkowych nieoznaczoności cykli fazowych w drugich różnicach dla każdego satelity  $s$ , względem wspólnego dla wszystkich wektorów satelity odniesienia  $r$ , powinna wynosić zero [7]

$$\sum_{i=1}^n \nabla \Delta N_i^{s,r} = 0 \quad (1)$$

Zasada ta obowiązuje niezależnie od użytej w obliczeniach częstotliwości lub kombinacji liniowej częstotliwości podstawowych.

Kolejny etap obliczeń polega na wyznaczeniu drugoróżnicowych poprawek jonosferycznych i troposferycznych dla wektorów określonych przez stację bazową  $b$  oraz pozostałe stacje referencyjne  $1, 2, \dots, n$ . Poprawki te oblicza się dla częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ , na każdą epokę, dla każdego satelity względem tego samego satelity referencyjnego oraz wybranej stacji referencyjnej (tzw. stacji bazowej) zgodnie z następującymi wzorami [7]:

$$\nabla \Delta I_{1i,b}^{j,r} = k_1 [\lambda_1 (\nabla \Delta \phi_{1i,b}^{j,r} - \nabla \Delta N_{1i,b}^{j,r}) - \lambda_2 (\nabla \Delta \phi_{2i,b}^{j,r} - \nabla \Delta N_{2i,b}^{j,r})] \quad (2)$$

$$\nabla \Delta I_{2i,b}^{j,r} = k_2 [\lambda_1 (\nabla \Delta \phi_{1i,b}^{j,r} - \nabla \Delta N_{1i,b}^{j,r}) - \lambda_2 (\nabla \Delta \phi_{2i,b}^{j,r} - \nabla \Delta N_{2i,b}^{j,r})] \quad (3)$$

$$\nabla \Delta T_{i,b}^{j,r} = k_1 (\lambda_1 \nabla \Delta \phi_{1i,b}^{j,r} - \lambda_1 \nabla \Delta N_{1i,b}^{j,r}) - k_2 (\lambda_2 \nabla \Delta \phi_{2i,b}^{j,r} - \lambda_2 \nabla \Delta N_{2i,b}^{j,r}) - \nabla \Delta \rho_{i,b}^{j,r} \quad (4)$$

gdzie:

- $\nabla \Delta \phi$  — drugoróżnicowa faza sygnału GPS,
- $\nabla \Delta N$  — drugoróżnicowa początkowa całkowita nieoznaczoność cykli fazowych,
- $\lambda$  — długość fali sygnału GPS,
- $\nabla \Delta I$  — drugoróżnicowa poprawka jonosferyczna,
- $\nabla \Delta T$  — drugoróżnicowa poprawka troposferyczna,
- indeks dolny  $1$  i  $2$  — oznaczenie fali nośnej  $L_1$  ( $f_1, \lambda_1$ ) i  $L_2$  ( $f_2, \lambda_2$ ),
- indeks dolny  $i, b$  — oznaczenie stacji,
- indeks górny  $j, r$  — oznaczenie satelity.

Współczynniki  $k_1$  i  $k_2$  wyrażają się następującymi wzorami [7]:

$$k_1 = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$$

W równaniach (2)–(4) zaniedbano wartości szumu pomiarowego oraz innych czynników niemodelowych.

Kolejny etap algorytmu estymacji lokalnej różnicowej refrakcji polega na obliczeniu drugoróżnicowych poprawek jonosferycznych ( $\nabla \Delta I_{1u,b}^{j,r}$  i  $\nabla \Delta I_{2u,b}^{j,r}$ ) i troposferycznych ( $\nabla \Delta T_{u,b}^{j,r}$ ) dla wektora wyznaczanego  $b-u$ . Poprawki te uzyskuje się na drodze interpolacji. Współrzędne geodezyjne stacji referencyjnych i stacji wyznaczonej – dla uproszczenia procesu interpolacji – odwzorowuje się na płaszczyznę w dowolnym lokalnym odwzorowaniu (np. Gaussa–Krügera) [6]. W niniejszym opracowaniu zastosowano model interpolacji liniowej zarówno dla poprawek jonosferycznych, jak i troposferycznych. Należy jednak podkreślić, że w przypadku, kiedy różnice wysokości geodezyjnej między stacjami referencyjnymi znacznie przekraczają 100 m, należy uwzględnić w procesie interpolacji pionowy gradient poprawki troposferycznej [9].

Poniżej podano szczegółowy opis procesu interpolacji różnicowych poprawek jonosferycznych. Idea metody interpolacji tych poprawek sprowadza się do wykorzystania następującego wzoru

$$\overline{\nabla \Delta I_{u,b}^{j,r}} = a^{j,r} \cdot \Delta X_{u,b} + b^{j,r} \cdot \Delta Y_{u,b} \quad (6)$$

gdzie  $\overline{\nabla \Delta I_{u,b}^{j,r}}$  oznacza wartość drugoróżnicowej lokalnej poprawki jonosferycznej dla wektora  $b-u$  (rys. 1) oraz pary satelitów  $j, r$ , zaś  $\Delta X_{u,b}$  i  $\Delta Y_{u,b}$  oznaczają przyrosty współrzędnych płaskich między stacją wyznaczaną  $u$  i stacją bazową  $b$ . Wartości  $a^{j,r}$  i  $b^{j,r}$  są niewiadomymi. Należy je wyznaczyć osobno dla każdej epoki pomiarowej oraz dla każdego satelity  $j$ , względem satelity referencyjnego  $r$ . We wzorze (6) dla uproszczenia zapisu pominięto indeks dolny oznaczający częstotliwość. Aby obliczyć wartości współczynników dla satelity  $j$ , w danej epoce pomiarowej należy utworzyć równania typu (6) dla wektorów określonych przez stację bazową  $b$  oraz pozostałe stacje referencyjne  $1, 2, \dots, n$ :

$$\begin{aligned} \overline{\nabla \Delta I_{1,b}^{j,r}} &= a^{j,r} \cdot \Delta X_{1,b} + b^{j,r} \cdot \Delta Y_{1,b} \\ \overline{\nabla \Delta I_{2,b}^{j,r}} &= a^{j,r} \cdot \Delta X_{2,b} + b^{j,r} \cdot \Delta Y_{2,b} \end{aligned} \quad (7)$$

$M$

$$\overline{\nabla \Delta I_{n,b}^{j,r}} = a^{j,r} \cdot \Delta X_{n,b} + b^{j,r} \cdot \Delta Y_{n,b}$$

Jeżeli liczba stacji referencyjnych wynosi 4 lub więcej, wówczas niewiadome  $a^{j,r}$  i  $b^{j,r}$  wyznacza się, rozwiązując układ równań (7) metodą najmniejszych kwadratów. Następnie, na każdą epokę, dla każdego satelity oblicza się drugoróżnicowe poprawki jonosferyczne dla wektora  $b-u$  za pomocą wzoru (6). Niech ich wartości (obliczone dla częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ ) wynoszą odpowiednio  $\overline{\nabla \Delta I_{1u,b}^{j,r}}$  oraz  $\overline{\nabla \Delta I_{2u,b}^{j,r}}$ . Zakłada się, że obliczone w powyższy sposób drugoróżnicowe poprawki jonosferyczne spełniają zależności:

$$\overline{\nabla \Delta I_{1u,b}^{j,r}} = \nabla \Delta I_{1u,b}^{j,r} \quad (8)$$

$$\overline{\nabla \Delta I_{2u,b}^{j,r}} = \nabla \Delta I_{2u,b}^{j,r} \quad (9)$$

Jeżeli na stacji wyznaczanej zarejestrowano pomiary sygnałów GPS na dwu częstotliwościach, wówczas równania drugich różnic pomiaru fazy na stacji bazowej  $b$  i stacji wyznaczanej  $u$  oraz pary satelitów  $j, r$  można zapisać w następującej postaci:

$$\lambda_1 \nabla \Delta \phi_{1u,b}^{j,r} = \nabla \Delta \rho_{u,b}^{j,r} + \lambda_1 \nabla \Delta N_{1u,b}^{j,r} + \nabla \Delta T_{u,b}^{j,r} - \nabla \Delta I_{1u,b}^{j,r} \quad (10)$$

$$\lambda_2 \nabla \Delta \phi_{2u,b}^{j,r} = \nabla \Delta \rho_{u,b}^{j,r} + \lambda_2 \nabla \Delta N_{2u,b}^{j,r} + \nabla \Delta T_{u,b}^{j,r} - \nabla \Delta I_{2u,b}^{j,r} \quad (11)$$

Po dodaniu równania (8) do (10) oraz (9) do (11) otrzymujemy:

$$\lambda_1 \nabla \Delta \phi_{1u,b}^{j,r} + \overline{\nabla \Delta I_{1u,b}^{j,r}} = \nabla \Delta \rho_{u,b}^{j,r} + \lambda_1 \nabla \Delta N_{1u,b}^{j,r} + \nabla \Delta T_{u,b}^{j,r} \quad (12)$$

$$\lambda_2 \nabla \Delta \phi_{2u,b}^{j,r} + \overline{\nabla \Delta I_{2u,b}^{j,r}} = \nabla \Delta \rho_{u,b}^{j,r} + \lambda_2 \nabla \Delta N_{2u,b}^{j,r} + \nabla \Delta T_{u,b}^{j,r} \quad (13)$$

W równaniach (12) i (13) drugoróżnicowe poprawki jonosferycznych są znane.

Wartości poprawek troposferycznych dla punktu wyznaczanego  $\overline{\nabla \Delta T_{u,b}^{j,r}}$  estymuje się, stosując równania analogiczne do (6)–(9), gdzie wyraz  $\overline{\nabla \Delta I_{u,b}^{j,r}}$  zastąpiono przez  $\overline{\nabla \Delta T_{u,b}^{j,r}}$ . W wyniku interpolacji otrzymuje się wartości poprawek troposferycznych dla punktu wyznaczanego  $\nabla \Delta T_{u,b}^{j,r}$ . Czynimy następnie założenie analogiczne do (8)

$$\overline{\nabla \Delta T_{u,b}^{j,r}} = \nabla \Delta T_{u,b}^{j,r} \quad (14)$$

Po odjęciu równania (14) od (12) i (13) otrzymujemy:

$$\lambda_1 \nabla \Delta \phi_{1u,b}^{j,r} + \overline{\nabla \Delta I_{1u,b}^{j,r}} - \nabla \Delta T_{u,b}^{j,r} = \nabla \Delta \rho_{u,b}^{j,r} + \lambda_1 \nabla \Delta N_{1u,b}^{j,r} \quad (15)$$

$$\lambda_2 \nabla \Delta \phi_{2u,b}^{j,r} + \overline{\nabla \Delta I_{2u,b}^{j,r}} - \nabla \Delta T_{u,b}^{j,r} = \nabla \Delta \rho_{u,b}^{j,r} + \lambda_2 \nabla \Delta N_{2u,b}^{j,r} \quad (16)$$

Niewiadomymi są obecnie wartości współrzędnych stacji  $u$ , zawarte w pierwszych wyrazach składników prawych stron równań (15) i (16) oraz całkowite początkowe nieoznaczoności cykli fazowych w drugich różnicach  $\nabla \Delta N_{1u,b}^{j,r}$  i  $\nabla \Delta N_{2u,b}^{j,r}$ .

Wyznaczenie wartości niewiadomych jest obecnie ułatwione. Spodziewanym efektem opracowania pomiarów fazowych sygnałów GPS poprawionych ze względu na wpływ lokalnej różnicowej refrakcji jonosferycznej i troposferycznej jest zwiększenie dokładności wyznaczenia współrzędnych geodezyjnych punktów znajdujących się na obszarze ograniczonym siecią stacji referencyjnych, przy równoczesnym skróceniu czasu potrzebnego do wykonania niezbędnych pomiarów.

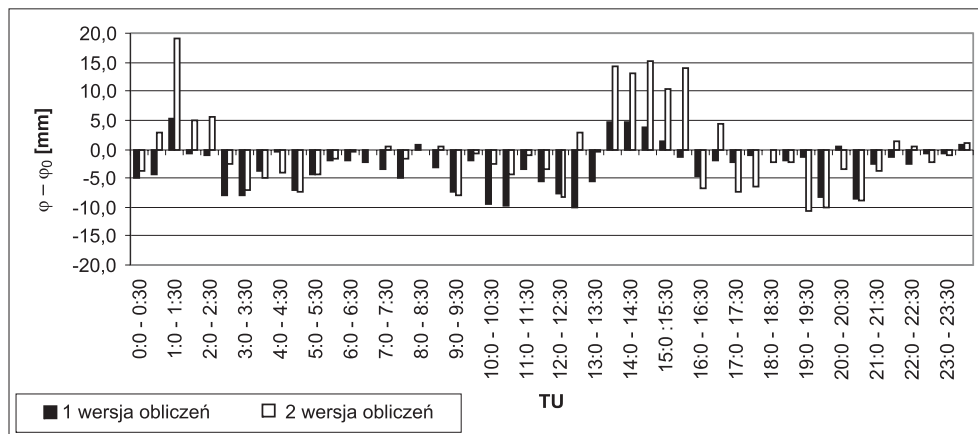
### 3. Opis eksperymentów obliczeniowych

Celem przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych było zbadanie wpływu uwzględnienia w pomiarach fazowych GPS modelu różnicowej refrakcji jonosferycznej i troposferycznej na dokładność oraz niezawodność wyznaczenia współrzędnych punktów. Pierwszy eksperyment przeprowadzono przy użyciu pomiarów GPS zarejestrowanych na stacjach permanentnych sieci ASG-PL oraz KRAW w dniu 7.11.2005 r. (DOY 311). Jako bazową przyjęto stację KRAW, jako wyznaczaną obrano stację KATO. Na wstępie wyznaczono drugoróżnicowe poprawki refrakcyjne dla wektorów KRAW-ZYWI, KRAW-WODZ, KRAW-KLOB oraz KRAW-LELO, według wzorów (2)–(4), dla ośmiu trzygodzinnych sesji obliczeniowych. Powyższe poprawki wyznaczono na każdą epokę pomiarową, dla każdego satelity, względem satelity referencyjnego wspólnego dla wszystkich wektorów w danej sesji obliczeniowej. Współrzędne satelitów GPS obliczono przy użyciu efemerydy pokładowej.

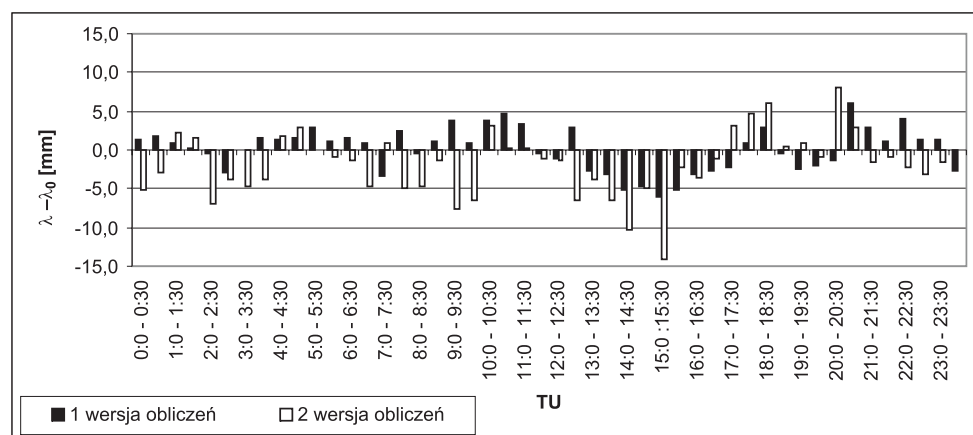
Wartości całkowitych początkowych nieoznaczoności cykli fazowych w drugich różnicach uzyskano za pomocą programu AOS v. 1.6, w oparciu o algorytm wykorzystujący kombinację liniową pomiarów fazowych GPS typu  $L_5$  (ang. *wide lane*) oraz  $L_3$  (ang. *ionosphere free*) [4].

W kolejnym etapie eksperymentu drugoróżnicowe poprawki refrakcyjne obliczone dla wektorów określonych przez stacje referencyjne wyinterpolowano według wzorów (6) i (7) dla wektora testowego KRAW-KATO. Poprawki te wprowadzono do pomiarów fazowych sygnałów GPS na częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ , zarejestrowanych na stacji wyznaczonej KATO. Obliczenie i wprowadzenie poprawek do obserwacji wykonano przy użyciu programu autorskiego DEMER v. 3.2. Następnie wektor testowy KRAW-KATO opracowano w 48 półgodzinnych sesjach przy użyciu obserwacji poprawionych (pierwsza wersja obliczeń) oraz bez wprowadzania poprawek refrakcyjnych (druga wersja obliczeń). W obydwu wersjach zastosowano efemerydę pokładową. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu AOS v. 1.6, przy użyciu pomiarów fazowych sygnałów GPS na dwu częstotliwościach od satelitów znajdujących się powyżej  $15^\circ$  nad horyzontem stanowiska pomiarowego. W pierwszej wersji obliczeń wyłączono opcję modelowania refrakcji troposferycznej, natomiast w drugiej wersji zastosowano model refrakcji troposferycznej Modified Hopfield [4], przy założeniu jednakowych dla obydwu stacji warunków atmosferycznych ( $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $p = 1010\text{ hPa}$ ,  $e = 50\%$ ).

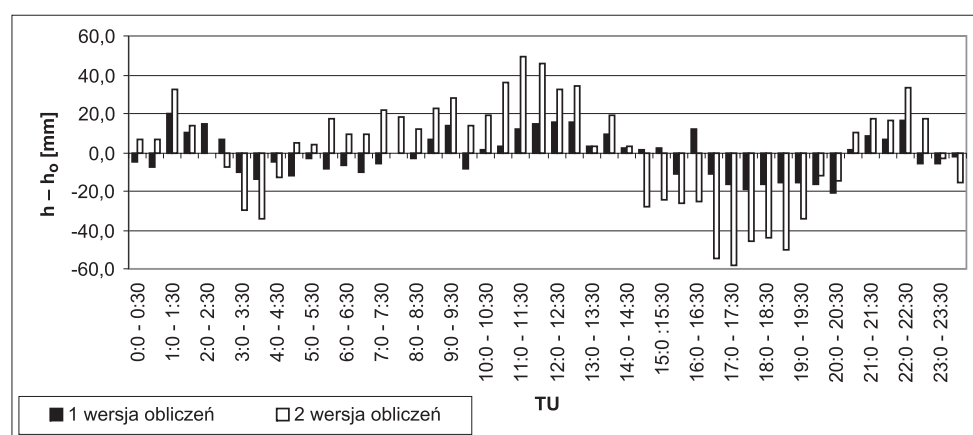
Na rysunkach 2–4 pokazano różnice współrzędnych geodezyjnych katalogowych  $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$  i  $h_0$  stacji wyznaczonej KATO ze współrzędnymi  $\varphi$ ,  $\lambda$  i  $h$  tej stacji, uzyskanymi z opracowania wektora KRAW-KATO w obydwu wersjach obliczeń. Współrzędne katalogowe  $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$  i  $h_0$  przyjęto zgodnie z załącznikiem nr 2 do zarządzenia Głównego Geodety Kraju nr 20 z 18.11.2005 r. dostępnym pod adresem internetowym [http://www.asg-pl/publikacje/Zalacznik\\_2.pdf](http://www.asg-pl/publikacje/Zalacznik_2.pdf). We wszystkich sesjach obliczeniowych uzyskano rozwiązanie początkowych nieoznaczoności cykli fazowych w postaci liczb całkowitych. Dla pierwszej wersji obliczeń wartości bezwzględne różnic szerokości geodezyjnej  $|\varphi - \varphi_0|$  (rys. 2) były mniejsze od 10 mm z wyjątkiem sesji zarejestrowanej w godzinach 12:30–13:00 TU, dla której uzyskano  $\varphi - \varphi_0 = -10,2\text{ mm}$ .



**Rys. 2.** Różnice między katalogową szerokością geodezyjną ( $\varphi_0$ ) stacji wyznaczonej KATO a wartościami szerokości geodezyjnej ( $\varphi$ ) uzyskanymi w wyniku opracowania wektora KRAW-KATO w 48 półgodzinnych sesjach, w dwu wersjach obliczeniowych



**Rys. 3.** Różnice między katalogową długością geodezyjną ( $\lambda_0$ ) stacji wyznaczonej KATO a wartościami długości geodezyjnej ( $\lambda$ ) uzyskanymi w wyniku opracowania wektora KRAW-KATO w 48 półgodzinnych sesjach, w dwu wersjach obliczeniowych



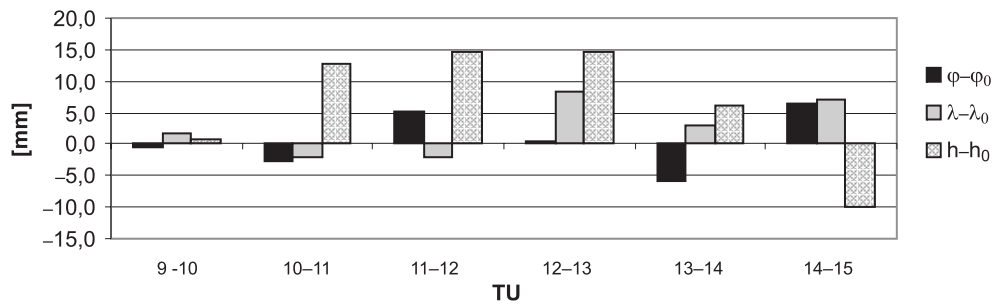
**Rys. 4.** Różnice między katalogową wysokością geodezyjną ( $h_0$ ) stacji wyznaczonej KATO a wartościami wysokości geodezyjnej ( $h$ ) uzyskanymi w wyniku opracowania wektora KRAW-KATO w 48 półgodzinnych sesjach, w dwu wersjach obliczeniowych

Ponadto wartości bezwzględne różnic długości geodezyjnej  $|\lambda - \lambda_0|$  (rys. 3) tylko w trzech sesjach nieznacznie przekroczyły 5 mm. W drugiej wersji obliczeń dla siedmiu sesji uzyskano różnice  $|\varphi - \varphi_0| > 10$  mm oraz dla dziesięciu sesji  $|\lambda - \lambda_0| > 5$  mm.

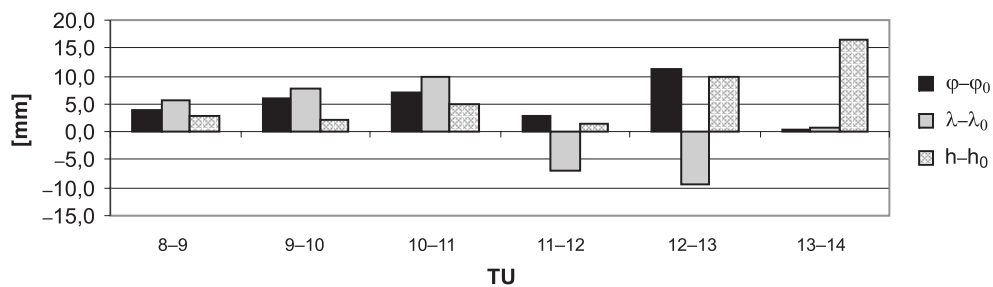
Metoda estymacji lokalnej refrakcji różnicowej dała istotnie lepsze wyniki wyznaczenia wysokości geodezyjnej stacji KATO w porównaniu ze standardowym opracowaniem pomiarów GPS. Różnice wysokości geodezyjnej  $|h - h_0|$  (rys. 4) w pierwszej wersji obliczeń tylko w dwu przypadkach nieznacznie przekroczyły 20 mm, podczas gdy dla drugiej wersji obliczeń w 22 sesjach uzyskano wartość  $|h - h_0| > 20$  mm, z czego w siedmiu przypadkach odnotowano  $|h - h_0| > 40$  mm.

W kolejnym eksperymencie obliczeniowym użyto pomiarów zarejestrowanych w dniach 5.11.2003 r. (DOY 309) i 18.05.2004 r. (DOY 139) na stacjach ASG-PL + KRAW oraz punktach 645G i STAB należących do badawczej sieci geodynamicznej założonej na obszarze wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego [5]. Jako bazową ponownie obrano stację KRAW, natomiast punkty 645G i STAB przyjęto jako wyznaczane. Należy dodać, że w dniu 5.11.2003 r. panowały bardzo korzystne warunki atmosferyczne [1]. Z uwagi na zastosowanie różnych typów anten na stacji bazowej (ASH 701945C-M-SNOW) i punktach wyznaczanych (ASH 701008-01B) konieczne było uwzględnienie charakterystyk anten odbiorników GPS. W procesie uwzględniania charakterystyk anten użyto programu ASHANT opracowanego w Zakładzie Geodezji i Kartografii. Jako współrzędne dokładne  $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$ ,  $h_0$  punktów wyznaczanych 645G i STAB przyjęto wartości pochodzące z wyrównania badawczej sieci geodynamicznej [5].

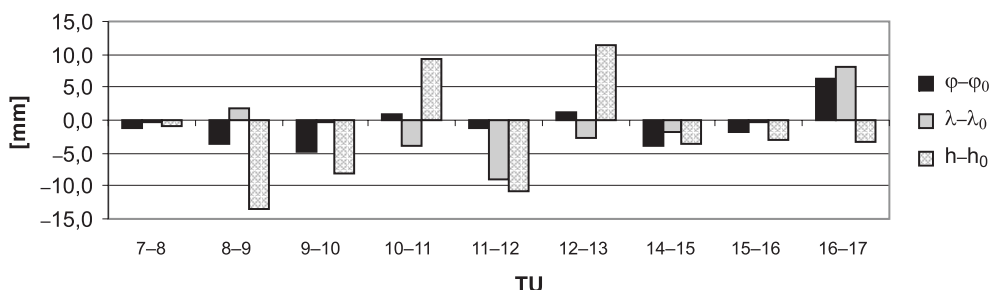
Opracowanie pomiarów fazowych GPS poprawionych z uwagi na wpływ refrakcji jonosferycznej i troposferycznej przeprowadzono w jednogodzinnych sesjach obliczeniowych. We wszystkich sesjach uzyskano rozwiązanie początkowych nieoznaczoności cykli fazowych w postaci liczb całkowitych.



**Rys. 5.** Różnice między katalogowymi wartościami współrzędnych geodezyjnych ( $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$  i  $h_0$ ) stacji wyznaczanej 645G a współrzędnymi ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) uzyskanymi w wyniku opracowania wektora KRAW-645G w sześciu jednogodzinnych sesjach obliczeniowych, z uwzględnieniem różnicowych poprawek refrakcyjnych (użyto danych z obserwacji z dnia 5.11.2003 r.)



**Rys. 6.** Różnice między katalogowymi wartościami współrzędnych geodezyjnych ( $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$  i  $h_0$ ) stacji wyznaczanej 645G a współrzędnymi ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) uzyskanymi w wyniku opracowania wektora KRAW-645G w sześciu jednogodzinnych sesjach obliczeniowych, z uwzględnieniem różnicowych poprawek refrakcyjnych (użyto obserwacji z dnia 18.05.2004 r.)



**Rys. 7.** Różnice między katalogowymi wartościami współrzędnych geodezyjnych ( $\varphi_0$ ,  $\lambda_0$  i  $h_0$ ) stacji wyznaczanej STAB a współrzędnymi ( $\varphi$ ,  $\lambda$ ,  $h$ ) uzyskanymi w wyniku opracowania wektora KRAW-STAB w dziewięciu jednogodzinnych sesjach obliczeniowych, z uwzględnieniem różnicowych poprawek refrakcyjnych (użyto danych z obserwacji z dnia 18.05.2004 r.)

Wartość bezwzględna różnicy szerokości geodezyjnej kształtowała się poniżej 10 mm (rys. 5–7) z wyjątkiem sesji zarejestrowanej w godz. 12.00–13.00 TU w dniu 18.05.2004 r., gdzie dla punktu 645G różnica szerokości geodezyjnej  $\varphi - \varphi_0$  wyniosła 11,4 mm (rys. 6).

#### 4. Wnioski

Wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych wykazały, że zastosowanie algorytmu estymacji lokalnej różnicowej refrakcji umożliwia uzyskiwanie wysokiej dokładności i powtarzalności wyznaczenia współrzędnych wektorów GPS o długości kilkadziesiąt kilometrów, na podstawie opracowania jednogodzinnych a także 30-minutowych sesji pomiarowych. Koncepcja przedstawiona w niniejszym artykule stanowi punkt wyjścia do dalszych prac, związanych z uwzględnieniem łącznego wpływu refrakcji jonosferycznej i troposferycznej w pomiarach fazowych na częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$ , zarejestrowanych na obszarze ograniczonym siecią stacji permanentnych GPS. Przedmiotem dalszych badań będzie również porównanie opisanego algorytmu z metodą VRS (*Virtual Reference Station*) zastosowaną w serwisie obliczeniowym sieci ASG-PL.

#### Literatura

- [1] Banasik P., Góral W.: *Eastern Silesian Geodynamic GPS Network – Preliminary Results of the Campaign 2003–2004*. Acta Geodynamica et Geomaterialia, vol. 2, No. 3, 2005, 27–32
- [2] Chen H.Y.: *An Instantaneous Ambiguity Resolution Procedure Suitable for Medium-Scale GPS Reference Station Networks*. 13th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Salt Lake City, Utah 19–22.09.2000, 1061–1070
- [3] Fotopoulos G.: *Parametrization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations*. Report No. 20142, Calgary, Alberta, Univ. of Calgary, Dept. of Geomatics Engineering 2000

- 
- [4] *GeoGenius User's Manual*. Höhenkirchen – Siegertsbrun, Spectra Precision GMBH 1999
  - [5] Góral W. (red.): *Badawcza sieć geodynamiczna na obszarze wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Kraków, UWND AGH 2005
  - [6] Han S., Rizos C.: *GPS Network Design and Error Mitigation for Real-Time Continuous Array Monitoring Systems*. 9th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Kansas City, Missouri 17–20.09.1996, 1827–1836
  - [7] Liao X.: *Carrier Phase Based Ionosphere Recovery over a Regional Area GPS Network*. Report No. 20143, Calgary, Alberta, Univ. of Calgary, Dept. of Geomatics Engineering 2000
  - [8] Raquet J.F.: *Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers*. Report No. 20116, Calgary, Alberta, Univ. of Calgary, Dept. of Geomatics Engineering 1998
  - [9] Skorupa B.: *Zwiększenie efektywności technologii GPS poprzez estymację lokalnej refrakcji różnicowej*. Kraków, AGH 2003 (rozprawa doktorska, niepublikowana)
  - [10] Śledziński J.: *The Satellite Reference Network EUPOS*. Materiały seminarium nt. „Integracja krajowych geodezyjnych osnów podstawowych z osnowami europejskimi”, Warszawa 15.12.2004
  - [11] Wanninger L.: *The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS networks under Solar Maximum Conditions*. 12th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, Nashville 14–17.09.1999, 1419–1427