

**Autoreferat**

**dr inż. Bogdan Skorupa**

## Spis treści

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Imię i nazwisko .....                                                                                                | 3  |
| 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....                                                                             | 3  |
| 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....                                                | 3  |
| 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego .....                                                                                | 4  |
| 4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego .....                                                                                   | 4  |
| 4.2 Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz<br>z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania ..... | 4  |
| 4.2.1 Uzasadnienie podjętej tematyki badań .....                                                                        | 4  |
| 4.2.2 Omówienie problematyki oraz osiągniętych wyników badań<br>własnych zawartych w monografii.....                    | 5  |
| 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.....                                                            | 14 |
| 6. Bibliografia.....                                                                                                    | 19 |

## 1. Imię i nazwisko

Bogdan Skorupa

## 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- A. Tytuł zawodowy magistra inżyniera w dyscyplinie geodezja i kartografia, uzyskany na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie.

Praca magisterska pod tytułem „*Wyznaczenie współrzędnych wybranych punktów niedostępnych na obszarze Krakowa w oparciu o pomiary klasyczne i GPS*”, obroniona 28 czerwca 1995 r.

- B. Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie geodezja i kartografia, nadany przez Radę Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie.

Praca doktorska pod tytułem „*Zwiększenie efektywności technologii GPS poprzez estymację lokalnej refrakcji różnicowej*”, obroniona 11 czerwca 2003 r.

Promotor: dr hab. Władysław Góral, prof. AGH.

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Józef Beluch (AGH w Krakowie),  
prof. dr hab. inż. Stefan Cacoń (AR we Wrocławiu).

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

- A. W latach 1995 – 2003, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, **asystent**.

- B. Od 2003 roku – nadal, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, **adiunkt**.

- C. W latach 2009 - 2013 – Wyższa Szkoła Biznesu i Przedsiębiorczości w Ostrowcu Świętokrzyskim, Wydział Nauk Społecznych i Technicznych, **adiunkt**.

## 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego

### 4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) wskazuję monografię współautorską:

**Skorupa B., Góral W., *Położenie i prędkość satelitów GNSS na podstawie uogólnionego zagadnienia dwóch stałych centrów grawitacji***, Rozprawy Monografie, Nr 308, Wydawnictwa AGH, 2015, ISBN: 978-83-7464-810-3.

Mój udział w monografii wynosi 80%.

### 4.2 Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

*(Odwołania do literatury podane w nawiasach kwadratowych odnoszą się do publikacji zestawionych w Bibliografii, zamieszczonej na końcu Autoreferatu)*

#### 4.2.1 Uzasadnienie podjętej tematyki badań

Obliczanie współrzędnych satelitów stanowi jeden z podstawowych etapów opracowania danych pomiarowych GNSS. W zagadnieniach obliczeniowych geodezji satelitarnej wymagana jest wysoka dokładność obliczania pozycji obserwowanych satelitów. Jednocześnie wraz z uruchamianiem kolejnych globalnych systemów nawigacji satelitarnej wzrasta liczba satelitów obserwowanych w trakcie sesji pomiarowej. Zatem metody opracowania danych efemerydalnych muszą zapewniać zarówno wysoką dokładność wyznaczenia współrzędnych satelitów, jak również możliwie niską złożoność obliczeniową zastosowanych algorytmów. Spełnienie powyższych kryteriów napotyka na trudności, szczególnie w przypadku opracowania danych efemerydalnych systemu GLONASS. Efemeryda pokładowa w tym systemie obejmuje składowe wektora położenia i prędkości oraz składowe wektora przyspieszenia satelity, wywołane przyciąganiem grawitacyjnym Księżyca i Słońca [5]. Dane te są transmitowane przez każdego satelitę, odpowiednio dla 15-tej i 45-tej minuty

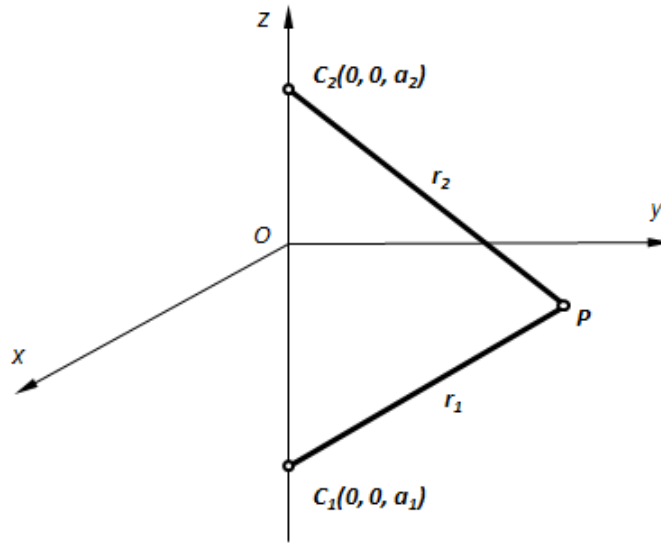
każdej godziny czasu UTC-GLONASS. Dana efemeryda pokładowa jest ważna w krótkim, półgodzinnym zakresie  $-15^m \leq t \leq 15^m$ , gdzie  $t$  jest epoką danej efemerydy pokładowej. Na podstawie powyższych danych efemerydalnych oblicza się położenie i prędkość satelitów metodą całkowania numerycznego układu równań różniczkowych ruchu [8]. Metody całkowania numerycznego charakteryzują się znaczną złożonością obliczeniową i stosowanie ich do dużej liczby satelitów obserwowanych w danej epoce pomiarowej nadmiernie wydłuża czas obliczeń [9]. Zarówno krótki okres aktualności efemerydy pokładowej, jak również konieczność numerycznego całkowania równań ruchu satelity, stanowią utrudnienie przy opracowaniu obserwacji sygnałów GLONASS, w zastosowaniu do rozwiązywania zadań geodezyjnych. Jest to szczególnie istotne w przypadku opracowań realizowanych w trybie kinematycznym. Przedstawione powyżej trudności i problemy techniczne oraz brak innowacyjnych opracowań w literaturze przedmiotu stanowiły podstawowy czynnik motywujący mnie do podjęcia badań w celu opracowania analitycznych algorytmów obliczania położenia i prędkości satelitów GNSS. Podejście przedstawione w monografii bazuje na metodzie analitycznej, w której opis ruchu satelity w polu grawitacyjnym Ziemi sprowadza się do rozwiązania uogólnionego zagadnienia dwóch stałych centrów grawitacji – UZDSCG. W zadaniu tym równania różniczkowe ruchu Hamiltona-Jacobiego są całkowalne w polu grawitacyjnym Ziemi lub innej spłaszczonej planety o symetrii osiowej i równikowej (symetryczne UZDSCG) oraz w bardziej ogólnym przypadku, przy założeniu asymetrycznego rozkładu potencjału grawitacyjnego względem równika (asymetryczne UZDSCG).

#### **4.2.2 Omówienie problematyki oraz osiągniętych wyników badań własnych zawartych w monografii**

Zasadniczym celem badań opisanych w monografii było opracowanie analitycznych algorytmów wyznaczania położenia i prędkości satelitów GNSS zarówno w oparciu o efemerydy pokładowe, jak i precyzyjne. Proponowane algorytmy obliczania położenia i prędkości satelitów oparte są

na uogólnionym zagadnieniu dwóch stałych centrów grawitacji. Teoretyczny wstęp do UZDSCG stanowi treść początkowych rozdziałów monografii.

Problem dwóch stałych centrów grawitacji stanowi szczególny przypadek ograniczonego zagadnienia trzech ciał: dwa nieruchome centra grawitacji  $C_1$  i  $C_2$  (Rys.1) o masach  $m_1$  i  $m_2$ , znajdujące się w odległości  $a_1 + a_2 = 2c$ , przyciągają punkt materialny  $P$  poruszający się w polu grawitacyjnym generowanym przez te masy, zgodnie z prawami mechaniki Newtona.



**Rys. 1** Położenie dwóch stałych centrów grawitacji w układzie współrzędnych kartezjańskich.

Ruch satelity w uogólnionym zagadnieniu dwóch stałych centrów grawitacji opisany jest następującym układem równań różniczkowych, wyrażonych w stałym układzie kartezjańskim  $x, y, z$  [2]:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \frac{\partial W}{\partial x}, \quad \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{\partial W}{\partial y}, \quad \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{\partial W}{\partial z}, \quad (1)$$

gdzie  $t$  oznacza czas, natomiast  $W$  jest potencjałem grawitacyjnym.

Funkcja potencjału w uogólnionym zagadnieniu dwóch stałych centrów grawitacji aproksymuje potencjał grawitacyjny Ziemi z dokładnością kwadratu jej spłaszczenia [1], [6]. Dlatego orbita eulerowska stanowi znacznie lepsze przybliżenie rzeczywistego ruchu satelitów w polu grawitacyjnym Ziemi niż orbita keplerowska [3], [2].

Niech  $x, y, z$  oznaczają współrzędne punktu o masie jednostkowej, którego ruch podlega oddziaływaniu grawitacyjnemu dwóch stałych mas

punktowych znajdujących się na osi  $z$ . W UZDSCG potencjał grawitacyjny wyraża się następującym równaniem [2]:

$$W = \frac{GM}{2} \left( \frac{1+i\sigma}{r_1} + \frac{1-i\sigma}{r_2} \right), \quad (2)$$

gdzie

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + [z - c(\sigma + i)]^2}, \quad (3)$$

$$r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + [z - c(\sigma - i)]^2}. \quad (4)$$

W równaniu (2)  $G$  oznacza stałą grawitacji,  $M$  masę Ziemi, zaś  $i$  jest jednostką urojoną. Stałe  $c$  i  $\sigma$  w równaniach (2) – (4) są funkcjami harmonik  $J_2$  i  $J_3$ :

$$c = a_e \sqrt{J_2 - \left( \frac{J_3}{2J_2} \right)^2}, \quad \sigma = \frac{J_3}{2J_2} \cdot \frac{a_e}{c}, \quad (5)$$

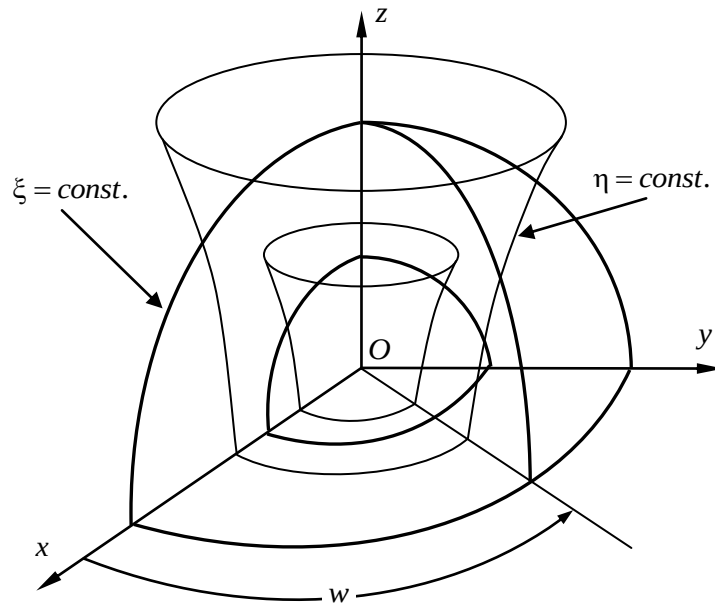
gdzie  $a_e$  oznacza promień elipsoidy odniesienia.

Funkcja  $W$  określona zgodnie z równaniem (2), przy odpowiednim doborze parametrów  $c$  i  $\sigma$ , umożliwia obliczanie wartości pośrednich między rzeczywistą wartością potencjału a modelem uwzględniającym tylko potencjał od kuli. Ponadto zastosowanie funkcji potencjału Ziemi w formie (2) umożliwia całkowalność równań ruchu sztucznych satelitów Ziemi (SSZ) z pełnym uwzględnieniem harmoniki  $J_2$ , która jest głównym czynnikiem zakłócającym w keplerowskim modelu ruchu satelitów, bazującym tylko na kulistym modelu pola grawitacyjnego Ziemi. Szkic wyprowadzenia wzoru na potencjał grawitacyjny, jako funkcji parametrów  $c$  i  $\sigma$ , zamieszczono w rozdziale 2 monografii.

Rozwiązanie równań ruchu SSZ w uogólnionym zagadnieniu dwóch stałych centrów grawitacji przedstawia się w układzie współrzędnych geocentrycznych sferoidalnych  $\xi, \eta, w$ , które ze współrzędnymi kartezjańskimi  $x, y, z$  związane są następującymi równaniami [2], [4]:

$$\begin{aligned} x &= \sqrt{(\xi^2 + c^2)(1 - \eta^2)} \cos w, \\ y &= \sqrt{(\xi^2 + c^2)(1 - \eta^2)} \sin w, \\ z &= c\sigma + \xi\eta. \end{aligned} \quad (6)$$

Współrzędne sferoidalne  $\xi$ ,  $\eta$  i  $w$  są względem siebie ortogonalne, przy czym powierzchniami współrzędnych są odpowiednio elipsoida obrotowa ( $\xi = \text{const.}$ ), hiperboloida obrotowa (jednopowłokowa –  $\eta = \text{const.}$ ,  $\sigma = 0$ , dwupowłokowa –  $\eta = \text{const.}$ ,  $\sigma \neq 0$ ), gdzie osią jest oś obrotu Ziemi, a jej środek  $O$  leży w punkcie przecięcia tej osi z płaszczyzną  $z = c\sigma$  [2] oraz płaszczyzna ( $w = \text{const.}$ ) przechodząca przez oś obrotu  $Oz$  (Rys. 2) [2], [3].



**Rys. 2** Układ współrzędnych sferoidalnych spłaszczonych.

Wzór na potencjał grawitacyjny dany równaniem (2) we współrzędnych sferoidalnych ( $\xi$ ,  $\eta$ ) otrzymuje postać :

$$W = \frac{GM(\xi - c\sigma\eta)}{J}, \quad (7)$$

gdzie  $J = \xi^2 + c^2\eta^2. \quad (8)$

Wzory (7) i (8) odgrywają podstawową rolę w całkowaniu równań ruchu SSZ w układzie współrzędnych sferoidalnych spłaszczonych. W rozdziale 3 monografii omówiono układ współrzędnych sferoidalnych spłaszczonych oraz podano wzory umożliwiające przeliczenie składowych wektora położenia i prędkości satelity z układu geocentrycznego kartezjańskiego do układu sferoidalnego. Podano również wzory umożliwiające transformację odwrotną. Współrzędne oraz prędkość w układzie sferoidalnym pełnią funkcję



współrzędnych i prędkości uogólnionych oraz umożliwiając separację zmiennych w układzie równań ruchu satelity Hamiltona-Jacobiego. Następnie przedstawiono wyprowadzenie wzoru na zupełną całkę Hamiltona-Jacobiego oraz w zarysie podano jej rozwiązanie. Ponadto, w sposób bardziej szczegółowy niż w pracy źródłowej [2], wyprowadzono wzory na całki pierwsze równań ruchu satelitów UZDSCG.

W rozdziale 4 omówiono problematykę transformacji składowych wektora położenia i prędkości z układów ECEF (Earth Centered, Earth Fixed), w których podawane są efemerydy satelitów, do układów określanych w literaturze mianem ECI (Earth Centered, Inertial) [7], w których są rozwiązywane równania ruchu satelitów. Przedstawiono ścisłą postać tej transformacji, jak również model uproszczony, w którym nie uwzględnia się ruchu precesyjno-nutacyjnego oraz ruchów bieguna. W pracy uzasadniono potrzebę stosowania ścisłego modelu transformacji między układami ECEF i ECI w zastosowaniu do dłuższych interwałów predykcji ( $\Delta t > 30^m$ ), lub w przypadku wysokiej dokładności transformowanych danych. Przedstawiono również test numeryczny dający pogląd na problem ustalenia zakresu stosowalności uproszczonych formuł transformacji, w zależności od wymagań dokładnościowych transformowanych danych oraz wielkości interwału predykcji położenia i prędkości satelitów.

W rozdziale 5 zaprezentowano algorytm obliczania elementów orbity pośredniej (eulerowskiej), na podstawie znanych składowych wektora położenia i prędkości satelity oraz algorytm obliczania jego położenia i prędkości, na podstawie elementów orbity pośredniej. Algorytmy powyższe zilustrowano szczegółowymi przykładami liczbowymi opartymi na precyzyjnej efemerydzie wybranego satelity GPS. W przykładzie numerycznym opartym na 48 epokach obejmujących całą dobę, wykazano bardzo wysoką precyzję odtworzenia składowych położenia i prędkości satelity, na podstawie elementów orbity obliczonych w tych samych epokach. Następnie na przykładzie efemerydy pokładowej wybranego satelity GLONASS przeprowadzono analizę dobowej zmienności elementów oskulacyjnej orbity pośredniej (eulerowskiej) oraz jako przypadek szczególny danego algorytmu również elementów oskulacyjnej orbity keplerowskiej. Na podstawie porównania wyników obliczeń ustalono, że elementy orbity pośredniej wykazują o rząd mniejsze dobowe amplitudy zmian

niż elementy oskulacyjnej orbity keplerowskiej. W kolejnych przykładach przedstawiono w postaci graficznej wyniki predykcji składowych wektora położenia i prędkości wybranego satelity GLONASS, również dla 48 epok. Ponadto dla tych samych epok podano różnice między składowymi wektora położenia i prędkości wyznaczonymi w oparciu o metodę UZDSCG oraz metodę opartą na całkowaniu numerycznym Rungego-Kutty czwartego rzędu, zrealizowaną według algorytmu podanego w pracy [8]. Otrzymane różnice składowych położenia i prędkości satelitów nie przekraczały odpowiednio  $\pm 10$  cm oraz  $\pm 12$  mm/s. Porównano również złożoność obliczeniową obydwu metod, na przykładzie predykcji składowych wektora położenia i prędkości satelity systemu GLONASS w interwale 15-min, przyjmując dla metody Rungego-Kutty 60-sekundowy krok całkowania (Tab. 1).

**Tabela 1** Użycie operacji arytmetycznych w porównywanych algorytmach predykcji składowych wektora stanu satelitów GNSS. (Źródło: Skorupa B., Góral W., *Położenie i prędkość satelitów GNSS na podstawie uogólnionego zagadnienia dwóch stałych centrów grawitacji*)

| Metoda obliczeń | Liczba operacji arytmetycznych   |           |                        |                          |
|-----------------|----------------------------------|-----------|------------------------|--------------------------|
|                 | dodawanie, odejmowanie, mnożenie | dzielenie | pierwiastek kwadratowy | funkcje trygonometryczne |
| UZDSCG          | 780                              | 62        | 15                     | 52                       |
| Runge-Kutta 4   | 4215                             | 405       | 60                     | -                        |

Przeprowadzone testy obliczeniowe wykazały, że metoda predykcji bazująca na UZDSCG może być stosowana do obliczania położenia i prędkości satelitów, jako konkurencyjna wobec metody całkowania numerycznego. Ponadto algorytm predykcji oparty na UZDSCG charakteryzuje się mniejszą złożonością obliczeniową w porównaniu z powszechnie stosowaną metodą całkowania numerycznego Rungego-Kutty.

W przypadku orbity pośredniej, która w pełni uwzględnia efekt spłaszczenia Ziemi, głównym czynnikiem zakłócającym ruch satelitów GNSS jest grawitacyjne oddziaływanie Księżyca i Słońca. W rozdziale 6 monografii przedstawiono analizę wpływu przyspieszeń luni-solarnych na dokładność obliczania położenia i prędkości satelitów w trybie predykcji. Podano również propozycję semi-analitycznej metody obliczania wpływu grawitacyjnego oddziaływania Księżyca i Słońca na ruch satelitów GNSS. Wykazano,

że zastosowanie autorskiej metody obliczania poprawek luni-solarnych pozwala na uzyskanie mniejszych błędów predykcji położenia i prędkości satelitów, w porównaniu z algorytmem uproszczonym, bazującym na danych transmitowanych w efemerydzie pokładowej satelitów GLONASS. Porównanie dokładności predykcji położenia i prędkości satelitów GNSS, zrealizowanych z zastosowaniem obydwu metod obliczania poprawek luni-solarnych, przeprowadzono w oparciu o zależności:

$$\delta d = \sqrt{(x_b - x_p)^2 + (y_b - y_p)^2 + (z_b - z_p)^2}, \quad (9)$$

$$\delta v = \sqrt{(\dot{x}_b - \dot{x}_p)^2 + (\dot{y}_b - \dot{y}_p)^2 + (\dot{z}_b - \dot{z}_p)^2}, \quad (10)$$

gdzie składowe położenia i prędkości satelity ze wskaźnikiem dolnym  $p$  oznaczają wartości predykowane, natomiast wskaźnik  $b$  odnosi się do ich wartości danych w efemerydzie pokładowej.

W tabeli 2 podano porównanie średnich wartości odchyłek predykcji, obliczonych na podstawie zależności (9) i (10) oraz odpowiednie odchylenia standardowe, uzyskane dla predykcji położenia i prędkości 24 satelitów systemu GLNONASS, zrealizowanych z uwzględnieniem poprawek luni-solarnych obliczonych metodą autorską (wariant-I) oraz przy zastosowaniu poprawek luni-solarnych danych w efemerydzie pokładowej (wariant-II).

**Tabela 2** Średnie wartości odchyłek predykcji położenia i prędkości satelitów GLONASS, od wartości danych w efemerydzie pokładowej, uzyskane w wyniku realizacji dwu wariantów predykcji. (Źródło: Skorupa B., Góral W., *Położenie i prędkość satelitów GNSS na podstawie uogólnionego zagadnienia dwóch stałych centrów grawitacji*)

| Wariant obliczeń             | I   | II  |
|------------------------------|-----|-----|
| $\overline{\delta d}$ [m]    | 4.2 | 5.3 |
| $\sigma_{\delta d}$ [m]      | 1.8 | 2.2 |
| $\overline{\delta v}$ [mm/s] | 2.3 | 2.8 |
| $\sigma_{\delta v}$ [mm/s]   | 1.0 | 1.1 |

Zaprezentowane wyniki testów numerycznych potwierdziły skuteczność metody uwzględniania przyspieszeń luni-solarnych, jako poprawek do położenia i prędkości satelitów. Jednakże wraz ze zwiększaniem interwału predykcji zaobserwowano istotny wzrost błędów predykcji, związany z oskulacyjnym charakterem elementów orbity pośredniej (Tab. 3).

**Tabela 3** Średnie wartości odchyłek predykcji składowych wektora stanu od wartości danych w efemerydzie pokładowej, obliczone dla 24 satelitów systemu GLONASS w dniu 1.06.2013, w zależności od zastosowanego interwału predykcji  $\Delta t$ . (Źródło: Skorupa B., Góral W., *Położenie i prędkość satelitów GNSS na podstawie uogólnionego zagadnienia dwóch stałych centrów grawitacji*)

| $\Delta t$ [min]             | 30  | 60  | 90  | 120  |
|------------------------------|-----|-----|-----|------|
| $\overline{\delta d}$ [m]    | 1.4 | 4.2 | 9.4 | 17.9 |
| $\sigma_{\delta d}$ [m]      | 0.6 | 1.8 | 4.4 | 9.0  |
| $\overline{\delta v}$ [mm/s] | 1.3 | 2.3 | 4.0 | 6.8  |
| $\sigma_{\delta v}$ [mm/s]   | 0.5 | 1.0 | 1.9 | 3.4  |

Metodę rozwiązania tego problemu, polegającą na uwzględnieniu wpływu przyspieszeń luni-solarnych na zmienność elementów orbity pośredniej przedstawiono w 7 rozdziale monografii. Na jego wstępie wyprowadzono wzory na całki pierwsze w teorii ruchu keplerowskiego i ich zmiany wywołane przez czynniki perturbujące. Na przykładzie wybranego satelity GPS zilustrowano dobowe zmiany wartości całek pierwszych w ruchu eulerowskim i porównano je z wpływem oddziaływania grawitacyjnego Księżyca i Słońca. W dalszej części rozdziału wyprowadzono równania wariacyjne Gaussa, opisujące zmianę elementów orbity w ruchu keplerowskim. Wykorzystanie analizy i mechaniki wektorowej pozwoliło na wyprowadzenie wielu równań w sposób zwięzły i bardziej poglądowy niż ma to miejsce w wielu podręcznikach z zakresu mechaniki nieba. W pracy wykazano, że równania wariacyjne Gaussa wyprowadzone dla orbity keplerowskiej można w pełni wykorzystać dla elementów orbity eulerowskiej. Jest to możliwe, ponieważ elementy orbity pośredniej stanowią uogólnienie elementów orbity keplerowskiej. Problematykę wpływu przyspieszeń luni-solarnych zilustrowano za pomocą tabel oraz wykresów, sporządzonych dla wszystkich 6 elementów orbity w ciągu całej doby. Wpływ perturbacji luni-solarnych na zmianę elementów orbity pośredniej danego satelity obliczano metodą całkowania numerycznego równań wariacyjnych Gaussa. Obliczone w ten sposób zmiany elementów orbity eulerowskiej porównano z ich wartościami rzeczywistymi. Wyniki analizy potwierdziły, że w teorii ruchu satelitów opartej na UZDSCG głównym czynnikiem zakłócającym jest oddziaływanie grawitacyjne Księżyca i Słońca. W końcowej części tego rozdziału zaprezentowano w postaci graficznej,

na przykładzie wszystkich elementów orbity eulerowskiej, wpływ pozostałych czynników perturbujących na ruch satelity w ciągu doby. Wykazano dużą korelację między perturbacjami dobowymi, co wykorzystano do przeprowadzenia predykcji położenia satelity w ciągu 6-cio godzinowego interwału.

#### 4.2.3 Podsumowanie osiągniętych wyników

Do najważniejszych oryginalnych rozwiązań i wniosków wynikających z przeprowadzonych badań podsumowujących wkład opisywanego w niniejszym autoreferacie osiągnięcia naukowego w rozwój dyscypliny zaliczam:

- Opracowanie analitycznych algorytmów predykcji położenia i prędkości satelitów GNSS w oparciu o efemerydy pokładowe i precyzyjne, na podstawie uogólnionego zagadnienia dwóch stałych centrów grawitacji.
- Wykazanie, że zaproponowana analityczna metoda obliczania położenia i prędkości satelitów GLONASS, jako bardziej efektywnej w porównaniu z powszechnie stosowaną metodą całkowania numerycznego Rungego-Kutty.
- Przeprowadzenie szczegółowej analizy zmienności elementów oskulacyjnych orbity pośredniej satelitów GPS i GLONASS.
- Analiza wpływu oddziaływania grawitacyjnego Księżyca i Słońca na dokładność predykcji położenia i prędkości satelitów GLONASS, w zależności od położenia satelity na jednej z trzech płaszczyzn orbitalnych.
- Opracowanie semi-analitycznej metody obliczania wpływu oddziaływania grawitacyjnego Księżyca i Słońca na zmiany położenia i prędkości oraz zmiany elementów orbity pośredniej satelitów GNSS.
- Zwiększenie dokładności predykcji położenia i prędkości satelitów GLONASS na podstawie efemerydy pokładowej poprzez modyfikację metody obliczania poprawek luni-solarnych.
- Wykazanie możliwości ujednolicenia metod obliczania położenia i prędkości satelitów różnych systemów nawigacyjnych, a w szczególności GPS i GLONASS

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

(Odwołania do literatury podane w nawiasach okrągłych odnoszą się do publikacji zebranych w „Wykazie opublikowanych prac naukowych i twórczych prac zawodowych oraz informacji o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”; Załącznik nr3 )

W październiku 1995 r. zostałem zatrudniony na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie na stanowisku asystenta. W tym czasie moje zainteresowania naukowe skupiały się głównie na zagadnieniach zastosowania technik satelitarnych w różnego rodzaju pracach geodezyjnych oraz tworzeniu programów narzędziowych automatyzujących realizację obliczeń i analizę rozwiązań wektorów GPS. Zrealizowane przeze mnie prace programistyczne doprowadziły do znacznego udoskonalenia własnego warsztatu badawczego, co umożliwiło mi podjęcie badań nt. *„Opracowanie procedur numerycznych zwiększających efektywność estymacji współrzędnych geodezyjnych za pomocą GPS”* (II.F.1), które zrealizowałem w latach 1999 - 2002. W ramach badań własnych opracowałem podprogramy realizujące dostęp do zbiorów binarnych zawierających dane obserwacyjne i nawigacyjne w formacie Ashtech. Ponadto opracowałem algorytm obliczania parametrów refrakcji jonosferycznej i troposferycznej oraz moduł realizujący wprowadzanie korekcji do obserwacji fazowych GPS. Zrealizowałem testy numeryczne, w wyniku których wykazałem poprawność działania zaprojektowanego algorytmu. Wyniki eksperymentów obliczeniowych zaprezentowałem w formie referatu (II.L.2) i publikacji (II.E.3).

Biorąc pod uwagę tendencję rozwojową technologii GPS, skierowaną na tworzenie regionalnych i lokalnych sieci stacji permanentnych, podjąłem pod kierownictwem prof. W. Górala temat badawczy dotyczący estymacji parametrów refrakcji na obszarach ograniczonych punktami tego rodzaju sieci. Realizacja badań wymagała opracowania szeregu narzędzi służących do rozszerzania możliwości firmowych programów do opracowywania obserwacji satelitarnych. W tym celu napisałem program, umożliwiający wielokrotne uruchamianie programu GPPS firmy Ashtech z różnymi parametrami pracy i różnymi danymi wejściowymi oraz analizę uzyskanego zbioru rozwiązań. Opracowane programy pomocnicze wykorzystałem w trakcie realizacji badań własnych nt. *„Zwiększenie efektywności technologii GPS w zastosowaniach geodezyjnych poprzez estymację lokalnej refrakcji różnicowej”* (II.F.2),

zrealizowanych w roku 2003. W ramach badań własnych opracowałem metodykę wyznaczania lokalnych różnicowych poprawek jonosferycznych i troposferycznych przy użyciu obserwacji zarejestrowanych w sieci stacji permanentnych GPS. Napisałem także program DEMER, służący do tworzenia lokalnego, różnicowego modelu refrakcji jonosferycznej i troposferycznej przy użyciu obserwacji fazowych GPS, zarejestrowanych na punktach sieci stacji permanentnych.

W czerwcu 2003 r. obroniłem pracę doktorską nt. *„Zwiększenie efektywności technologii GPS poprzez estymację lokalnej refrakcji różnicowej”*, w której zawarłem wyniki moich badań nad metodami generowania lokalnych modeli refrakcji oraz wykorzystaniem tych modeli, w celu poprawienia dokładności i niezawodności wyznaczania współrzędnych punktów pomierzonych na obszarach ograniczonych siecią stacji permanentnych GPS.

Moje dalsze badania były ukierunkowane na doskonalenie technik opracowania pomiarów GPS zarejestrowanych zarówno na punktach sieci stacji permanentnych jak i na stacjach użytkowników systemu (II.E.5, II.L.3). Systematycznie rozwijałem własne oprogramowanie, dążąc do eliminowania udziału zewnętrznych programów komercyjnych, w procesie opracowania pomiarów GPS. W latach 2003 - 2005 udoskonaliłem program DEMER oraz opracowałem program RBS, realizujący pełny zakres obliczeń związanych z opracowaniem wektora GPS. Programy te pozwoliły na prowadzenie badań w warunkach pełnej kontroli nad procesem obliczeniowym, bez konieczności wykorzystywania zewnętrznego oprogramowania (II.L.4). Udoskonalone oprogramowanie zastosowałem w badaniach dotyczących metod wyznaczania całkowitej początkowej nieoznaczoności cykli fazowych w pomiarach GPS, które prowadziłem w latach 2007 - 2009 (II.E.6, 11). W latach 2010 - 2015 prowadziłem badania w zakresie doskonalenia metod obliczania pozycji i prędkości satelitów GNSS (GPS i GLONASS) z zastosowaniem teorii dwóch stałych centrów grawitacji. Wyniki badań zostały przedstawione w referatach (II.L.6 – 10) oraz artykułach współautorskich (II.A.2, II.E.15).

Obecnie prowadzę badania dotyczące integracji algorytmów obliczeniowych w zagadnieniach predykcji pozycji i prędkości satelitów GNSS, na bazie teorii dwóch stałych centrów grawitacji.

Oprócz prac należących do głównego nurtu moich zainteresowań naukowo-badawczych, brałem również udział w innych przedsięwzięciach realizowanych w Zakładzie Geodezji i Kartografii (od 2007 r. Katedrze Geomatyki) WGGiŚ AGH.

W pierwszych latach pracy uczestniczyłem w badaniach prowadzonych przez zespół prof. Stanisława Boczara, dotyczących cyklicznych obserwacji deformacji terenu wywołanych eksploatacją górnictw kopalń w rejonie Trzebin i Wojkowic. W ramach tych prac uczestniczyłem w pomiarach realizowanych metodą niwelacji precyzyjnej oraz wykonywałem pomiary GPS.

W latach 1997-2005 uczestniczyłem jako wykonawca w dwóch projektach KBN: nr 9T12A05513 nt. „Ustalenie zasad wyznaczenia zasięgu podziemnej eksploatacji górnictwa w oparciu o wyniki pomiarów przemieszczeń prowadzonych w rejonie wschodniej części Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego” (II.J.1) i nr 5T12E02323 nt. „Badawcza sieć geodynamiczna na obszarze GOP, nawiązana do śląskiej sieci ASG i sieci niwelacyjnej GIGANT” (II.J.2). W ramach udziału w tych projektach uczestniczyłem w pomiarach niwelacyjnych, a także realizowałem pomiary i opracowanie pomiarów sygnałów GPS wykonanych na punktach sieci geodynamicznych założonych dla potrzeb badania deformacji terenu.

W latach 2006 - 2008 brałem udział jako wykonawca w projekcie KBN nr 4T12E02830 nt. „Automatyzacja procesu wyznaczania składowych odchylenia pionu z obserwacji zenitalnych gwiazd i sygnałów GPS” (II.J.3). Projekt ten dotyczył konstrukcji i testów pomiarowych urządzenia służącego do automatycznego pomiaru współrzędnych astronomicznych i dalej w połączeniu z obserwacjami satelitarnymi GPS, do wyznaczania składowych odchylenia linii pionu. Mój udział w realizacji projektu polegał na opracowaniu programu pn. SOFA\_AP, służącego do obliczania pozycji pozornych gwiazd na podstawie danych zawartych w katalogach fundamentalnych Hipparcos i Tycho1. Przy użyciu opracowanego programu, przeprowadziłem badania dotyczące wpływu zaniedbania ruchów własnych oraz prędkości radialnych gwiazd na wyznaczenie ich pozycji pozornych. Wybrane aspekty przeprowadzonych badań zaprezentowałem w postaci referatu (II.L.5) oraz artykułu (II.A.1).

W roku 2010 uczestniczyłem w realizacji opracowania dotyczącego badania przydatności telefonów komórkowych – wyposażonych w odbiornik



GPS i odpowiednie oprogramowanie – do kontroli powierzchni działek (II.M.7). W ramach badań wykonałem pomiary testowe oraz uczestniczyłem w opracowaniu statystycznym wyników pomiarów, zrealizowanym zgodnie z wytycznymi technicznymi Wspólnotowego Centrum Badawczego.

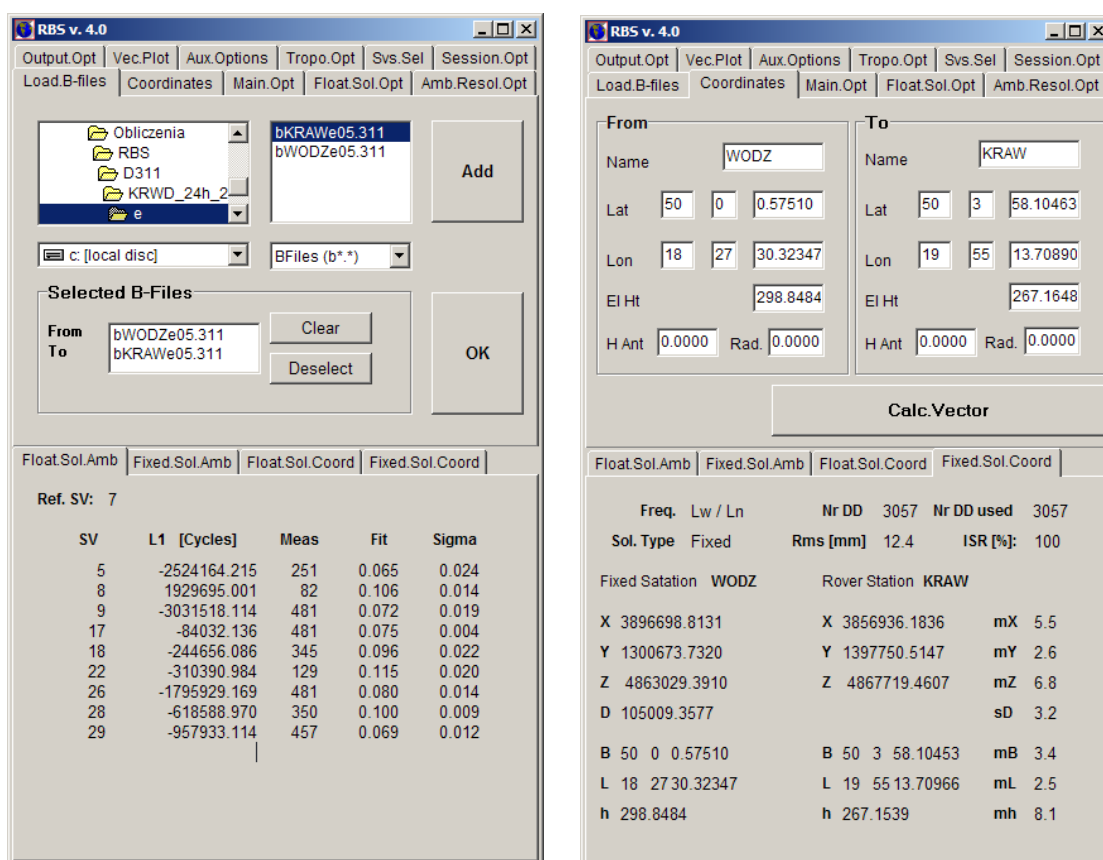
W trakcie realizacji prac badawczych, konsekwentnie dążyłem do rozwoju własnego oprogramowania, umożliwiającego swobodne prowadzenie badań w zakresie geodezji satelitarnej.

Napisane przeze mnie programy służą do opracowania obserwacji fazowych GPS zarejestrowanych na obszarze sieci stacji permanentnych w celu wyznaczania współrzędnych punktów – RBS (Rys. 3) oraz estymacji refrakcji troposferycznej i jonosferycznej – DEMER (Rys. 4). Osiągnięta funkcjonalność oprogramowania pozwoliła na przeprowadzenie doświadczeń, których wyniki zaprezentowano w artykułach (II.A.2, II.E.5, 6, 11, 15, 16), referatach (II.L.3, 4, 6-10) oraz monografii „Położenie i prędkość satelitów GNSS na podstawie uogólnionego zagadnienia dwóch stałych centrów grawitacji”.

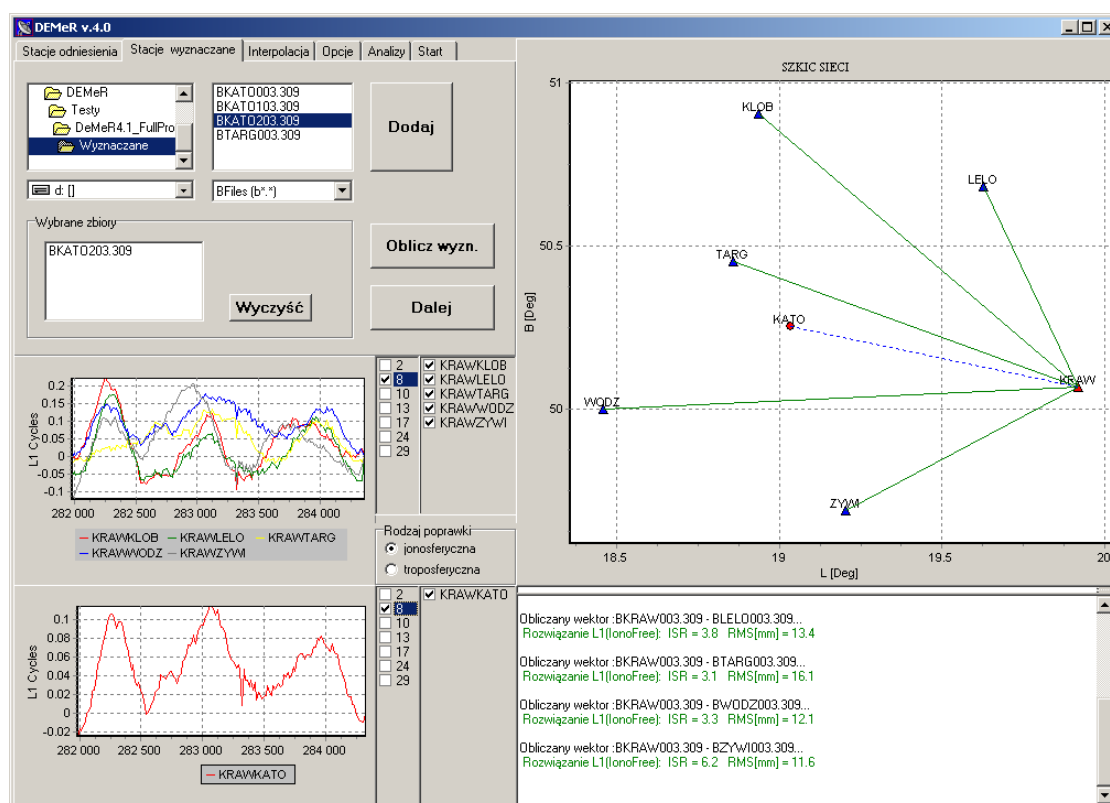
Od roku 2008 programy DEMER i RBS umożliwiają przeprowadzenie pełnego procesu obliczeniowego bez konieczności użycia programów zewnętrznych, realizując następujące etapy opracowania pomiarów GNSS:

- podstawowe operacje na zbiorach danych obserwacyjnych (format Ashtech) i efemerydalnych (formaty RINEX i SP3),
- wstępne opracowanie danych obserwacyjnych oraz detekcja utraconych cykli fazowych w pomiarach sygnałów GPS,
- transformację składowych położenia i prędkości satelitów GNSS między układami ECEF i ECI.
- obliczenie współrzędnych geocentrycznych satelitów GPS i GLONASS na podstawie efemerydy pokładowej lub precyzyjnej,
- rozwiązanie nieoznaczoności cykli fazowych przy użyciu tzw. metody poszukiwań,
- obliczenie współrzędnych wektora GPS, na podstawie opracowania pomiarów fazowych na częstotliwości  $L_1$  oraz przy użyciu kombinacji liniowych  $L_1$  i  $L_2$ .

- modelowanie wpływu refrakcji troposferycznej na pomiary fazowe GPS,
- obliczenie różnicowych poprawek refrakcyjnych (jonosferycznych i troposferycznych) na podstawie analizy obserwacji zarejestrowanych na punktach sieci stacji permanentnych,
- interpolacja różnicowych poprawek refrakcyjnych na obszarze ograniczonym siecią stacji permanentnych,
- graficzna prezentacja wyników obliczeń.



Rys. 3. Program RBS v. 4.0 – widok wybranych zakładki. (Źródło: opracowanie własne)



**Rys. 4.** Okno główne programu DEMER v. 4.0. (Źródło: opracowanie własne)

Większość eksperymentów obliczeniowych zaprezentowanych w monografii zrealizowano przy pomocy procedur służących do opracowania danych efemerydalnych, stanowiących część programu RBS.

## 6. Bibliografia

- [1] Aksenov E. P. (1969). *Mechanical interpretation of the force function in the generalized problem of two fixed centers*, Soviet Astron. – AJ, Vol. 12, No. 4, American Institute of Physics, 681-685.
- [2] Aksenov E. P. (1977). *Theory of motion artificial Earth's satellites* (in Russian), Nauka Press, Moscow, p.360.
- [3] Demin V.G. (1970). *Motion of an artificial satellite in an eccentric gravitation field*, translated and published as NASA Technical translation, TT F-579, Washington D.C. (Translation from *Dvizheniye Iskusstvennogo Sputnika v Netsentral'nom Pole Tyagoteniya*, Nauka Press, Moscow, 1968).
- [4] Escobal P. R. (1965). *Methods of orbit determination*, TRW Space Labs.
- [5] GLONASS Interface Control Document, Ed. 5.1, Moskwa, 2008 [on-line:] [http://facility.unavco.org/data/docs/ICD\\_GLONASS\\_5.1\\_\(2008\)\\_en.pdf](http://facility.unavco.org/data/docs/ICD_GLONASS_5.1_(2008)_en.pdf).

- [6] Lukyanov L. G., Emelyanov N. V., Shirmin G. I. (2005). Generalized problem of two fixed centers or the Darboux-Gredeaks problem, *Cosmic Research*, Vol. 43, No. 3, 186-191.
- [7] Seeber G. (2003). *Satellite Geodesy: Foundation, Methods & Applications*, Walter de Gruyter, Berlin - New York.
- [8] Steward M., Tsakiri M. (1998). *GLONASS Broadcast Orbit Computation*, GPS Solutions, Vol. 2, No. 2, pp. 16-27
- [9] Wnuk E. (1999). *Recent Progress in analytical orbit theories*, Advances in Space Research, Vol. 23, No 4, s. 677-687.

*Pavla Slonjan*