

Warszawa, 6 grudnia 2019 r.

dr hab. inż. Anna Kłos, prof. WAT
Instytut Inżynierii Geoprzestrzennej i Geodezji
Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. S. Kaliskiego 2
00-908 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adriana Kaczmarka
pt. „Detekcja sygnałów geofizycznych w szeregach czasowych
współrzędnych stacji permanentnych GNSS”

Recenzja została przygotowana na prośbę Przewodniczącego Rady Dyscypliny *Inżynieria Lądowa i Transport* Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Pana dra hab. inż. Krzysztofa Sośnicy, prof. UPWr, pismo nr IDDD0000.4000.145.2019 z dnia 28 października 2019 r.

1. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Ocena zdolności współczesnych geodezyjnych technik satelitarnych do rejestrowania zmian zachodzących w szeroko pojętym systemie Ziemia jest niezwykle ważna w kontekście realizacji kinematycznych układów odniesienia oraz integracji poszczególnych technik ze sobą. Ze względu na imponującą liczbę stacji permanentnych – ponad 18 000 stacji na całym świecie, oraz długość obserwacji wynoszącą w tej chwili prawie 25 lat, szeregi czasowe przemieszczeń stacji GNSS są coraz chętniej wykorzystywane do licznych analiz i interpretacji geodynamicznych. Wyróżnić tu należy analizy pod kątem tektonicznym, interpretacje wynurzeń postglacjalnych, analizy zmian hydrosferycznych, czy ocenę rozszerzalności termicznej gruntu. Powyższe zastosowania sprawiają, że wskazanie zjawisk geofizycznych, na które obserwacje GNSS są czułe, oraz zdolności do ich rejestrowania – w sensie magnitudy zjawisk geofizycznych, którą system GNSS jest w stanie wychwycić, jest niezwykle istotne. Jednocześnie zadanie to jest trudne, ponieważ stacje permanentne systemu GNSS rejestrują zjawiska wielkoskalowe oraz regionalne w tym samym czasie.

Wyznaczenie zdolności systemu GNSS do rejestrowania poszczególnych zjawisk geofizycznych jest przeprowadzane wykorzystując szeregi czasowe przemieszczeń stacji. Dla szeregów tych wykonuje się klasyczną analizę szeregów czasowych, wyznaczając parametry charakteryzujące poszczególne szeregi, jak trend, amplitudy składowych sezonowych oraz charakter części stochastycznej, inaczej nazywany szumem. Następnie parametry te porównuje się z parametrami wyznaczonymi dla modeli geofizycznych czy dla innych obserwacji geodezyjnych, dedykowanych np. wyznaczeniu zmian hydrosfery lądowej, jak misja satelitarna GRACE. Takie porównania pozwalają ocenić skalę, w jakiej system GNSS jest w stanie zarejestrować poszczególne efekty. Poza porównaniem parametrów szeregów czasowych, można również posłużyć się wartością średniej kwadratowej wyznaczoną dla szeregów czasowych przemieszczeń stacji GNSS i tych samych, ale po odjęciu od nich efektów środowiskowych. Wykorzystując te dwie wielkości, wyznacza się redukcję wartości średniej kwadratowej i na tej podstawie ocenia efektywność danego modelu obciążeń środowiskowych.

W związku z powyższym, rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Kaczmarka opisuje istotne i aktualne zagadnienie detekcji sygnałów geofizycznych przez stacje permanentne systemu GNSS. Wpisuje się też w międzynarodowe trendy dotyczące wyznaczenia zdolności poszczególnych technik geodezyjnych do rejestrowania efektów geofizycznych, bądź, patrząc z innej perspektywy, wykorzystania tychże do weryfikacji modeli geofizycznych.

Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Kaczmarka stanowi cykl trzech spójnych tematycznie artykułów opublikowanych w latach 2018-2019, będących efektem pięcioletnich badań Doktoranta. Rozprawę doktorską, poza oryginalnymi treściami ww. publikacji, stanowi przewodnik zawierający streszczenia w języku polskim i angielskim, wprowadzenie, opis zakresu i celu pracy doktorskiej, charakterystykę metodologii, streszczenia treści publikacji, wnioski końcowe oraz plan dalszych badań. Literatura zawiera 26 pozycji. Autor wykorzystuje szeregi czasowe stacji permanentnych GNSS oraz modele elastycznych odkształceń skorupy ziemskiej wynikające z jej obciążenia niepływowym efektem atmosferycznym, niepływowym efektem oceanicznym oraz hydrosferą lądową. Doktorant wykorzystał analizę falkową z falką Morleta, indeks widma zależności potęgowych, oraz autorską iteracyjną metodę najmniejszych kwadratów do wykrycia sygnałów okresowych w szeregach czasowych przemieszczeń stacji GNSS i modelach obciążeń skorupy ziemskiej. Autor wykorzystał również funkcję korelacji i koherencji w celu porównania obu zbiorów danych ze sobą.

Publikacja 1 wydana została w roku 2018 w czasopiśmie *Acta Geodynamica et Geomaterialia* (IF=0.886, część A listy MNiSW, 20 pkt.). W publikacji sformułowano problem wyznaczenia i porównania składowych sezonowych obecnych w szeregach czasowych przemieszczeń stacji GNSS oraz modelowych szeregach czasowych przemieszczeń wynikających z obciążenia skorupy ziemskiej niepływowym efektem oceanicznym, efektem hydrosfery lądowej oraz efektem atmosferycznym. Autor nie precyzuje jednak, czy chodzi o obciążenie skorupy ziemskiej wynikające z atmosferycznego efektu pływowego czy niepływowego. Autor wykorzystał szeregi czasowe przemieszczeń dla dwudziestu globalnie rozmieszczonych stacji permanentnych systemu GNSS, które zostały udostępnione przez centrum analiz CODE (Center for Orbit Determination in Europe) oraz szeregi czasowe przemieszczeń wynikające z obciążeń skorupy ziemskiej, będące wynikiem projektu Niemieckiej Wspólnoty Badawczej (DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft). Do wykonania analiz Doktorant posłużył się autorską iteracyjną metodą najmniejszych kwadratów (iLSE, iteration Least Squares Estimation), metodą szybkiej transformacji Fouriera (FFT, Fast Fourier Transform) oraz metodą analizy falkowej (CWT, Continuous Wavelet Transform), wykorzystując falkę Morleta. Posługując się powyższymi metodami, Autor potwierdza, że składowa o okresie roku ma największą amplitudę i zdecydowanie przewyższa pozostałe funkcje harmoniczne. Doktorant słusznie zauważa, że dla niektórych stacji permanentnych GNSS występuje przesunięcie w fazie pomiędzy sygnałem rocznym wyznaczonym dla przemieszczeń stacji GNSS oraz przemieszczeń modelowych wynikających z obciążenia skorupy ziemskiej efektami niepływowymi. Przesunięcie to osiąga wartości maksymalne 200 dni dla obszaru Europy. Doktorant poprawnie zwraca uwagę, że niezgodność przesunięcia fazowego krzywej rocznej może wynikać ze zbyt małej rozdzielczości modeli obciążeniowych skorupy ziemskiej, wynoszącej $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, lub niezdolności systemu GNSS do wychwycenia zmian środowiskowych ze względu na zbyt małe magnitudy zjawisk geofizycznych. Autor przeanalizował również redukcję wartości średniej kwadratowej po odjęciu sumy modeli geofizycznych od szeregów czasowych przemieszczeń stacji GNSS oraz współczynniki korelacji pomiędzy dwoma zbiorami danych. Podsumował, że redukcja wartości średniej kwadratowej jest najmniejsza dla stacji, dla których występuje duża różnica przesunięć fazowych dla sygnału rocznego. Stacje te są również charakteryzowane przez wyjątkowo niski współczynnik korelacji.

Udział Doktoranta w niniejszym artykule wynosi 80%. Był on odpowiedzialny za dobór danych, ich przygotowanie, rozwiązanie problemu badawczego, implementację algorytmów, a także napisanie tekstu publikacji.

Publikacja 2 wydana została w 2018 roku w czasopiśmie *Remote Sensing* (IF=3.406, część A listy MNiSW, 35 pkt.). W niniejszej publikacji Doktorant poświęca uwagę zagadnieniu wyznaczenia indeksu widma dla rezyduów szeregów czasowych przemieszczeń czternastu stacji GNSS. Za rezydua rozumie się tutaj oryginalny szereg czasowy przemieszczeń pozbawiony jego części deterministycznej – a ściślej ujmując składowych sezonowych modelowanych za pomocą metody najmniejszych kwadratów oraz ciągłej transformacji falkowej z falką Morleta. Autor wykorzystał skale pomiędzy 1 a 296 do wyznaczenia sygnałów sezonowych obecnych w oryginalnych szeregach czasowych

przemieszczeń stacji GNSS. Następnie wyznaczone sygnały sezonowe poddano szybkiej transformacji Fouriera w celu wyznaczenia ich okresów. Z rysunku 5 zawartego w publikacji wynika, że moc sygnału w sezonowych pasmach częstotliwości znacząco się powiększyła porównując sygnał oryginalny oraz sygnał zrekonstruowany za pomocą ciągłej transformacji falkowej. Doktorant poprawnie wyznaczył na wykresach widmowych gęstości mocy sygnału okres roku tropikalnego (365,25 dni), okres drakoniczny i jego podwielokrotności (351,2 dnia dla systemu GPS) oraz okres Chandlera (433 dni). Rezydua szeregów czasowych przemieszczeń stacji permanentnych zostały następnie poddane analizom pod kątem wyznaczenia ich charakteru. Doktorant wykorzystał tu wykresy widmowych gęstości mocy szeregów czasowych, a następnie wpasował w nie proste, określając ich nachylenie – indeks widma zależności potęgowych. Indeks ten świadczy o braku korelacji w części stochastycznej, in. charakterze szumu białego dla wartości κ równej 0, o silnej korelacji pomiędzy poszczególnymi wartościami, tzw. szumie różowym dla wartości κ równej -1 lub zupełnie nieprzewidywalnymi ruchami stacji, tzw. błędzeniu przypadkowym dla κ równego -2. Doktorant porównał ze sobą charakterystyki części stochastycznej po usunięciu części deterministycznej metodą najmniejszych kwadratów oraz ciągłą transformacją falkową i podsumował, że indeks widma zależności potęgowych zmienia się maksymalnie o 0,2.

Udział Doktoranta w wyżej opisanym artykule wynosi 90%. Był on odpowiedzialny za przygotowanie szeregów czasowych GNSS do analiz, ich wykonanie, rozwiązanie problemu badawczego, implementację algorytmów oraz napisanie treści publikacji.

Publikacja 3 została zaakceptowana do druku w sierpniu 2019 roku (brak IF, 40 pkt. według *Komunikatu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 31 lipca 2019 r. w sprawie wykazu czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych wraz z przypisaną liczbą punktów*). W niniejszej publikacji Autor przeanalizował przestrzenne zmiany współczynników korelacji wyznaczone dla przemieszczeń skorupy ziemskiej wynikających z obciążeń środowiskowych dostępnych w węzłach siatki geodezyjnej $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Przemieszczenia te wywołane są obciążeniem niepływowym efektem oceanicznym, niepływowym efektem atmosferycznym oraz hydrosferą lądową. Współczynniki korelacji wyznaczone zostały w odniesieniu do obciążeń oszacowanych dla stacji WROC we Wrocławiu, którą Autor uznał za referencyjną. Następnie Doktorant zdefiniował anizotropię poszczególnych pól współczynników korelacji. W kolejnych krokach badań Autor skupił się na wyznaczeniu współczynników korelacji pomiędzy szeregami czasowymi przemieszczeń dla ośmiu stacji GNSS w Europie centralnej stwierdzając, że niewielkie wartości korelacji są spowodowane występowaniem efektów lokalnych na stacjach lub niewielkimi amplitudami składowej rocznej. W kolejnym kroku badań Doktorant wykorzystał funkcję koherencji do wyznaczenia podobieństwa składowych sezonowych pomiędzy stacją WROC we Wrocławiu, a innymi stacjami w Europie centralnej. Publikacja 3 jest samodzielną publikacją Doktoranta.

Doktorant dobrze zidentyfikował problem badawczy – detekcja poszczególnych sygnałów geofizycznych jest trudna ze względu na mnogość sygnałów obecnych w szeregach czasowych przemieszczeń stacji GNSS. Autor prawidłowo stwierdza, że sygnały obecne w szeregach czasowych pochodzą od efektów globalnych, jak i lokalnych. Sygnały globalne są łatwiejsze do wykrycia, ponieważ do tego celu można z powodzeniem stosować modele geofizyczne. Sygnały lokalne natomiast mają zazwyczaj małą amplitudę i często losowy charakter. Dlatego też są najtrudniejsze do zidentyfikowania. Autor słusznie podsumował, że składowa roczna jest okresem dominującym w szeregach czasowych przemieszczeń stacji permanentnych GNSS. Autor poprawnie stwierdził, że detekcja sygnału drakonicznego z szeregów czasowych przemieszczeń stacji GNSS może być utrudniona ze względu na fakt, że okres roku drakonicznego jest bardzo zbliżony do okresu roku tropikalnego, a szeregi czasowe GPS są jeszcze zbyt krótkie, aby wiarygodnie oba okresy od siebie rozdzielić. Doktorant ponadto prawidłowo zauważył, że niepływowi efekt atmosferyczny ma największy wpływ na przemieszczenia stacji w Europie centralnej, co jest zgodne z dotychczas opublikowanymi pracami.

2. Uwagi i pytania

Chciałabym, aby Doktorant podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej odpowiedział na poniższe pytania:

- 1) Zdecydowanym mankamentem przedstawionej rozprawy doktorskiej jest brak hipotezy badawczej, którą autor chciałby udowodnić. Byłaby ona przydatna w kontekście nakierowania czytelnika na cel rozprawy. Dlaczego Doktorant nie zdecydował się na postawienie hipotezy?
- 2) Dlaczego Autor wybrał akurat falkę Morleta do przeprowadzenia analiz? Jaka jest jej przewaga nad innymi falkami? Proszę o zdefiniowanie dokładnych okresów sygnałów modelowanych przy pomocy poziomów od 1 do 296, które Doktorant wykorzystał.
- 3) Autor wybrał trzy sygnały geofizyczne: niepływowość efekt atmosferyczny, niepływowość efekt oceanicznych oraz efekt pochodzący od hydrosfery lądowej. Czy Doktorant rozważał ich wpływ osobno, czy skupił się jedynie na sumie wszystkich trzech efektów?
- 4) Autor nazywa sygnały geofizyczne sygnałami zakłócającymi. Dlaczego Doktorant użył akurat takiego określenia? Czy sygnałami zakłócającymi nie powinny być sygnały, których chcemy się z szeregów pozbyć? Tymczasem sygnały wyznaczone przez Doktoranta są sygnałami najczęściej interpretowanymi i interpretowalnymi.
- 5) Autor posługuje się w pracy doktorskiej angielskim zwrotem *Spectral Index*, podczas gdy jego tłumaczenie na polski jest dość proste i brzmi: indeks widma. Dlaczego Doktorant nie zdecydował się na przetłumaczenie powyższego zwrotu?
- 6) Autor stwierdza, że przemieszczenia skorupy ziemskiej wywołane efektami obciążeniowymi nie są efektami geodynamicznymi. Jak zatem Doktorant definiuje efekty geodynamiczne?
- 7) Doktorant nazywa elastyczne modele obciążeń skorupy ziemskiej *poprawkami do współrzędnych stacji GNSS*, podczas gdy są to rzeczywiste efekty geofizyczne. Proszę o wytłumaczenie.
- 8) W rozdziale *Metodologia* Autor poświęcił zdecydowanie za mało uwagi iteracyjnej metodzie najmniejszych kwadratów. Skoro jest to metoda autorska, Doktorant powinien podać zdecydowanie więcej szczegółów. Proszę o wyjaśnienie podczas publicznej obrony.
- 9) Publikacja 1: Doktorant wspomina, że wykorzystany przez niego efekt obciążeń hydrosferą lądową, niepływowym efektem oceanicznym oraz efektem atmosferycznym powstał poprzez połączenie modeli opisanych w Tabeli 1 artykułu. Nie jest jednak do końca jasne, czy połączenie to zostało wykonane przez Doktoranta, czy jest ono wynikiem projektu, z którego zostały pobrane dane.
- 10) Publikacja 1: Proszę o wyjaśnienie, czy Doktorant zajmował się w pracy obciążeniami pochodzącymi od atmosferycznego efektu pływowego czy niepływowego – nie zostało to sprecyzowane w publikacji.
- 11) Publikacja 1: Autor nazywa redukcję wartości średniej kwadratowej błędem (dosłownie *RMS error*), podczas gdy to nie jest błąd. Jest to miara statystyczna pozwalająca oszacować rozrzut danych.
- 12) Publikacja 2: W jaki sposób Doktorant uniknął efektu brzegowego wpasowania sygnału za pomocą transformacji falkowej?
- 13) Publikacja 2: Doktorant wykorzystał skale od 1 do 296 w celu zamodelowania sygnału sezonowego obecnego w szeregach czasowych przemieszczeń stacji GNSS. Rysunek 2, zawarty w publikacji, przedstawia oryginalny szereg czasowy oraz model deterministyczny wyznaczony ciągłą transformacją falkową. Okresy oscylacji zawarte w sygnale modelowanym określone są poprzez wykorzystanie szybkiej transformacji Fouriera i przedstawione na rysunku 5. Na rysunku tym widać jednak, że moc sygnału ulega wyraźnemu wzmocnieniu. Czy Doktorant zastanawiał się z czego może wynikać to wzmocnienie?
- 14) Czy Doktorant porównywał obciążenia skorupy ziemskiej, które wykorzystał w ramach rozprawy doktorskiej z innymi modelami udostępnianymi przez inne serwisy?

3. Wnioski końcowe

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska, składająca się z cyklu 3 publikacji powiązanych ze sobą tematycznie, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego dotyczącego wyznaczenia zdolności systemu GNSS do rejestrowania efektów geofizycznych.

Doktorant udowodnił, że potrafi prowadzić badania naukowe, a ich wyniki analizować i interpretować. Biorąc pod uwagę powyższe, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra inż. Adriana Kaczmarka pt. „Detekcja sygnałów geofizycznych w szeregach czasowych współrzędnych stacji permanentnych GNSS” odpowiada wymogom określonym w art. 13 *Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. z 2003 r. nr 65 poz. 595 z późn. zm.).

Wniosuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa i Transport Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu o dopuszczenie mgra inż. Adriana Kaczmarka do publicznej obrony przedstawionej rozprawy doktorskiej.



Anna Kłos