

**Roman KADAJ**  
**Politechnika Rzeszowska**  
**Katedra Geodezji**

**Tomasz ŚWIĘTOŃ**  
**Wyższa Szkoła Inżynieryjno-Ekonomiczna w Ropczycach**  
**Katedra Geodezji**

## **ALGORYTM I OPROGRAMOWANIE MODUŁU AUTOMATYCZNEGO POSTPROCESSINGU (APPS) W POLSKIM SYSTEMIE SATELITARNYCH STACJI REFERENCYJNYCH (ASG-EUPOS)**

System precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego ASG-EUPOS zbudowano w Polsce w latach 2006-2008, z inicjatywy Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii. Pełne uruchomienie i udostępnienie systemu dla zastosowań geodezyjnych i nawigacyjnych nastąpiło w czerwcu 2008 r. System składa się z 98 stacji referencyjnych rozmieszczonych równomiernie w całym obszarze Polski, z których dwie stanowią centra kontrolno-obliczeniowe (główne w Warszawie i zapasowe w Katowicach). Cechą jakościową systemu jest wysoka subcentymetrowa precyzja pozycjonowania, zarówno w czasie rzeczywistym (RTK), jak też w trybie sieciowej, manualnej komunikacji z centralnym serwerem (serwis automatycznego postprocessingu). Jakkolwiek większość oprogramowania i sprzętu systemu pochodzi z firmy TRIMBLE, moduł automatycznego postprocessingu (APPS) jest całkowicie rozwiązaniem krajowym, opracowanym teoretycznie i zaimplementowanym przez autorów niniejszej publikacji. W pracy przedstawiono podstawowe metody i rozwiązania algorytmiczne przyjęte w module APPS. Istotnym elementem oryginalnym jest opracowany nowy algorytm (BETA) dla zadania pojedynczego postprocessingu, wykorzystujący tzw. schemat Schreibera dla układu potrójnych różnic fazowych. Moduł przeszedł pomyślnie testy praktyczne w roku 2008.

### **1. Wstęp**

Autorzy prezentują rozwiązania algorytmiczne i aplikacyjne modułu automatycznego postprocessingu (APPS) (Kadaj i Świętoń 2007), które zrealizowali w ramach generalnego projektu polskiego systemu stacji referencyjnych GPS (ASG-EUPOS). Wykonawcą całości projektu było konsorcjum: GEOTRONICS Sp. z o.o., WASCO Sp. z o.o., TRIMBLE – POLSKA Sp. z o.o., generalnym koordynatorem zaś GUGiK w Warszawie (Bosy 2008, Automatic... 2007, 2008). Całość projektu pt. „Wielofunkcyjny System Precyzyjnego Pozycjonowania Satelitarnego ASG-EUPOS”, obejmująca kilka serwisów użytkowych (NAWGIS,

KODGIS, NAWGEO-RTK, POZGEO z modułem APPS, POZGEO-D), bardzo kosztowne wyposażenie sprzętowe stacji i centrum zarządzania, była finansowana ze środków UE.

Należy zaznaczyć, że o ile oprogramowanie większości serwisów ASG-EUPOS jest autoryzowane przez firmę TRIMBLE, oprogramowanie modułu APPS w serwisie automatycznego postprocessingu (POZGEO) jest w całości oryginalnym rozwiązaniem krajowym.

Istotnym elementem całości oprogramowania APPS były algorytmy i procedury pojedynczego postprocessingu, czyli wyznaczenia pojedynczego wektora GPS w oparciu o sygnały emitowane przez satelity systemu i rejestrowane przez anteny odbiorników naziemnych. Finalnym produktem postprocessingu jest wektor łączący stacje naziemne w trójwymiarowym, kartezjańskim układzie geocentrycznym XYZ. Do rozwiązania tego zadania opracowano i zaimplementowano nowy algorytm o nazwie BETA (Kadaj 2007b), który wykorzystuje specjalny układ typu *Schreibera* potrójnych różnic obserwacji fazowych GPS. Cechą algorytmu BETA, w porównaniu z innymi rozwiązaniami w tym zakresie, jest sprowadzenie problemu do rozwiązania (metodą najmniejszych kwadratów) ekwiwalentnego układu pseudoobserwacji o diagonalnej macierzy wagowej. Cecha ta ma wymierne znaczenie praktyczne, gdyż wobec znacznej liczby pierwotnych obserwacji zależnych, eliminuje kosztowny problem ich skorelowania. Tradycyjne metody rozwiązań, oparte na potrójnych różnicach faz, uciekają się w tym sensie do rozwiązań przybliżonych. W różnych oprogramowaniach komercyjnych, jako zasadnicze (finalne) przyjmuje się wobec tego rozwiązanie oparte na podwójnych różnicach faz, ale to z kolei wiąże się z problemem poprawnej identyfikacji dodatkowych niewiadomych stanowiących pewne całkowite wielokrotności długości fali sygnału (*ambiguity*). W oprogramowaniu APPS zastosowano kontrolnie (alternatywnie), obok metody BETA, również algorytm podwójnych różnic faz. W obu przypadkach cechą specjalną algorytmów jest użycie modelu funkcjonalnego z wymiennym satelitą referencyjnym (koncepcja tzw. dynamicznego satelity referencyjnego). Umożliwia to opracowanie ciągu obserwacji dłuższego niż efektywny czas ciągłych obserwacji „widocznych” satelitów (zakłada się maksymalny czas sesji obserwacyjnej do 24<sup>h</sup>) lub (opcjonalnie) całkowitą rezygnację z definicji satelity referencyjnego (każdy z dostępnych satelitów w określonym przedziale czasu odbioru sygnałów pełni funkcję satelity referencyjnego).

W każdym przypadku zastosowano kombinację dwóch dostępnych fazowych częstotliwości L1, L2, tzw. *ionofree*, których kombinacja umożliwia eliminację wpływu refrakcji jonosferycznej.

W całości oprogramowania APPS zawiera się oprogramowanie (*interface*) modułu użytkownika (strona WWW), modułu administratora serwisu, podprogramy przetwarzania źródłowych zapisów obserwacyjnych w formacie RINEX, obliczania orbit satelitów, interpolacji dyskretnych pozycji satelitów, redukcji obserwacji ze względu na przesunięcie (*offset*) centrum fazowego anteny, wy-

znaczenie przybliżonej pozycji anteny i punktu wyznaczanego w oparciu o tzw. pseudoodległości (rozwiązanie SPP – *single point position*), graficzne interpretacje wyników (Świętoń 2007). Finalne opracowanie pozycji obejmuje ponadto wyrównanie sieci wektorów GPS, analizy dokładności z wyborem rozwiązań alternatywnych, transformacje współrzędnych geocentrycznych do państwowych układów odwzorowawczych. W tym względzie zastosowano procedury systemu GEONET ([www.geonet.net.pl](http://www.geonet.net.pl)) (Kadaj 1997, 2006).

## 2. Syntetyczna informacja o strukturze i serwisach ASG-EUPOS

W dniu 2 czerwca 2008 roku został udostępniony dla użytkowników Wielofunkcyjny System Precyzyjnego Pozycjonowania Satelitarnego ASG-EUPOS. Zadaniem systemu jest wspomaganie dokładnego wyznaczenia pozycji za pomocą odbiornika GPS poprzez udostępnianie stosownych poprawek w czasie rzeczywistym, obserwacji ze stacji referencyjnych i serwisu automatycznego postprocessingu.

W skład systemu wchodzi 98 permanentnych stacji referencyjnych prowadzących ciągłe obserwacje GPS i GLONASS (tylko 14 wybranych stacji) oraz dwa centra zarządzające: główne w Warszawie i zapasowe w Katowicach. Użytkownik ma dostęp do trzech serwisów czasu rzeczywistego, zapewniających maksymalną dokładność wyznaczenia pozycji do 0.03 m, i dwóch serwisów postprocessingu, umożliwiających wyznaczenie pozycji z dokładnością do 0.01-0.02 m (dokładność jest mierzona odchyleniem standardowym współrzędnej punktu wyznaczanego w kartezjańskim układzie geocentrycznym XYZ) – tab. 1.

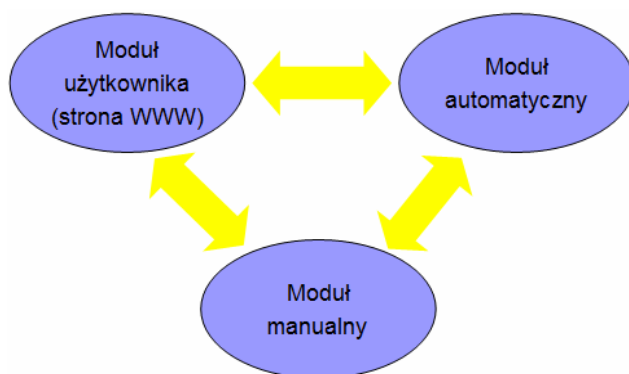
Tabela 1. Serwisy systemu ASG-EUPOS

Nazwa	Dokładność [m]
Serwisy czasu rzeczywistego	
NAWGIS	1.0
KODGIS	0.25
NAWGEO	0.03 [w poziomie] 0.06 [w wysokości]
Serwisy postprocessingu	
POZGEO	0.01-0.02 dla odbiorników dwuczęstotliwościowych lub 0.10 dla odbiorników jednoczęstotliwościowych
POZGEO-D	-

## 2.1. Serwis POZGEO

Głównym zadaniem serwisu POZGEO jest przetwarzanie statycznych pomiarów użytkownika (obserwatora, klienta systemu) poprzez wyznaczenie na drodze postprocessingu wektorów GPS łączących pozycję użytkownika z kilkoma najbliższymi stacjami referencyjnymi, wyrównania utworzonej siatki wektorów i wyznaczenia finalnych współrzędnych pozycji użytkownika w geocentrycznym układzie globalnym XYZ. Serwis wykonuje dodatkowo automatyczną transformację wynikowych współrzędnych do układów państwowych (kartograficznych) oraz przelicza wysokość elipsoidalną na normalną przy wykorzystaniu numerycznego modelu geoidy niwelacyjnej. W przypadku niepowodzenia obliczeń w trybie automatycznym operator ma możliwość ingerencji i niezależnego, „ręcznego” wykonania obliczeń, dostosowując przy tym strategię obliczeniową do konkretnych danych pomiarowych – na rys. 1., moduł manualny.

Serwis jest dostępny dla użytkownika z poziomu strony WWW po zalogowaniu do systemu ASG-EUPOS. Danymi wejściowymi są pliki obserwacyjne RINEX w formacie 2.x. System ma charakter „czarnej skrzynki”, tzn. użytkownik nie ma możliwości ingerencji w sposób przeprowadzania obliczeń, a jedynie wprowadzenia surowych danych pomiarowych i odebrania wyników. Jednocześnie możliwe jest wykonanie obliczeń tylko z jednej sesji pomiarowej, na pojedynczym punkcie wyznaczanym.



Rys. 1. Podstawowe moduły serwisu POZGEO

### 2.1.1. Moduły funkcjonalne serwisu POZGEO

W skład serwisu wchodzi trzy podstawowe moduły:

- **Moduł automatyczny** – „serce” serwisu POZGEO, którego zadaniem jest wykonywanie automatycznego postprocessingu, wyrównania i transformacji do państwowych układów współrzędnych. W praktyce moduł ten jest realizowany przy wykorzystaniu programu APPS (Kadaj i Świętoń 2007).

- **Moduł użytkownika** – realizowany jako strona WWW, przez którą użytkownik ma bezpośredni dostęp do serwisu. Zapewnia możliwość wprowadzania plików obserwacyjnych i pobierania raportów z obliczeń.
- **Moduł manualny** – pozwalający na bezpośrednią ingerencję administratora i „ręczne” wykonanie postprocessingu. Zrealizowany za pomocą oprogramowania TTC firmy Trimble.

Obsługa samego serwisu z punktu widzenia użytkownika jest bardzo prosta. Korzystając ze strony WWW (rys. 2.), ładuje wyniki swoich pomiarów w postaci plików RINEX. Dodatkowo określa model anteny wykorzystanej do pomiaru i ewentualnie układ lokalny, w jakim chce otrzymać wyniki. Układy lokalne nie są obecnie dostępne na serwerze, jednak oprogramowanie ma taką możliwość i nie wyklucza się wprowadzenia ich w przyszłości. Po kliknięciu przycisku *Wyślij* plik jest przesyłany na serwer, wykonywane są obliczenia i zwracane raporty, które także można pobrać z odpowiedniej strony WWW.

The screenshot shows the POZGEO web application interface. At the top, there is a header with logos for ASG-eupos and the European Union, and a banner for 'AKTYWNA SIĘĆ GEODEZYJNA EUPOS'. Below the header is a navigation bar with links: Informacje, ASG-EUPOS, Usługi, Technologie, Linki, and Kontakt. The main content area is divided into two columns. The left column contains a vertical menu with links: Mapa, Almanach, Jonosfera, Indeks I95, Przewidywany wpływ jonosferyczny, Przewidywany wpływ geometryczny, Stacje referencyjne, Raporty, POZGEO, POZGEO - raporty, POZGEO-D, Narzędzia, and Zakończ. The right column contains a form for uploading RINEX files. It has a 'Plik' field with a 'Przeglądaj...' button, a 'Typ anteny' dropdown menu (currently showing 'NONE'), and a 'Układ lokalny' dropdown menu (currently showing 'Brak'). Below these fields is a text area with instructions: 'RINEX - model anteny zostanie pobrany z nagłówka pliku RINEX. NONE - nie zostanie określony żaden model anteny - wyniki będą miały niższą dokładność. Brak anteny na liście oznacza, że antena nie została skalibrowana w IGS. Jeśli masz problem z określeniem swojego modelu anteny zajrzyj na: [Instrukcja: POZGEO](#)'. At the bottom of the form are 'Wyślij' and 'Skasuj' buttons. The footer of the page reads 'Główny Urząd Geodezji i Kartografii | Copyright © 2008 GUGiK. All Rights Reserved.'

Rys. 2. Strona pobierania danych serwisu POZGEO

Pewien kłopot może sprawić wybór anteny. Na stronie jest dostępna lista modeli anten, których nazwy są zgodne z formatem ANTEX. Zadaniem użytkownika jest określenie, jaki model anteny faktycznie posiada. Zamiast wskazania konkretnego modelu anteny możliwy jest wybór jednej z dwóch dodatkowych opcji:

- **NONE** – do obliczeń nie zostanie przyjęty żaden model anteny. Wskutek tego program „założy”, że centrum fazowe anteny jest tożsame z centrum geometrycznym (offsety centrum fazowego będą wynosiły 0). Skutkiem tego założenia będą jednak wyniki obarczone błędem osiagającym wartości do kilkunastu centymetrów.

- RINEX – model anteny zostanie pobrany z nagłówka pliku RINEX. W przypadku, gdy model w pliku RINEX zostanie wskazany niepoprawnie lub niezgodnie z formatem ANTEX, wówczas automatycznie zostanie przyjęty model NONE

### 2.1.2. Dane obserwacyjne

Dane obserwacyjne muszą zostać przesłane w formie pliku tekstowego RINEX w wersji 2.x. Warunki, jakie musi spełniać plik (oprócz zgodności ze specyfikacją), są następujące.

- **Nagłówek** pliku musi zawierać wszystkie pola określone w specyfikacji jako obowiązkowe. Szczególną uwagę należy zwrócić na:
  - **wysokość anteny** – Standard RINEX wymaga określenia wysokości do spodu anteny (*bottom surface of antenna*). W praktyce najczęściej wysokość anteny mierzy się do zewnętrznej krawędzi – należy zwrócić uwagę, czy wysokość została wprowadzona poprawnie (zgodnie ze standardem),
  - **model anteny** – zgodny z ANTEX (jest to istotne, jeśli przy ładowaniu pliku wybrano model anteny RINEX – w pozostałych przypadkach zawartość pola jest bez znaczenia),
  - **interwał** – nie jest polem obowiązkowym wg specyfikacji, ale zaleca się jego stosowanie. Musi być wielokrotnością interwału rejestrowanego na stacjach referencyjnych (1 sekunda),
    - interwał poprawny: 5 s,
    - interwał niepoprawny: 4.9999 s.
- (W przypadku braku pola *INTERVAL* program próbuje sam określić interwał na podstawie obserwacji, obliczając medianę z odstępów pomiędzy poszczególnymi epokami).
- **Obserwacje:**
  - minimum wymagane do obliczeń to obserwacje: pseudoodległości z kodu C/A i obserwacje fazowe na częstotliwości L1,
  - zalecane: pseudoodległości z kodu P i obserwacje fazowe na częstotliwości L1 i L2.

Dodatkowo sam pomiar musi spełniać pewne kryteria.

- **Czas pomiaru:**
  - minimum: 30 minut,
  - maksimum: 24 godziny,
  - zalecany: minimum 60 minut (czas pomiaru wpływa istotnie na finalną dokładność wyznaczenia pozycji).
- **Ilość epok:**
  - minimum: 720,
  - maksimum zalecane: 3600.

System obliczy plik o większej liczbie epok, ale zostanie automatycznie „rozrzedzony”. W tabeli 2. znajduje się porównanie ilości epok w pliku

RINEX i epok faktycznie wykorzystanych do obliczeń. Przy większej od 3600 liczbie epok faktycznie wykorzystana zostanie tylko co  $k$ -ta epoka ( $k = 2, 3, \dots$ ) wynikająca z przyjętej zasady rozrzedzania (tab. 2.).

- **Maksymalny rozmiar pliku:** 17 Mb.
- **Nazwa pliku** – dowolna:
  - nie musi być zgodna ze specyfikacją RINEX,
  - brak możliwości obliczenia pliku o tej samej nazwie jednego dnia.

Tabela 2. Przykładowe liczebności epok

Liczba epok w pliku RINEX	Liczba epok faktycznie wykorzystanych do obliczeń
300	0 – zbyt mała liczba epok
1200	1200
3599	3599
3602	1801
4000	2000

### 2.1.3. Raport dla użytkownika

Ostateczny raport dla użytkownika zawiera następujące informacje:

- ogólne informacje o obliczonym pliku RINEX (czas pomiaru, wersja pliku, model anteny zapisany w pliku itp.),
- model anteny faktycznie przyjęty do obliczeń,
- informacje o wykorzystanej orbicie (*broadcast, rapid, precise*),
- wyniki ostateczne w postaci współrzędnych kartezjańskich XYZ i współrzędnych płaskich w układach 1965, 2000, UTM, 1992,
- błędy średnie współrzędnych,
- wysokość elipsoidalną, undulację i wysokość normalną.

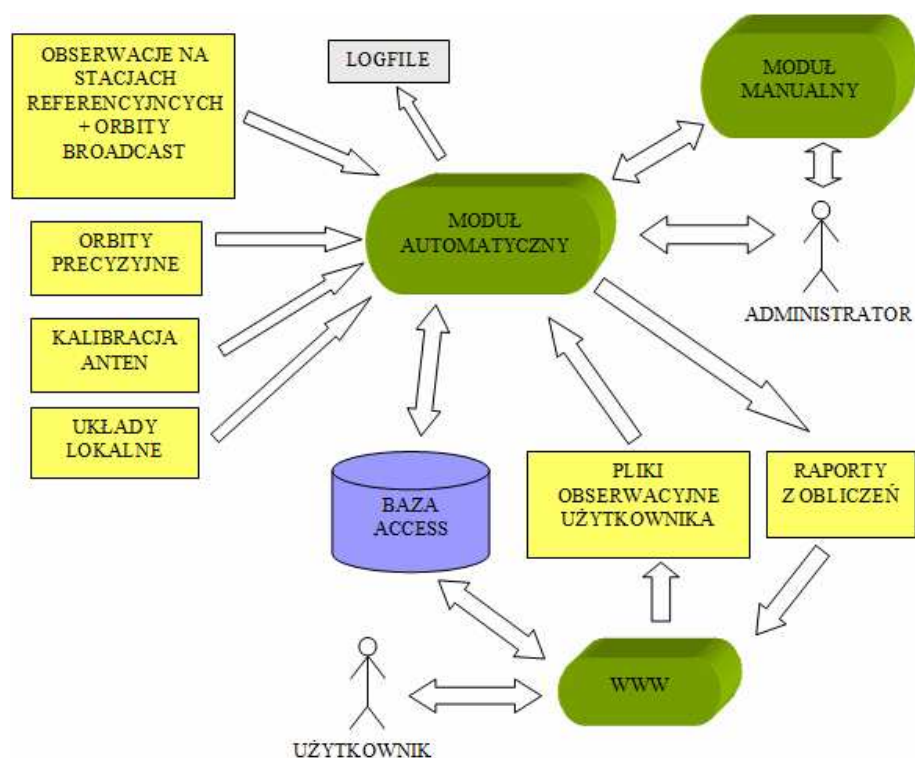
Należy przy tym pamiętać, że wyniki w układzie 1965 są wyliczane na podstawie transformacji „empirycznej”, co sprawia, że błędy średnie współrzędnych zawsze będą większe niż w pozostałych układach. Podobnie jest z wartością błędu średniego wysokości normalnej, który zostaje automatycznie zwiększony o błąd zastosowanego modelu geoidy.

### 2.1.4. Przepływ danych w serwisie POZGEO

Oprócz trzech podstawowych modułów systemu (strony WWW, automatycznego i manualnego) serwis POZGEO wykorzystuje kilka mniejszych podsystemów, zapewniających stały dostęp do danych na stacjach referencyjnych, orbit precyzyjnych (ściąganych automatycznie z odpowiednich serwerów), kalibracji anten itp. Na szczególną uwagę zasługuje baza danych stanowiąca element „spajający” i gromadząca wszystkie informacje dotyczące historii wykonywanych obliczeń, ostatecznych wyników i błędów obliczeń.

Obliczenia w systemie POZGEO są wykonywane w kilku krokach (rys. 3.).

1. Użytkownik, za pomocą strony WWW, wprowadza plik obserwacyjny RINEX do systemu. Określa także model anteny, który ma zostać wykorzystany i ewentualnie definiuje układ lokalny, w którym chce otrzymać wyniki.
2. Plik obserwacyjny jest zapisywany na twardym dysku i równocześnie wprowadzany stosowny zapis w bazie danych.
3. Moduł automatycznego postprocessingu skanuje bazę co pewien określony w konfiguracji czas w poszukiwaniu plików do przeliczenia.
4. Po znalezieniu pliku rozpoczyna się proces obliczeniowy, w trakcie którego program pobiera z serwera niezbędne dane:
  - obserwacje ze stacji referencyjnych wraz z orbitami *Broadcast*,
  - informację o kalibracji anteny,
  - orbity precyzyjne, jeśli są dostępne,
  - definicje układu lokalnego, jeśli został wybrany przez użytkownika.
5. Przez cały czas działania programu informacje o wykonanych obliczeniach, skanowaniu bazy, błędach związanych z połączeniem i komunikacją z pozostałymi modułami programu itp. są zapisywane w plikach LOG.



Rys. 3. Schemat przepływu danych w serwisie POZGEO



6. Po wykonanych obliczeniach raporty są zapisywane na twardym dysku. Równocześnie w bazie jest zapisywana informacja o zakończeniu obliczeń, ścieżki do raportów i informacja o tym, czy obliczenia są poprawne.
7. W przypadku niepowodzenia obliczeń administrator może eksportować dane do modułu manualnego, wykonać obliczenia w module manualnym i wyniki zaimportować do programu APPS.
8. Po imporcie wyników obliczeń z modułu manualnego program tworzy raport dla użytkownika i poprawia stosowne wpisy w bazie.
9. Użytkownik pobiera raporty przy wykorzystaniu strony WWW.

### 2.1.5. Obliczenia automatyczne

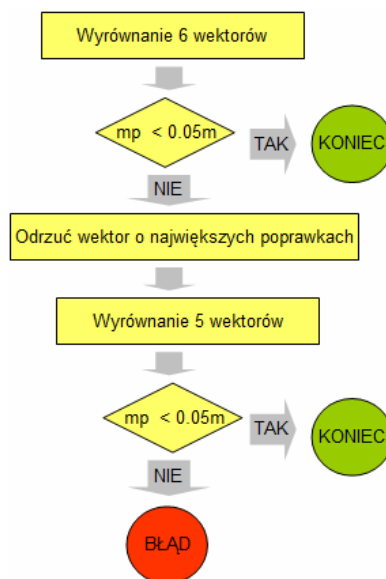
Pierwszym etapem obliczeń automatycznych jest kontrola poprawności pliku RINEX pod względem formalnym. Program sprawdza, czy plik załadowany przez użytkownika jest zgodny ze specyfikacją, czy spełnia wymagania dotyczące czasu pomiaru, ilości epok itp. Następnie znajduje informację o offsetach centrum fazowego modelu anteny i poszukuje najdokładniejszych, dostępnych orbit (*rapid* lub *final*). Na podstawie współrzędnych przybliżonych program identyfikuje 6-10 najbliższych stacji referencyjnych i próbuje obliczyć *Single Point Position* (SPP) dla punktu wyznaczanego. Podczas obliczenia SPP jest weryfikowana poprawność samych danych, są wprowadzane niezbędne poprawki do obserwacji, wstępnie są dobierane satelity nadające się do wykorzystania.

Kolejnym etapem jest wykonanie postprocessingu wektorów pomiędzy stacjami referencyjnymi a punktem wyznaczanym. Dla zapewnienia dodatkowej, wewnętrznej kontroli jest realizowany dwiema metodami – standardową, opisywaną w literaturze metodą podwójnych różnic, i metodą BETA (Kadaj 2007b). Program próbuje obliczać wektory kolejno, poczynając od najbliższej stacji referencyjnej, i liczy tak długo, aż uda mu się poprawnie wyznaczyć 6 wektorów spośród 10 najbliższych stacji (rys. 4.-6.).

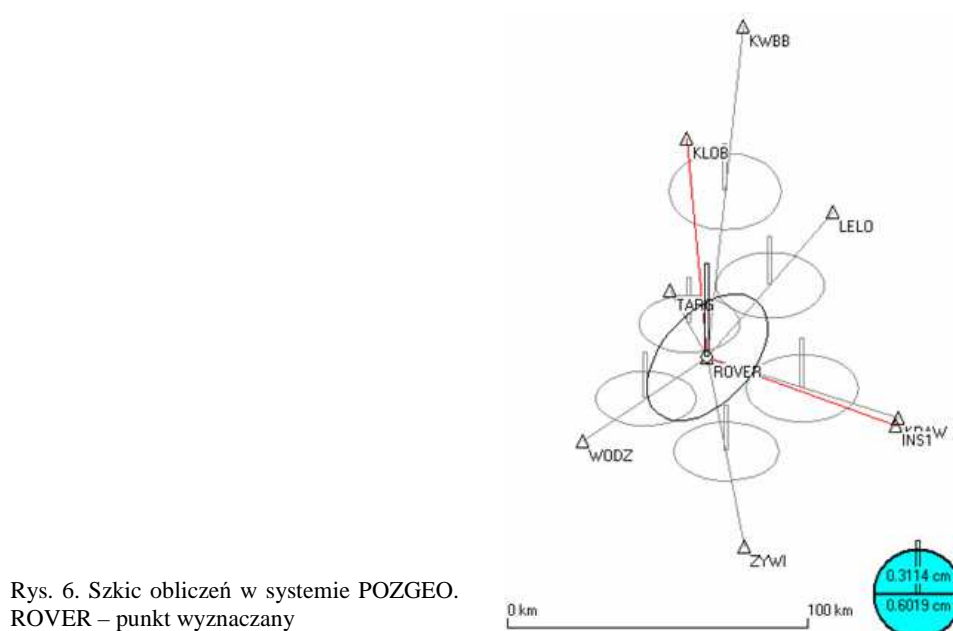
Następnie program realizuje wyrównanie sieci składającej się z obliczonych wektorów, niezależnie dla metody podwójnych różnic i metody BETA. Wyrównanie jest przeprowadzane w pierwszej kolejności dla 6 wektorów, jednak jeśli błąd położenia punktu przekracza zakładaną wartość, wówczas jest odrzucany wektor, który otrzymał największe poprawki, i wyrównanie jest przeprowadzane ponownie, tylko dla 5 wektorów (rys. 5.). Ten sam algorytm jest zastosowany dla wyrównania siatek wektorów pochodzących z obu metod.

Ostatecznie jest wybierane rozwiązanie z mniejszym błędem położenia punktu. Jeśli błąd ten nie przekracza 5 cm, przyjmuje się, że obliczenia zostały wykonane poprawnie i ostateczny raport jest prezentowany użytkownikowi. W przeciwnym wypadku generowana jest tylko informacja o błędzie, a plik oczekuje na ingerencję operatora, który może zaakceptować wynik automatyczny lub spróbować wykonać obliczenia modułem manualnym.





Rys. 5. Wyrównanie wektorów

Rys. 6. Szkic obliczeń w systemie POZGEO.  
ROVER – punkt wyznaczany

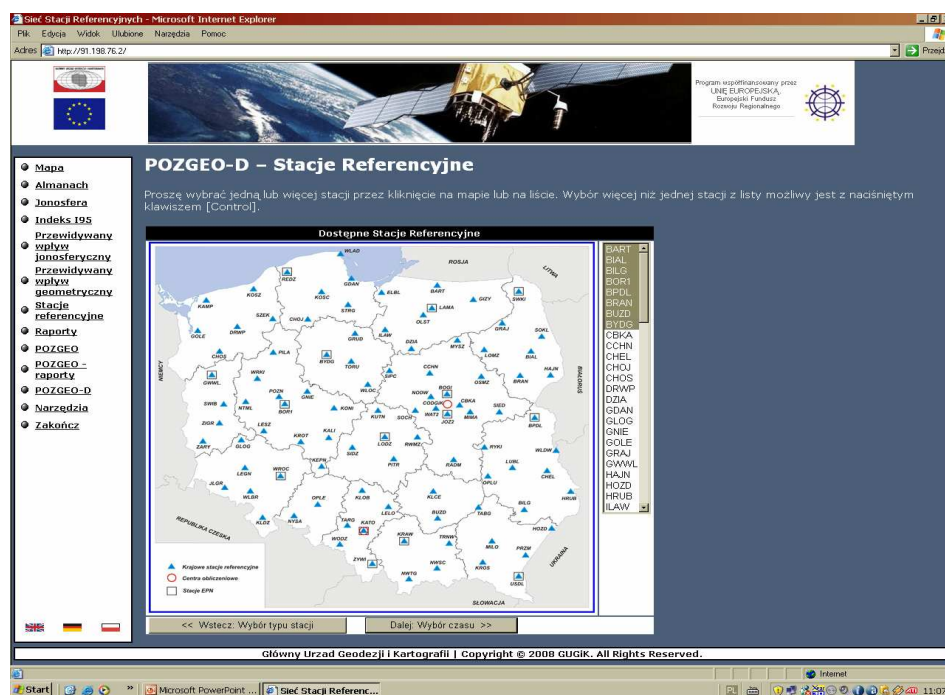
Informacje o błędach mogą się pojawić na wielu etapach obliczeń, jednak użytkownik jest automatycznie informowany jedynie o błędach pojawiających się na etapie kontroli formalnej pliku RINEX. Prezentowanie użytkownikowi pozostałych błędów, wynikających np. z małej dokładności ostatecznego wyznaczenia współrzędnych, jakości danych wprowadzonych przez użytkownika czy błędów wewnętrznych samego systemu (np. brak dostępu do obserwacji lub

błędy danych na stacjach referencyjnych), wymaga każdorazowej, ręcznej interwencji ze strony operatora.

Należy zwrócić uwagę, że przy takiej metodzie obliczeń poszczególne punkty sieci geodezyjnej mierzonej na danym obszarze są obliczane niezależnie, tzn. każdy punkt jest wyznaczany jedynie w oparciu o wektory od stacji referencyjnej do punktu wyznaczanego. System jednorazowo przyjmuje pojedynczy plik RINEX z jednej sesji pomiarowej na jednym punkcie. Brak jest powiązania pomiędzy punktami mierzonymi przez użytkownika, nawet jeśli są to punkty znajdujące się w stosunkowo niewielkiej odległości od siebie.

## 2.2. System POZGEO-D

Alternatywą dla systemu automatycznego postprocessingu jest serwis POZGEO-D i wykonanie obliczeń samodzielnie przy wykorzystaniu obserwacji ze stacji referencyjnych (rys. 7.). POZGEO-D nie wykonuje żadnych obliczeń, a jedynie udostępnia obserwacje. Użytkownik, korzystając z zewnętrznego oprogramowania (np. GEONET z modułem postprocessingu), ma możliwość przetworzenia danych obserwacyjnych, obliczenia wektorów i wyrównania sieci.



Rys. 7. Wybór stacji referencyjnych w systemie POZGEO-D

Serwis jest dostępny z poziomu strony WWW, której obsługa nie nastręcza specjalnych trudności. Wystarczy, po zalogowaniu do systemu ASG-EUPOS,

wybrać stacje referencyjne i określić przedział czasu i interwał, jaki jest potrzebny, a system wygeneruje odpowiednie pliki w formacie RINEX, które następnie można ściągnąć na swój dysk twardy i wykorzystać stosownie do swoich potrzeb.

Takie podejście do obliczeń pozwala na wzmocnienie i nawiązanie sieci GPS mierzonej metodą tradycyjną (bez systemu ASG-EUPOS). Posiadając kilka odbiorników i mierząc nimi równocześnie, można obliczyć wektory nie tylko pomiędzy stacjami referencyjnymi a wyznaczanym punktem, ale także pomiędzy punktami mierzonymi. Ponadto jest to jedyna metoda skorzystania z dobrodziejstwa sieci zintegrowanych i jednoczesnego wyrównania statycznych pomiarów klasycznych i GPS.

### 2.3. Porównanie POZGEO i POZGEO-D

Porównując zalety i wady obu systemów (tab. 3.), nie należy zapominać, że technologie satelitarne są wciąż kosztowną nowością dla wielu geodetów. Dlatego główną zaletą systemu POZGEO jest łatwość obsługi. Użytkownik, posiadając jeden odbiornik, jest w stanie wykonać pomiar i obliczyć położenie punktu ze stosunkowo dużą dokładnością. Potrzebuje do tego jedynie minimum specjalistycznej wiedzy. Oprogramowanie po stronie użytkownika musi przy tym zapewnić jedynie konwersję surowych danych z formatu odbiornika do plików RINEX. Drogi software do postprocessingu nie jest niezbędny. Obliczenia można wykonać minimalnym nakładem pracy, co dodatkowo obniża koszty.

Tabela 3. Porównanie serwisów POZGEO i POZGEO-D

POZGEO	POZGEO-D
<b>Zalety</b>	
Prostota – możliwość wykorzystania nawet przez początkujących użytkowników	Możliwość powiązania sąsiednich punktów sieci (tylko przy pomiarze dwoma i więcej odbiornikami równocześnie)
Obliczenia wykonane niewielkim nakładem pracy	Większa elastyczność postprocessingu – czasami można obliczyć wektory, których nie udało się obliczyć automatycznie
Niepotrzebne dodatkowe (często kosztowne) oprogramowanie	Możliwość wyrównania sieci zintegrowanych (pomiarów klasycznych + GPS) za pomocą odpowiedniego oprogramowania, np. GEONET
<b>Wady</b>	
Brak powiązania z sąsiednimi punktami w sieci	Wymóg posiadania przez wykonawcę dodatkowego oprogramowania
Program skonfigurowany dla typowych obserwacji – obliczenie wektorów wymagające „specjalnego” podejścia może się nie udać	Niezbędna jest większa wiedza do poprawnego, samodzielnego wykonania postprocessingu i wyrównania sieci GPS
Wymóg dodatkowej kontroli, zwłaszcza przy wyznaczeniu osnów geodezyjnych	Większa pracochłonność wykonywanych obliczeń

Z drugiej strony, automatyczne obliczenia ze swej natury są mało elastyczne i może się okazać, że nie uda się obliczyć wektorów, które będą dały się obliczyć przy zastosowaniu postprocessingu manualnego i indywidualnego podejścia, np. przy doborze satelitów czy wyborze konkretnego modelu atmosfery. Brak powiązania sąsiednich punktów sieci i oparcie wszystkich obliczeń na jednym pliku RINEX sprawia, że problemem staje się brak kontroli poprawności wykonanych pomiarów – bardzo niska jest ich niezawodność.

Serwis POZGEO-D i samodzielnie wykonane obliczenia są z całą pewnością bardziej elastyczne i zapewniają więcej możliwości, jeśli chodzi o kontrolę poprawności i metodę wyznaczenia położenia punktów. Ale więcej możliwości to także większa szansa popełnienia błędu przez niedoświadczonego użytkownika. Znacznie dłuższy czas potrzebny do samodzielnego wykonania obliczeń i konieczność posiadania niezależnego, często bardzo drogiego oprogramowania sprawiają, że jest to rozwiązanie zdecydowanie droższe.

### 3. Zarys teoretyczny algorytmu metody BETA zastosowanego w oprogramowaniu APPS

Algorytm metody BETA (Kadaj 2007b) bazuje na specjalnym układzie potrójnych różnic obserwacji fazowych, który ma cechę układu nieskorelowanego – występująca w modelu stochastycznym utworzonych pseudoobserwacji macierz wagowa ma postać diagonalną. Cecha ta sprawia, że rozwiązanie numeryczne staje się relatywnie proste i szybkie.

Potrójne różnice faz tworzą się w ogólności z par różnic podwójnych o różnych momentach czasu obserwacji. Podstawowy układ obserwacji dla podwójnej różnicy faz w pewnej epoce  $t = t_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, m$ ) przedstawia rys. 8., gdzie ogólnie  $\Phi_{pr}(k)$  oznacza fazę sygnału emitowanego przez satelitę o numerze  $r$  ( $r = i, j$ ) odbieranego na stacji o indeksie  $p$  ( $p = 1, 2$ ) w momencie czasu  $t_k$ .

Pojedyncze, podwójne i potrójne różnice fazy dla dwóch stacji naziemnych  $P_1, P_2$  i pary satelitów  $Q_i, Q_j$  (rys. 8.), wyrażają wzory:

$$\Delta\Phi_{1ij}(k) = \Phi_{1j}(k) - \Phi_{1i}(k), \quad \Delta\Phi_{2ij}(k) = \Phi_{2k}(k) - \Phi_{2i}(k) \quad (1a)$$

$$\Delta\Delta\Phi_{ij}(k) = \Delta\Phi_{2ij}(k) - \Delta\Phi_{1ij}(k) \text{ (podwójna różnica faz dla epoki } t_k) \quad (1b)$$

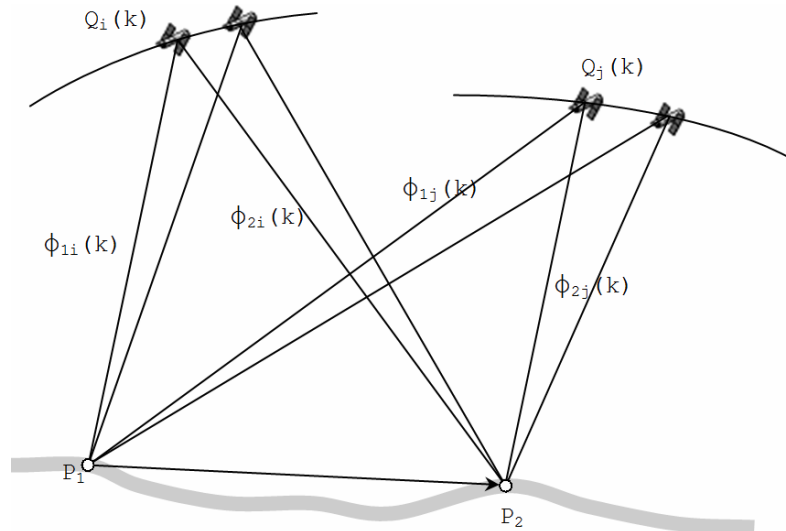
$$\Delta\Delta\Delta\Phi_{ij}(k, l) = \Delta\Delta\Phi_{ij}(l) - \Delta\Delta\Phi_{ij}(k) \text{ (potrójna różnica faz dla epok: } t_k, t_l) \quad (1c)$$

$k, l$  – wskaźniki epok obserwacyjnych – momentów czasu:  $t_k, t_l$ .

Układ obserwacyjny w metodzie BETA tworzy się z potrójnych różnic faz dla następującego zbioru czwórek wskaźników (indeksów satelitów i momentów czasu – epok):

$$\begin{aligned} \underline{\mathcal{B}} = \{ (i, j, k, l) : i, j \in \underline{\mathcal{S}}; i < j; k = 0, 1, 2, \dots, n-1; \\ l = k+1, k+2, \dots, n \} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:  $\mathcal{S}$  – zbiór wskaźników (PRN) satelitów obserwowanych, będący podzbiorem zbioru wskaźników  $\mathcal{S}$  wszystkich satelitów czynnych (aktualnie maksymalny wskaźnik satelity czynnego wynosi 32),  
 $n$  – wskaźnik ostatniej epoki obserwacyjnej odpowiadającej momentowi czasu  $t_n$ .



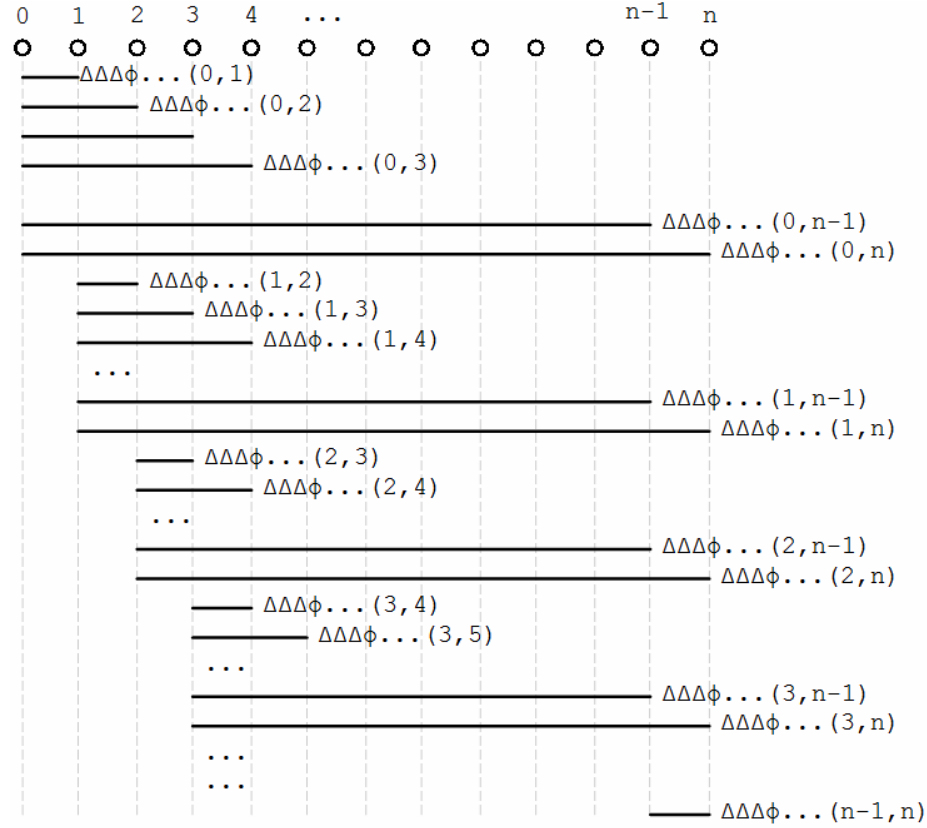
Rys. 8. Układ obserwacyjny dla podwójnej różnicy fazy

Epokowy rozkład różnic potrójnych ilustruje symbolicznie rys. 9. Można zauważyć, że ma on schemat analogiczny do znanego w geodezji układu kątów Schreibera na stacji obserwacyjnej. Gdyby układ kątów Schreibera był wyznaczony z różnic pojedynczych obserwacji kierunkowych, wówczas tworzyłby on układ pseudoobserwacji o pewnej diagonalnej macierzy wagowej, równoważny w skutkach wyrównania metodą najmniejszych kwadratów z pierwotnym układem obserwacji kierunkowych. Stosowne twierdzenie zostało sformułowane w pracy Kadaja (2006). Twierdzenie to przenosi się do układu potrójnych różnic faz, określonych zbiorem  $\mathcal{B}$ , uwzględniając zarówno wszystkie możliwe pary satelitów obserwowanych, jak też wszystkie możliwe pary epok.

W implementacji praktycznej algorytmów stosuje się opcjonalnie różnego rodzaju uproszczenia mające znaczenie zwłaszcza dla długich, kilku- lub wielogodzinnych sesji obserwacyjnych, przy znacznej liczbie  $n$  epok. Wtedy bowiem ilość równań obserwacyjnych znacznie wzrasta, co może skutkować zbyt długim czasem obliczeń. Uproszczenia numeryczne polegają m.in. na „rozrzedzaniu” zbioru obserwacji (zwiększeniu interwału czasu pomiędzy sąsiednimi epokami, rezygnacja z części zbioru  $\mathcal{S}$ , jeśli dwa satelity pary mają niewielkie kąty

elewacji). Podane modyfikacje są wszakże tak ograniczone, aby nie miały istotnego wpływu na finalną dokładność i niezawodność wyznaczenia wektora GPS:  $(P_1, P_2)$ .

Kolejne epoki obserwacyjne:



Rys. 9. Schemat układu potrójnych różnic faz w metodzie BETA

Niezależnie od świadomych uproszczeń numerycznych, znaczna część elementów zbioru  $\underline{\mathcal{B}}$  będzie podlegać wykluczeniu z powodów fizycznych:

- przerwania (zakłócenia) lub defektowych skoków sygnałów satelitarnych (tzw. *cycle slips*),
- zbyt krótkiego czasu obserwacji satelity,
- zbyt małego kąta elewacji (kąt podniesienia  $e$  względem płaszczyzny horyzontalnej) satelity ( $e < 10^\circ$ ) lub „niewidoczności” satelity ze zbioru satelitów czynnych.

Na ogół będziemy mieć więc tylko pewien podzbiór  $\mathcal{B} \subset \underline{\mathcal{B}}$  definiujący wykorzystane pseudoobserwacje potrójnych różnic faz. Szczegółowe ograniczenia w tym względzie są określone opcjonalnie w module administratora APPS.



Ważną cechą algorytmu BETA jest rezygnacja z tradycyjnego pojęcia i funkcji satelity referencyjnego. W opisywanym algorytmie i metodzie każdy z satelitów „widocznych” pełni w układzie obserwacyjnym jednakową funkcję. Takie ujęcie jest korzystne również z tego względu, że przy długich sesjach obserwacyjnych (5-24<sup>h</sup>) żaden z satelitów nie jest „dostępny” w pełnym czasie obserwacji.

Układ równań obserwacyjnych dla potrójnych różnic faz można zapisać w następującej postaci:

$$\lambda \cdot \Delta\Delta\Delta\Phi_{ij}(k, l) + \delta_{ijkl} + e_{ijkl} = \Delta\Delta\Delta s_{ij}(k, l) \quad (3)$$

dla wszystkich  $(i, j, k, l) \in \mathcal{B}$ ,

gdzie:  $\lambda$  – długość fali sygnału o emitowanej i użytej częstotliwości (iloczyn fazy i długości fali jest miarą pseudoodległości),

$\delta_{ijkl} = \text{TR}_{ijkl} + \text{IO}_{ijkl} + a_{ijkl}$  – sumaryczny efekt korekty faz wynikający z następujących elementów:

TR – poprawki (refrakcji) troposferycznej,

IO – poprawki (refrakcji) jonosferycznej),

a – parametrów kalibracji centrum fazowego anteny i przesunięcia centrum względem punktu geodezyjnego,

$\Delta\Delta\Delta s_{ij}(k, l)$  – analogicznie do potrójnych różnic faz, wskaźnikowana potrójna różnica odległości od anten punktów naziemnych do satelitów, będąca funkcją składowych  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  wektora  $(P_1, P_2)$  w kartezjańskim układzie geocentrycznym OXYZ systemu ziemskiego ITRS).

Układ równań obserwacyjnych zawiera więc 3 niewiadome:  $\Delta X_{12}, \Delta Y_{12}, \Delta Z_{12}$ . Dla kompletności rozważań dodajmy, że odległości do satelitów (przy wskazanych niewiadomych) są określane w oparciu o znane wartości parametrów kinematycznych równań orbit satelitów (efemeryd) i parametrów transformacji do układu ziemskiego lub dyskretną postać precyzyjną tych orbit w układzie ziemskim oraz przybliżone współrzędne  $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$  anten odbiorników wyznaczone w odrębnej procedurze (SPP – *single point position*) w oparciu o tzw. pseudoodległości do satelitów. Dla każdego odbieranego przez antenę, w danym momencie czasu, dyskretnego sygnału fazy, identyfikuje się moment czasu wysłania sygnału i dla tego momentu interpoluje się współrzędne satelity. W procedurze interpolacyjnej uwzględnia się dodatkowo efekt relatywistyczny.

Składniki korekty faz wyznacza się według standardowych algorytmów, prezentowanych w podanej literaturze. Dla określenia rozkładu poprawek troposferycznych stosuje się typowy model funkcji GMF (*Global Mapping Function*) przy założeniu poprawki zenitalnej według modelu MODIFIED HOPFIELD (na podstawie cytowanej literatury).

W przypadku zastosowania odbiornika dwuczęstotliwościowego (L1, L2) stosuje się tzw. *ionofree* – kombinację faz, eliminującą wpływ refrakcji jonosferycznej. Kombinacja ta ma następującą formułę:

$$\Phi = \Phi_1 - (\lambda_1 / \lambda_2) \cdot \Phi_2 \quad (4)$$

gdzie:  $\Phi_1$  – faza fali o częstotliwości  $c/\lambda_1$ ,

$\Phi_2$  – faza fali o częstotliwości  $c/\lambda_2$ ,

$c = 299792458$  m/s – prędkość światła,

$\lambda_1 = 0.190293672798365$  m – długość fali na częstotliwości L1,

$\lambda_2 = 0.244210213424568$  m – długość fali na częstotliwości L2.

Przy zastosowaniu kombinacji (4) we wzorze (3) zakłada się  $\lambda = \lambda_1 / [1 - (\lambda_1/\lambda_2)^2]$ .

Układ równań obserwacyjnych (3) jest elementem nieliniowego zadania najmniejszych kwadratów, którego rozwiązanie uzyskuje się poprzez iteracyjną procedurę *Gaussa-Newtona*. Na ogół, przy typowej konstelacji co najmniej 4 satelitów i co najmniej 30-minutowej sesji obserwacyjnej (przy kilkugodzinnych obserwacjach mamy na ogół istotnie większą liczbę efektywnych satelitów), jest on układem dostatecznie dobrze określonym, pozwalającym na uzyskanie 1-2-centymetrowej dokładności wyznaczenia wektora.

Celem eliminacji istotnych zakłóceń losowych (elementów odstających) w procesie obliczeniowym stosuje się filtry ograniczające wielkości residuów (wykluczających elementy odstające) oraz dodatkowo, w miejsce LSQ, tzw. estymator mocny (odporny), oparty na hiperbolicznym składniku funkcji celu (Kadaj 1992).

Program postprocessingu metodą BETA oraz metodą podwójnych różnic faz, z omówionymi w tej publikacji modyfikacjami, stanowi tylko element całości oprogramowania APPS. Istotną zasadą geometryczną wyznaczenia pozycji jest wyrównanie współrzędnych punktu w sieci zawierającej co najmniej 6 wektorów wcinających. Wielokrotne testy sprawdzające funkcjonowanie całości systemu potwierdzają, że dla 1-godzinnych czasów obserwacji wypadkowy błąd położenia punktu wynosi ok. 0.02 m. Wartość ta zmniejsza się w miarę wydłużania czasu sesji obserwacyjnej.

#### 4. Podziękowania

Autorzy wyrażają podziękowania pani profesor Zofii Rzepeckiej oraz doktorowi Pawłowi Wielgoszowi za opracowanie standardowych algorytmów w zakresie postprocessingu GPS, a w szczególności algorytmu podwójnych różnic dla odbiorników jednoczęstotliwościowych, Single Point Position oraz algorytmów obliczenia orbit satelitów typu *broadcast*, a także za wszelkie konsultacje podczas realizacji zadań.

## Literatura

Automatic Postprocessing Software for Trimble Application. Dokumentacja, 2007 (I ed), GEOTRONICS Sp. z o.o., TRIMBLE – POLSKA Sp. z o.o. Koordynator: GUGiK w Warszawie, 2008 (II ed).

Bosy J., 2008: Referat programowy konferencji pt. „Wielofunkcyjny system precyzyjnego pozycjonowania satelitarne ASG-EUPOS”. GUGiK, Warszawa.

GEONET – system obliczeń geodezyjnych, 1992-2008, ® © ALGORES-SOFT Rzeszów, [www.geonet.net.pl](http://www.geonet.net.pl)

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., 2001: GPS – Theory and Practice. Springer-Verlag, Wien-New York. Third, revised edition.

Kadaj R., 1992: An Alternative to a Discrete KALMAN FILTER. [In:] (K. Linkwitz a. U. Hangleiter) HIGH PRECISION NAVIGATION, Duemmler Verlag, s. 379-386.

Kadaj R., 1997: Wyrównanie sieci wektorowej GPS i jej transformacja do układu odwzorowawczego elipsoidy Krasowskiego lub GRS-80 (WGS-84) w programach systemu GEONET. Seminarium pt. „Zastosowanie Technik Kosmicznych w Geodezji i Geodynamice”. Kraków, 22-23 września.

Kadaj R., 2001: Formuły odwzorowawcze i parametry układów współrzędnych. Wyd. GUGiK, Warszawa WT G-1.10, s. 1-103.

Kadaj R., 2006: Problematyka integracji sieci GPS z sieciami klasycznymi. Seminarium Sekcji Sieci Geodezyjnych PAN, Komisji Geodezji Satelitarnej Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN, Sekcji Dynamiki Ziemi Komitetu Geodezji PAN, pt. „Aktualne Problemy Podstawowych Sieci Geodezyjnych w Polsce” Warszawa, 16.XI.

Kadaj R., 2007a: Sieci wektorowe GPS z obserwacjami klasycznymi w aspekcie modernizacji państwowych osnów geodezyjnych. Materiały II ogólnopolskiej konf. pt. „Kartografia numeryczna i informatyka geodezyjna”, Rzeszów-Polańczyk-Solina, 27-29.09, s. 171-179.

Kadaj R., 2007b: Algorytmy i oprogramowanie metody BETA realizacji postprocessingu GPS oparte na potrójnych różnicach obserwacji fazowych. Dokumentacja wewnętrzna. © ALGORES-SOFT, Rzeszów.

Kadaj R., Świętoń T., 2007: Moduł obliczeniowy (Rozdz. 5.), Zastosowane algorytmy i techniki obliczeniowe (Rozdz. 6.). W dokumentacji systemu: „Automatic Postprocessing Software for Trimble Application”. Warszawa, 2007 (I ed), 2008 (II ed), Rozdz. 5 i 6. GEOTRONICS Sp. z o.o., TRIMBLE – POLSKA Sp. z o.o Koordynator: GUGiK w Warszawie.

Leick A., 2004: GPS SATELLITE SURVEING. John Wiley & SONS, INC, USA, 2004.

Świętoń T., 2007: Algorytmy i podprogramy funkcjonalne APPS dla systemu ASG-EUPOS. Dokumentacja wewnętrzna © ALGORES-SOFT, Rzeszów.

## **ALGORITHMS AND SOFTWARE OF AUTOMATIC POSTPROCESSING MODULE (APPS) IN POLISH PRECISE SATELLITE POSITIONING SYSTEM ASG-EUPOS**

### **A b s t r a c t**

In 2.06.2008 Precise Satellite Positioning System ASG-EUPOS became available for customers. It was built in years 2007-2008 on GUGiK (Head Office of Geodesy and Cartography) order. System has real time and postprocessing services which support GPS measurements with accuracies up to 1 cm. Automatic Postprocessing Software for Trimble Application (APPS) is used in POZGEO – service which is a part of ASG-EUPOS. The new algorithm of postprocessing (name BETA) was developed. In this article functional model and algorithms of postprocessing (especially algorithm BETA) used in APPS are described. The differences between practical application of POZGEO and POZGEO-D are presented.

*Złożono w redakcji we wrześniu 2008 r.*