

dr hab. inż. Jacek Kudrys

Wydział Geodezji Górniczej  
i Inżynierii Środowiska

Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica w Krakowie

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Kwaśniaka pt.:**

**Łączne opracowanie obserwacji z różnych systemów GNSS z wykorzystaniem metody MAFA**

Rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Kwaśniaka, napisana pod opieką promotora dr hab. inż. Sławomira Cellmera, prof. UWM, obejmuje tematykę związaną z określeniem wielkości międzysystemowego opóźnienia sprzętowego w pomiarach GNSS z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody MAFA. Postawioną w pracy tezę badawczą: "rozwinięcie modelu matematycznego metody MAFA pozwoli na estymację międzysystemowego opóźnienia sprzętowego bez konieczności powiązywania tego parametru z nieoznaczonościami pomiaru fazowego", Autor weryfikuje poprzez szereg zadań badawczych, obejmujących: modyfikację i testowanie modelu matematycznego metody MAFA, wyznaczenie i porównanie wartości uzyskanego międzysystemowego opóźnienia sprzętowego z metodą LAMBDA, analizę stabilności w czasie wyznaczonego opóźnienia sprzętowego oraz ocenę wpływu sposobu estymacji międzysystemowego opóźnienia sprzętowego na wyniki wyznaczenia pozycji.

Treść recenzowanej pracy zawarta jest na 77 stronach i składa się na nią 7 ponumerowanych rozdziałów, opis źródła finansowania pracy, spis literatury, wykaz rysunków oraz tabel. Dwie ostatnie strony zawierają streszczenie w języku polskim i angielskim.

W rozdziale pierwszym Autor krótko wprowadza w tematykę rozprawy, podaje cel badawczy oraz tezę rozprawy.

Rozdział drugi stanowi omówienie funkcjonujących obecnie systemów nawigacji satelitarnej, zarówno globalnych (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou) jak i regionalnych (QZSS, IRNSS). Autor, na podstawie dostępnej literatury, charakteryzuje budowę segmentu kosmicznego i kontrolnego poszczególnych systemów nawigacyjnych. Podaje wykorzystywane częstotliwości sygnałów, stosowane układy odniesienia i skale czasu.

Rozdział trzeci, zatytułowany "Opracowanie obserwacji satelitarnych oraz błędy w pomiarach GNSS" jest zaczerpniętym z literatury opisem podstawowych obserwacji satelitarnych GNSS. W rozdziale tym Autor podaje równania obserwacji kodowych i fazowych, a także równania pojedynczych różnic między dwoma odbiornikami oraz podwójnych różnic obserwacji. Podaje także główne zalety stosowania różnic obserwacji. W dalszej części omawia błędy obserwacyjne w pomiarach GNSS, koncentrując się na wpływie troposfery i jonosfery, błędach zegarów i orbit satelitów, centrum fazowym anten oraz systemach odniesienia i skalach czasu wykorzystywanych w różnych systemach GNSS. Kolejną kwestią poruszaną w tym rozdziale

jest sposób wyznaczania początkowej nieoznaczoności fazy. Autor podaje tutaj szczegółowy opis matematyczny metody LAMBDA (Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment) oraz metody MAFA (Modified Ambiguity Function Approach) wyznaczania nieoznaczoności fazy. Obie z tych metod wykorzystywane są w zasadniczej części rozprawy.

Problem estymacji międzysystemowych opóźnień sprzętowych (ISB), ściśle związany z tezą badawczą rozprawy, Autor opisuje w rozdziale czwartym. Rozróżnia tutaj sposób różnicowania obserwacji pochodzących z różnych systemów nawigacji satelitarnej na "różnicowanie luźne" i "różnicowanie ścisłe", które stosuje się odpowiednio przy opracowywaniu obserwacji na różnych lub jednakowych częstotliwościach nośnych. W przypadku różnicowania obserwacji sygnałów z różnych systemów GNSS nadawanych na takiej samej częstotliwości pojawia się dodatkowy składnik wpływający na dokładność pomiaru odległości satelita-odbiornik - opóźnienie międzysystemowe - spowodowane odmiennym przetwarzaniem sygnałów w odbiorniku w zależności od systemu GNSS. Na przykładzie systemów GPS i Galileo Autor przedstawia sposób "różnicowania ścisłego" dla obserwacji fazowych i podaje równanie podwójnych różnic obserwacji dla takiego przypadku opracowania danych. W równaniu tym pozostaje nie wyeliminowany wyraz odpowiadający za różnicowe opóźnienie międzysystemowe, który jest analizowany w dalszej części pracy. Przedstawiając macierz modelową metody najmniejszych kwadratów wyznaczoną dla równania podwójnych różnic stwierdza, że nie jest możliwe jednoczesne wyznaczenie ISB oraz nieoznaczoności fazowych satelitów Galileo względem referencyjnego satelity GPS, ze względu na zależność liniową między tymi wielkościami. Defekt macierzy może być jednak wyeliminowany przez zmianę parametryzacji nieoznaczoności dla systemu Galileo i wprowadzenie dodatkowej niewiadomej - nieoznaczoności różnicowej między satelitami referencyjnymi Galileo a GPS. Korzyścią z takiego podejścia jest zwiększanie się liczby obserwacji nadliczbowych wraz ze wzrostem liczby obserwowanych satelitów (powyżej 2 epok pomiarowych) systemu Galileo w stosunku do metody "różnicowania luźnego".

W dalszej kolejności, Autor omawia zagadnienie opóźnienia sprzętowego w metodzie MAFA, podając zmodyfikowane równanie metody, jego zlinearyzowaną postać oraz zależność na podstawie której estymowane są wartości niewiadomych - w tym przypadku różnicowych współrzędnych oraz opóźnienia sprzętowego. W porównaniu do poprzednich rozważań i metody LAMBDA, Autor podaje, że stosując metodę MAFA możliwe jest wyznaczenie niewiadomych już w jednej epoce pomiarowej, a parametr ISB wyznaczany jest bezpośrednio, bez konieczności obliczania nieoznaczoności różnicowej pomiędzy systemami. Kolejną przewagą metody MAFA nad metodami gdzie wprost wyznaczana jest początkowa nieoznaczoność fazy (np. metodą LAMBDA) jest mniejsza liczba wyznaczanych parametrów, co przekłada się na mniejszą złożoność obliczeniową i przyspieszenie obliczeń. (nie testowane w pracy).

W rozdziale piątym, mgr inż. Dawid Kwaśniak przedstawił procedurę i wyniki weryfikacji tezy badawczej na przykładzie obserwacji statycznych. Do weryfikacji wykorzystał dane obserwacyjne z 20 (22?) stacji permanentnych GNSS pogrupowanych w pary, tak, aby odległości między odbiornikami "nie były znaczące" (nie podaje tych odległości). Taki dobór lokalizacji stacji, wynikał z przyjętego w procesie estymacji opóźnienia sprzętowego założenia o znikomym wpływie atmosfery na wyniki pomiarów. Ponadto, 6 stacji permanentnych zostało dobrane tak, aby tworzyć pary wyposażone w odbiorniki takiego samego producenta. Obliczenia wykonane zostały dla obserwacji z systemów GPS i Galileo wykonanych z interwałem 30 s. Do obliczeń Autor wykorzystał własne oprogramowanie napisane

w środowisku Matlab, które umożliwia estymację parametru ISB z wykorzystaniem metod LAMBDA i MAFA. W mojej opinii, wykorzystanie własnego oprogramowania, znacznie podnosi ocenę przeprowadzonych badań.

Obliczenia przeprowadzono dla sygnałów na częstotliwości L1/E1 (1575.42 MHz) oraz L5/E5a (1176.45 MHz), z wykorzystaniem metody LAMBDA - jako referencyjnej i MAFA. W pierwszym z przeprowadzonych testów z wykorzystaniem danych 12-godzinnych, oprócz wartości międzysystemowego opóźnienia sprzętowego, poddano analizie czas jaki jest potrzebny do uzyskania stabilnej wartości tego parametru. Uzyskane wyniki pokazały, że dla odbiorników tego samego typu lub tego samego producenta, ISB dla obu częstotliwości jest bliskie zeru. Dla niektórych par odbiorników różnych producentów parametr ISB także jest bliski wartości zero, podczas gdy dla innych par wynosi ok. 0.095 m. Podkreślić należy, że wyniki uzyskiwane z wykorzystaniem zmodyfikowanej przez Autora metody MAFA były identyczne jak w referencyjnej metodzie LAMBDA. Dla pary odbiorników na stacjach ROAG-SFER (SEP-LEI) uzyskano wartość ISB równą -0.095 m, a dla pary PTAG-PTGG (LEI-SEP) wartość z przeciwnym znakiem 0.095 m, co nie powinno dziwić zważywszy na odwrotną - ze względu na producenta - konfigurację odbiorników. Odmienna sytuacja występuje dla par SUTH-SUTM (SEP-JAV)  $ISB=0.000$  m i STJO-STJ3 (JAV-SEP)  $ISB=0.094$  m, gdzie również mamy do czynienia z podobną sytuacją, jednak wyniki są zupełnie różne. Wyjaśnienie tego faktu zostało pominięte w pracy. Z przeprowadzonego eksperymentu Autor wyciąga wnioski dotyczące czasu potrzebnego do wyznaczenia ISB - ok. 6 h, oraz identyczności wyników z obu wykorzystanych metod.

W kolejnym doświadczeniu pomiarowym, Autor badał stabilność parametru ISB w czasie oraz jego wpływ na pozycjonowanie. Tym razem wykorzystał 24-godzinne sesje obserwacyjne, a dane opracowywał w trybie post-processing RTK. Podobnie jak w poprzednim eksperymencie wykorzystane zostały systemy GPS i Galileo oraz częstotliwości L1/E1 i L5/E5a. Uzyskane wyniki świadczą o niewystępowaniu trendu estymowanych wartości ISB oraz o praktycznie stałym charakterze tego parametru w czasie (24 h). Wartości wyznaczonych opóźnień dla poszczególnych par odbiorników były z dokładnością kilku milimetrów takie same jak w poprzednim eksperymencie. Obliczenia przeprowadzone dla danych pochodzących z 7 dni pomiarowych w przedziale 8 miesięcy pozwalają Autorowi stwierdzić, że wartość parametru ISB dla konkretnej pary odbiorników jest stała w czasie. Wątpliwość budzi jednak sposób doboru dni obserwacyjnych, gdzie tylko dla trzech par odbiorników można było uzyskać komplet danych pomiarowych. Także brak choćby statystycznego opisu niepoprawnych - odrzuconych rozwiązań należy uznać za mankament pracy.

W następnym eksperymencie obliczeniowym Autor wykorzystał wyznaczone wcześniej wartości parametru ISB do określenia wpływu międzysystemowego opóźnienia sprzętowego na wyznaczaną pozycję. Autor przeprowadził obliczenia w trzech wariantach: bez estymacji i uwzględniania ISB, uwzględniając ISB jako parametr stały oraz wyznaczając ISB wraz ze współzrędnymi punktów. Podsumowując wyniki Autor słusznie zauważa, że dla par odbiorników gdzie opóźnienie międzysystemowe wynosi zero, niezależnie czy są to odbiorniki tego samego czy różnych producentów, nie ma znaczenia czy parametr ISB jest estymowany, traktowany jako stała czy nie uwzględniany - wyniki są identyczne. W przypadku estymowanych wartości ISB pogarsza się jedynie procent poprawnych rozwiązań. Z kolei dla odbiorników wykazujących opóźnienie sprzętowe, nie uwzględnienie ISB w obliczeniach praktycznie uniemożliwia prawidłowe rozwiązanie.

Od strony redakcyjnej, wyraźnie zauważalny jest niestety brak staranności przy redagowaniu pracy. Autor używa kolokwializmów typu "system nadaje obserwacje" (str. 17) czy "fazę" (str. 19), myli tryb autonomiczny z PPP (str. 20), czy twierdzi, że jonosfera "składa się z neutralnie naładowanych elektronów" (str. 22). Opisując eksperymenty obliczeniowe, raz pisze o 20 odbiornikach (10 par) testowanych odbiorników (str. 44), a innym razem podaje ich 22 (11 par - tabela 7, str. 45). Opisując eksperyment obliczeniowy nie podaje powodów ani kryteriów wyboru do testów w 12-godzinnych sesjach statycznych tylko sześciu z dziesięciu par odbiorników. Na stronie 53 pojawia się informacja o dodatkowych pięciu parach odbiorników o których nic nie wiadomo i nie ma dla nich podanych wyników. Niektóre inne zauważone błędy redakcyjne: błędny wzór 4.3, zapis operacji mnożenia we wzorach 4.12 i 4.13, treść tabeli nr 13 jest identyczna jak tab. 12.

Według recenzenta, modyfikacja matematycznego modelu metody MAFA i jego kompleksowa weryfikacja przeprowadzona przez mgr inż. Dawida Kwaśniaka pokazują, że potrafi On samodzielnie prowadzić badania naukowe. Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera niewątpliwie oryginalne aspekty użytkowe związane z wyznaczaniem międzysystemowego opóźnienia sprzętowego w odbiornikach GNSS. Mimo uwag krytycznych dotyczących redakcji pracy, wątpliwości nie budzi wykazana w pracy ogólna wiedza teoretyczna Autora w dyscyplinie inżynieria lądowa i transport.

Biorąc powyższe pod uwagę wyrażam pozytywną opinię o przedstawionej do recenzji rozprawie doktorskiej mgr inż. Dawida Kwaśniaka i stwierdzam, że spełnia ona ustawowe (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Art. 187.) warunki stawiane rozprawie doktorskiej.



Jacek Kudryś