

Władysław Góral\*, Jacek Kudrys\*

## Obliczanie poprawek uwzględniających wpływ charakterystyk anten w pomiarach fazowych GPS\*\*

### 1. Wprowadzenie

Problem uwzględniania charakterystyk anten odbiorczych sygnałów GPS zaczął pojawiać się w literaturze naukowej w połowie lat 90. XX w. Środek fazowy anteny jest to punkt, do którego jest odniesiony pomiar sygnału GPS. Dla anten dwuczęstotliwościowych, odbierających sygnały L1 i L2, środki te na ogół nie pokrywają się. Ponadto położenie środków fazowych anteny zależy od kierunku nadchodzącego sygnału GPS. Położenie to, w danym punkcie pomiarowym, jest funkcją współrzędnych horyzontalnych danego satelity GPS w momencie pomiaru i w ogólności zależy od jego odległości zenitalnej oraz azymutu. Charakterystykę danej anteny określają tzw. offsety dla L1 i L2, tj. odstępów liczone od punktu odniesienia danej anteny oznaczanej w literaturze przez ARP (*antenna reference point*). Zmiany środka fazowego anteny w funkcji współrzędnych horyzontalnych określają parametry PCVs (*phase center variations*), które dla większości anten podawane są w postaci tabeli w interwałach pięciostopniowych w zakresie 0° do 80° (90°) odległości zenitalnej. Ponadto dla wybranych precyzyjnych anten odbiorników geodezyjnych podaje się wartości PCVs również w funkcji azymutu. Wartości charakterystyk większości anten odbiorników geodezyjnych można znaleźć na stronach internetowych NGS i IGS. Początkowo środki fazowe anten były odniesione do anteny AOAD/M-T (*The Allen Osborne Associates Dorne Margolin Model T*) i dlatego noszą one nazwę charakterystyk względnych. Aktualnie wprowadza się w precyzyjnych pomiarach geodynamicznych charakterystyki absolutne, które są odniesione do ARP. Przy rozwiązywaniu precyzyjnych zadań geodezyjnych na poziomie subcentymetrowym za pomocą GPS, istotnym źródłem błędów okazuje się charakterystyka środka fazowego anteny odbiornika sygnałów GPS. Problem ten pojawia się w wyraźnej postaci, gdy w trakcie jednej sesji pomiarowej korzystamy z różnych zestawów odbiornik – antena.

---

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

\*\* Praca wykonana w ramach badań statutowych 11.11.150.478

## 2. Podprogram Ashant

W Zakładzie Geodezji i Kartografii opracowano podprogram Ashant, który umożliwia uwzględnienie położenia środka fazowego anteny odbiornika sygnałów GPS oraz jego zmian w zależności od wysokości horyzontalnej obserwowanego satelity. Odpowiednie poprawki wprowadzane są do obserwacji zapisanych w plikach binarnych w formacie Ashtech (tzw. *b-file*). Wartości poprawek ze względu na położenie środka fazowego anteny obliczane są na każdy moment obserwacji na podstawie danych kalibracyjnych konkretnego typu anteny odbiornika sygnałów GPS. Dane dla poszczególnych typów anten są zapisane w pliku tekstowym w formacie zbliżonym do formatu wykorzystywanego przez NGS do opisu parametrów anten [1]. Aplikacja pracuje w środowisku MS Windows. Obsługa programu sprowadza się do wybrania typu anteny wykorzystywanej do pomiaru oraz wskazania pliku z obserwacjami (rys. 1). Na podstawie wartości wysokości horyzontalnej satelity GPS zawartej w pliku obserwacyjnym *b-file* odbiornika (zapisanej z rozdzielczością 1°) obliczane są poprawki zgodnie z ogólną zależnością

$$d = s \cdot \cos z \quad (1)$$

gdzie:

- $d$  – poprawka do obserwacji,
- $s$  – położenie środka fazowego względem punktu odniesienia,
- $z$  – odległość zenitalna satelity (rys. 2).

W obecnej wersji podprogram umożliwia zredukowanie obserwacji wykonanych na częstotliwości L2 do nominalnego środka fazowego L1 oraz uwzględnia zmiany położenia środka fazowego w funkcji odległości zenitalnej dla obu częstotliwości L1 i L2 zgodnie ze wzorami:

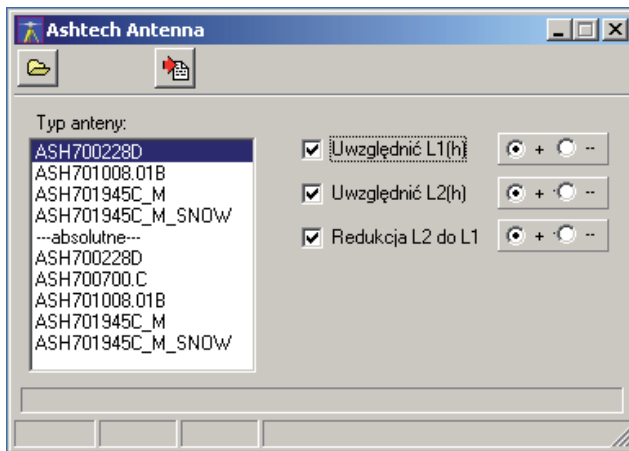
$$d_1(z) = s_1(z) \cdot \cos z \quad (2)$$

$$d_2(z) = [s_{12} + s_2(z)] \cdot \cos z \quad (3)$$

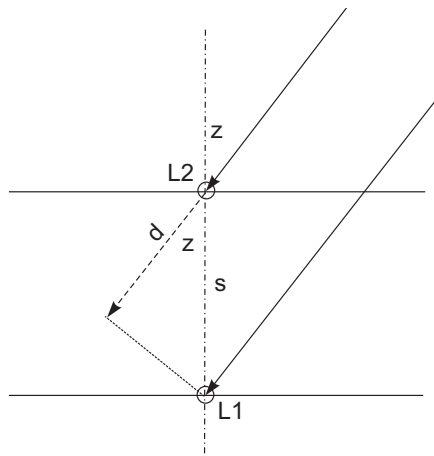
gdzie:

- $d_1(z), d_2(z)$  – poprawka do obserwacji na częstotliwości odpowiednio L1 i L2,
- $s_1(z), s_2(z)$  – położenie środka fazowego L1 i L2 w zależności od odległości zenitalnej z napływającego sygnału,
- $s_{12}$  – stały offset środka fazowego L2 względem L1. P

Program umożliwia wykorzystanie względnych oraz bezwzględnych danych kalibracyjnych anten dostarczanych przez różne ośrodki zajmujące się badaniem parametrów anten do odbioru sygnałów GPS. Poprawione w ten sposób dane obserwacyjne mogą być następnie opracowane za pomocą dowolnego standardowego (firmowego) oprogramowania.



Rys. 1. Okno podprogramu Ashant



Rys. 2. Szkic schematyczny redukcji obserwacji L2 do środka fazowego L1

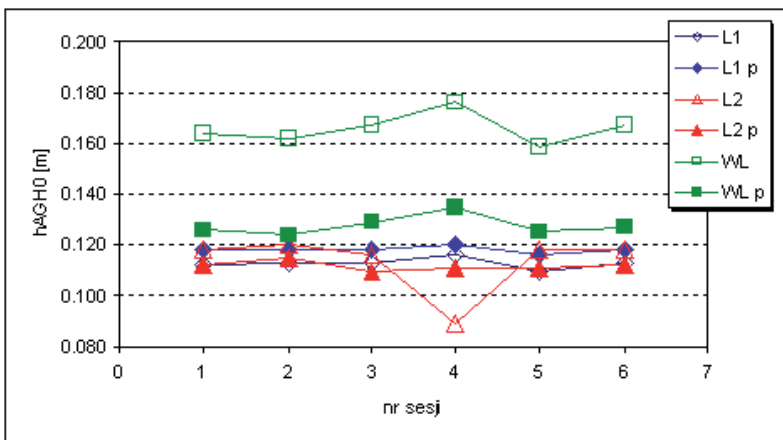
### 3. Wpływ charakterystyk anten na wyznaczenie wysokości elipsoidalnej na przykładzie nawiązania punktu AGH0 do punktu KRAW

Punkt AGH0 znajduje się na jednym ze słupów bazy geodezyjnej umieszczonej na dachu budynku Wydziału GGiŚ AGH w odległości 17,53 m na południe od punktu KRAW. Jest on jednym z punktów odniesienia dla pomiarów sygnałów GPS na terenie Krakowa. Pierwsze pomiary GPS na tym punkcie zostały wykona-

ne w dniach 18–20 czerwca 1991 roku przez zespół ART Olsztyn przy współpracy i nadzorze pracowników ówczesnego Instytutu Geodezji Górniczej i Przemysłowej AGH. Na przykładzie wyznaczenia współrzędnych punktu AGH0 zilustrujemy wpływ charakterystyk anten na dokładność określenia wysokości elipsoidalnej. Do obliczeń wykorzystano całodobowe pomiary przeprowadzone w dniu 5 lutego 2004 r. (036 DOY). Pomiary na punkcie AGH0 wykonano za pomocą odbiornika Z-Surveyor z anteną nr 701008.01B firmy Ashtech. Pomiary na punkcie KRAW wykonywano za pomocą odbiornika UZ-12 oraz anteny nr 701945C-M-SNOW również firmy ASHTECH.

W takie same zestawy pomiarowe jest zaopatrzona śląska ASG. Należy podkreślić, że zgodnie z danymi kalibracyjnymi NGS (*National Geodetic Survey*), różnica położenia środków fazowych L1 i L2 dla anteny zainstalowanej na punkcie AGH0 wynosi  $-10,6$  mm, zaś różnica offsetów w funkcji odległości zenitalnej zmienia się w zakresie od  $-14,3$  mm do  $-2,6$  mm [3, s. 68]. Antena zainstalowana na punkcie KRAW charakteryzuje się różnicą offsetu o wartości  $d = 27,8$  mm, zaś jej funkcja  $d(z)$  zmienia się w zakresie  $-2,3$  mm do  $3,2$  mm. Tak więc charakterystyki obu wykorzystanych anten znacznie się różnią. Właściwe uwzględnienie tych charakterystyk w pomiarach GPS jest szczególnie ważne, gdy przy opracowaniu korzysta się z pomiarów będących kombinacją liniową pomiarów L1 i L2.

Z doświadczeń rachunkowych wiadomo, że nieuwzględnienie tych charakterystyk w trybie szerokiej ścieżki (WL) obarcza wyznaczaną wysokość elipsoidalną błędem wynoszącym około 5 cm. Na rysunku 3 podano wyniki wyznaczenia wysokości punktu AGH0 – ostatnie trzy cyfry – względem punktu KRAW na przykładzie opracowania 6 czterogodzinnych sesji pomiarowych (sesje 1–6) z dnia 5 lutego 2004 r.

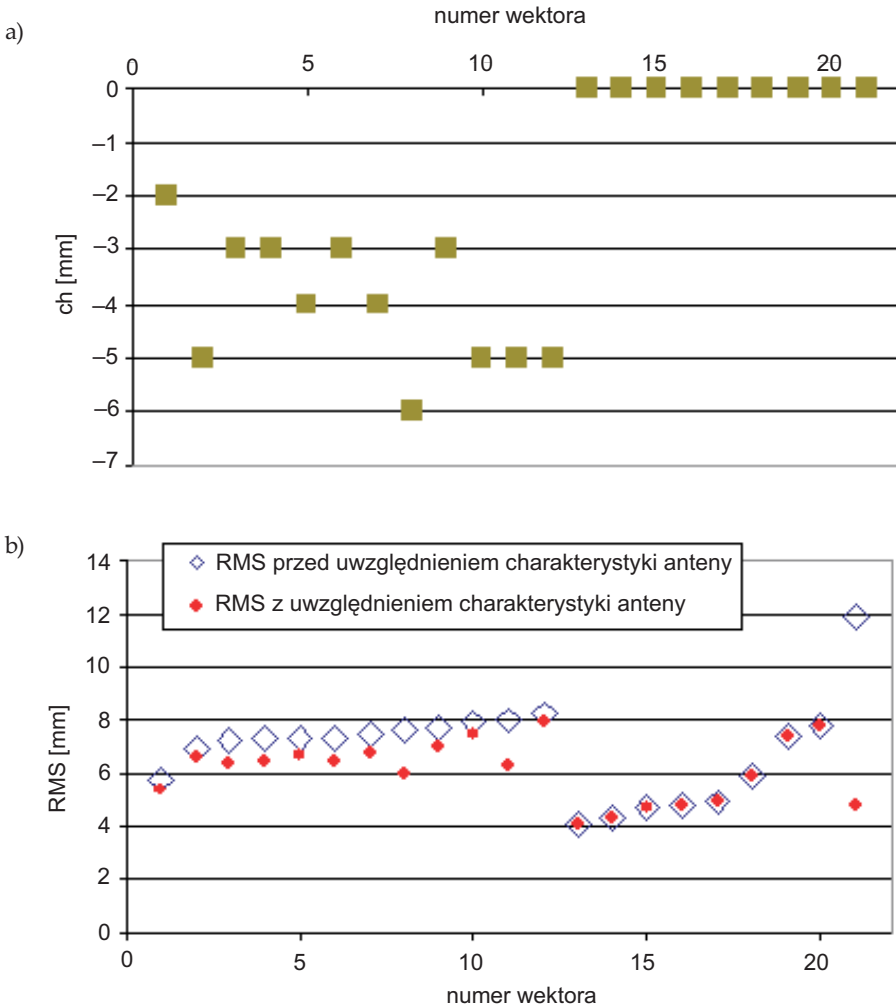


Rys. 3. Wykres rozwiązań składowej wysokościowej wektora KRAW-AGH0 na podstawie sesji czterogodzinnych

W obliczeniach przyjęto – zgodnie z katalogiem współrzędnych stacji sieci ASG-PL – dla wysokości elipsoidalnej punktu ARP anteny stacji KRAW wartość 267,165 m. Obecnie zgodnie z załącznikiem nr 2 do Zarządzenia Głównego Geodety Kraju nr 20 z dnia 18. 11. 2005 r. obowiązuje nowy wykaz współrzędnych stacji referencyjnych ASG-PL, w którym wartości wysokości elipsoidalnych uległy zmniejszeniu o ok. 3 cm w stosunku do wykazu wcześniejszego. Zgodnie z aktualnym wykazem wysokość elipsoidalna w układzie EUREF89 punktu ARP anteny stacji KRAW wynosi 267,138 m. Opracowanie wykonano za pomocą programu GPPS 5.2 firmy Ashtech, przyjmując standardowe warunki meteorologiczne przy  $h_c = 15^\circ$ . Ponieważ czas zliczeń sygnału GPS wynosił 10 s, dlatego każda sesja pomiarowa składała się z 1440 rekordów pomiarowych ( $4 \times 60 \times 6$ ). Wykres na rysunku 3 przedstawia końcówki wysokości punktu AGH0. Na wykresie, dla sesji 1–6 podano wyniki obliczeń z uwzględnieniem offsetu L1 dla trybu L1 i offsetu dla trybu L2 oraz wyniki w trybie WL. Porównując wyznaczone wartości wysokości, widać, że różnice między rozwiązaniami L1 i L2 wynoszą od 3 mm do 8 mm, zaś między rozwiązaniami w trybie L1 i WL wynoszą około 5 cm. Jest również widoczne, że rozwiązanie dla sesji nr 4 (D) odbiega wyraźnie od rozwiązań w pozostałych sesjach. Przyczyna pogorszenia wyników tego rozwiązania jest związana z dodatkowym zaburzeniem pomiarów L2 wynikającym na przykład z efektu wielotorowości, zaburzenia jonosferycznego lub zakłóceń pochodzenia technicznego. Po wprowadzeniu poprawek uwzględniających charakterystyki anten (dla poszczególnych trybów rozwiązań dodano wskaźnik p) rozwiązanie L1p ustabilizowało się na wartości 118 mm, zaś dla L2p zmieniało się w zakresie od 111 mm do 118 mm. Również rozwiązanie w trybie WL – WLp zbliżyło się do rozwiązania L1p. Z analizy błędów średnich dla poszczególnych sesji i trybów rozwiązań wynika, że wprowadzenie charakterystyk anten zmniejsza wartości błędów średnich wyznaczanych wysokości.

#### **4. Przykład uwzględnienia charakterystyk anten w opracowaniu sieciowym**

Jak wynika z danych kalibracyjnych, antena 701008-01 wykazuje szczególnie dużą zmienność położenia środka fazowego w funkcji odległości zenitalnej satelity. W opisywanym eksperymencie położono nacisk na określenie wysokości punktów, dla których wyznaczono uśrednioną różnicę środków fazowych obu zestawów. Dla satelitów znajdujących się ok.  $45^\circ$  nad horyzontem różnica środków fazowych (ASH701008-01 – ASH700228D) w paśmie L1 osiąga wartość maksymalną, wynoszącą ok. 8 mm. Średnią wartość różnicy środków fazowych obu anten dla wszystkich obserwowanych satelitów w danej sesji pomiarowej szacuje się na 5–7 mm.



**Rys. 4.** Zmiana różnic wysokości (a) i błędów RMS (b) rozwiązania wektorów przed uwzględnieniem i po uwzględnieniu charakterystyk środków fazowych anten

Jeżeli na jednym końcu wektora będzie znajdował się zestaw Ashtech MD-XII + antena 700228D, a na drugim jego końcu zestaw Z-Surveyor + antena 701008-01, to różnica wysokości obu punktów wyznaczona na podstawie wyżej podanych zestawów będzie obciążona błędem systematycznym 5–6 mm.

Pomiary wykonywano równocześnie za pomocą sześciu odbiorników GPS, w tym trzy typu Z-SURVEYOR z anteną 701008-01 i trzy typu ASHTECH MD-XII z anteną 700228D. Na rysunku 4 przedstawiono wyniki rozwiązania sieci GPS

z dnia 2 kwietnia 2005 r wykonanych na obszarze ZG „Trzebionka” [3]. Spośród 21 opracowanych wektorów, pierwszych 12 przedstawionych na rysunku 4 to wektory, na końcach których stały odbiorniki i anteny różnych typów. Pozostałe wektory (13–21) pomierzono, wykorzystując odbiorniki tego samego typu. Na wykresie (rys. 4a) pokazano wpływ uwzględnienia charakterystyk anten na zmianę wartości wysokości elipsoidalnej  $dh$  wyznaczanych punktów, które w zależności od wektora wyniosły od 2 do 6 mm. Uwzględnienie w opracowaniu wektorów GPS właściwych charakterystyk anten powoduje także zmniejszenie błędu średniego (RMS), co pokazano na rysunku 4b. Podobny efekt zaobserwowano przy opracowaniu pomiarów GPS wykonanych na obszarze Wieliczki w 1999 r. [2]. Należy podkreślić, że uwzględnienie charakterystyk omawianych anten daje się wyraźnie zauważyć dopiero przy opracowaniu ponad dwugodzinnych sesji pomiarowych zrealizowanych w korzystnych warunkach meteorologicznych. Przy krótszych sesjach pomiarowych, gdy błędy wyznaczanych wysokości elipsoidalnych są większe, efekt ten nie jest zauważalny.

## 5. Wnioski końcowe

Przy realizacji precyzyjnych zadań geodezyjnych i geodynamicznych za pomocą pomiarów sygnałów GPS należy w opracowaniu szczególną uwagę zwracać na uwzględnienie właściwych charakterystyk zastosowanych anten. Ma to ważne znaczenie przy nawiązywaniu pomiarów GPS do lokalnych stacji permanentnych i jest szczególnie istotne przy wykorzystaniu pomiarów sygnałów GPS w precyzyjnym, subcentymetrowym wyznaczaniu wysokości elipsoidalnej.

## Literatura

- [1] <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/index.shtml>.
- [2] Góral W., Maciaszek J., Kudrys J.: *Precyzyjne pomiary różnic wysokości za pomocą GPS w otoczeniu przeszkód terenowych*, Geodezja t. 1, z. 2, 1999.
- [3] Góral W.: *Badawcza sieć geodynamiczna na obszarze wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*, Kraków, AGH UWN-D 2005.