

ZJAWISKOWE I METROLOGICZNE ASPEKTY ANALIZY SZEREGÓW CZASOWYCH ROZWIĄZAŃ POZYCYJNYCH GPS I SZEREGÓW CZASOWYCH OBSERWACJI GRAWIMETRYCZNYCH

Autoreferat

1. Wprowadzenie

Globalny Nawigacyjny System Satelitarny (GNSS) zrewolucjonizował zarówno metody pomiarowe jak i podejście do problemów nawigacji, geodezji i fizyki atmosfery.

Zwiększeniu potencjalnych możliwości GNSS powinno towarzyszyć stałe zwracanie uwagi na metrologiczne aspekty pomiarów, które prowadzą do odpowiedzi na kilka tradycyjnych pytań:

- jak ocenić poziom dokładności otrzymanych wyników pomiarów
- jak ocenić błędy systematyczne
- jak ocenić błędy przypadkowe
- jak wybrać minimalny interwał obserwacji niezbędny do uzyskania rozwiązania z określoną dokładnością
- jakie środki techniczne (instrumenty, anteny, oprogramowanie) należy użyć do pomiaru i opracowania obserwacji
- jakie modele przyjęte a priori należy używać do opisanie błędów systematycznych i przypadkowych
- oraz jak zmniejszyć błędy pomiarowe.

Konieczność prowadzenia badań nad problemem wyznaczania współrzędnych wektorów i punktów z najwyższą osiągalną dokładnością w najkrótszym możliwym czasie obserwacji od dawna jest przedmiotem prowadzonych w różnych ośrodkach na świecie badań odnoszących się między innymi do modelowania procesów zachodzących w atmosferze lub procesów geodynamicznych w rejonach szczególnie aktywnych. Rosnące zapotrzebowanie na precyzyjne określanie pozycji wymaga prowadzenia badań krótkookresowych zmian współrzędnych wyznaczanych z obserwacji GPS. Kolokacja rozwiązań GPS wraz z danymi grawimetrycznymi oraz uwzględnieniem nie modelowanych dotychczas efektów atmosferycznych może prowadzić do rozdzielenia efektów kinematycznych i dynamicznych, głównie dla składowej wysokościowej, jak również może prowadzić do utworzenia narzędzia do lepszego modelowania obserwacji GPS.

Potrzeba modelowania efektów krótkookresowych odnosi się również do obserwacji przyspieszenia siły ciężkości, którego zmiany na punkcie mają związek ze zmianami składowej pionowej położenia punktu. Mogą być one interpretowane jako efekt okresowych ruchów pionowych stacji. Residua obserwacji grawimetrycznych na stacjach pływowych posiadają wyraźne elementy okresowe. Z poznawczego punktu widzenia mogą one być traktowane jako źródło informacji o nie modelowanych zjawiskach fizycznych i jako takie wymagają wnikliwej analizy.

Przedstawiona praca stanowi próbę oryginalnego rozszerzenia wyników badań nad zmiennością rozwiązań GPS prowadzonych w ośrodkach naukowych o dodatkowe elementy poznawcze oraz sformułowania wniosków o wymiernym znaczeniu aplikacyjnym.

Celem pracy było dokonanie jakościowej i ilościowej oceny krótkookresowych zmienności składowych wektorów wyznaczanych z obserwacji GPS oraz zbadanie możliwości stworzenia ich modelu matematycznego. Pomocnym w rozwiązaniu tego zadania było określenie przyczyn zmienności rozwiązań GPS oraz residuów przyspieszenia siły ciężkości z podziałem na nie modelowane zjawiska o charakterze fizycznym i aspekty metrologiczne wynikające ze specyfiki systemu pomiarowo-obliczeniowego. Badania przeprowadzone w ramach pracy w oparciu o reprezentatywny zbiór szeregów czasowych precyzyjnych rozwiązań GPS dla wektorów o różnych długościach, uzyskanych przy użyciu programów komercyjnych oraz programu Bernese, a także szeregów czasowych obserwacji przyspieszenia siły ciężkości wykonanych na różnych stacjach przy użyciu różnej klasy grawimetrów koncentrowały się na

- analizie oceny jakości wyników pomiarów GPS i przyspieszenia siły ciężkości,
- określeniu metod optymalnego opracowania i wykorzystania szeregów czasowych rozwiązań GPS i przyspieszenia siły ciężkości w aspekcie modelowania zmienności w tych szeregach oraz oceny charakterystyki metrologicznej wyników pomiarów,
- tworzeniu empirycznych modeli zmienności w rozważanych szeregach czasowych oraz ich interpretacji fizycznej i metrologicznej.

W niniejszym autoreferacie zasygnalizowane są wybrane, najbardziej istotne fragmenty badań i wyników zawarty w przedstawionej pracy.

2. Szeregi czasowe i ich właściwości

2.1. Szeregi rozwiązań pozycyjnych GPS

Szeregi czasowe rozwiązań GPS nie mają dokładnie charakteru procesu losowego. Struktura tych szeregów jest w rzeczywistości bardzo złożona. Wykazano, iż na zmienności w szeregach czasowych rozwiązań GPS składają się zarówno procesy losowe jak i procesy chaotyczne oraz procesy o charakterze systematycznym. Źródłem błędów przypadkowych są zasadniczo błędy obserwacji. Niedoskonałość modeli używanych do opracowania obserwacji GPS oraz nie modelowane efekty, a także powtarzalna zmienność konfiguracji satelitów łącznie z efektem wielotorowości składają się na źródła błędów systematycznych w rozwiązaniach GPS. Dodatkowo, z uwagi na nieliniowość systemu, przypadkowe błędy obserwacyjne generują błędy systematyczne w rozwiązaniach GPS. Głównymi zaś źródłami błędów o charakterze chaotycznym są błędy w wyznaczeniu całkowitej wartości nieoznaczoności a także, pośrednio efekty gwałtownych zmian w konfiguracji satelitów.

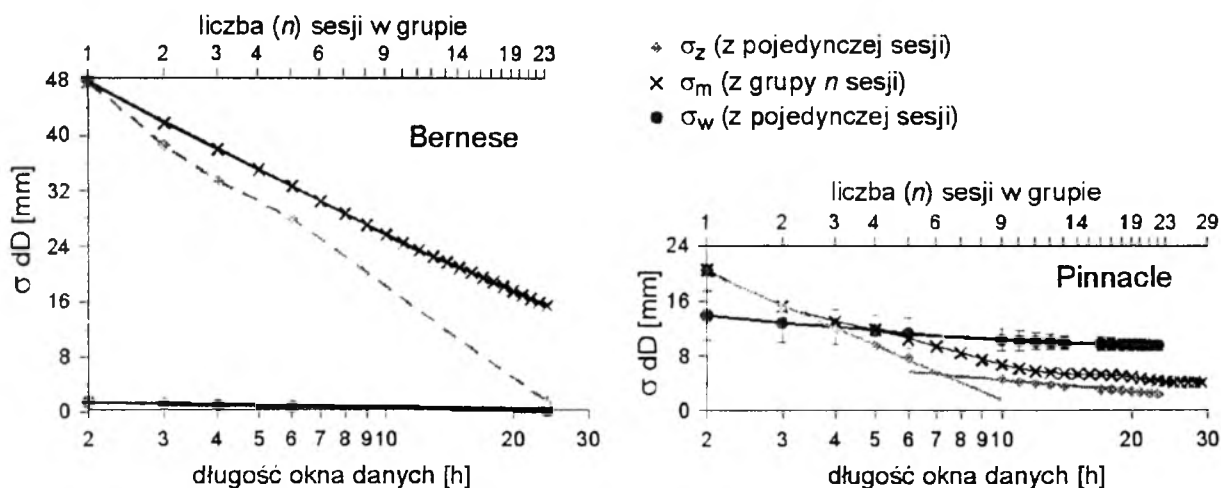
Wyniki analiz szeregów czasowych rozwiązań GPS wskazały na to, iż w zmienności szeregów zawarte są wyrazy okresowe i trendy nie modelowane w procesie opracowania obserwacji. Regularność zmienności w szeregach czasowych rozwiązań GPS, bardzo wysoka w przypadku krótkich wektorów, maleje wraz ze wzrostem długości wektorów. Przebiegi różnych składowych wektora mają tę samą charakterystykę spektralną. W szeregach o wyższej aniżeli dobowej rozdzielczości czasowej przeważająca część widma mocy tych zmian koncentruje się wokół okresów odpowiadających 12h i 24h.

Ocena dokładności rozwiązań GPS dostarczana na wyjściu programów obliczeniowych jest zazwyczaj zbyt optymistyczna. Stąd badaniu wiarygodności tej oceny poświęcono obszerną część pracy. Wiarygodność oceny dokładności rozwiązań GPS badano w oparciu o porównawczą analizę rozwiązań GPS otrzymanych z różnej długości sesji obserwacyjnych dla wektorów o różnych długościach, w różnych rejonach geograficznych. Analizowano rozrzuty rozwiązań GPS w poszczególnych szeregach czasowych, uśrednione kombinacje

tych rozwiązań, a także ich statystyki (wartości średnie m i odchylenia standardowe σ_z oraz estymatory odchylenia standardowego średniej arytmetycznej σ_m) oraz uzyskane na wyjściu programów obliczeniowych odchylenia standardowe σ_w rozwiązań GPS.

Zewnętrzna ocena dokładności rozwiązań GPS oparta jest na analizie powtarzalności rozwiązań GPS w szeregach o wysokiej rozdzielczości czasowej. Uzyskiwane z obliczeń programami przeznaczonymi do opracowywania obserwacji GPS odchylenia standardowe σ_w charakteryzują dokładność wewnętrzną systemu (łącznie z algorytmem obliczeniowym). W ocenie tej pominięte są długookresowe błędy systematyczne, toteż wypada ona zbyt optymistycznie. Wykresy na Rys. 1 umożliwiają porównanie zewnętrznej i wewnętrznej dokładności wyznaczania długości wektora BOGO-JOZE przy użyciu programów Bernese i Pinnacle.

Rozrzut w rozwiązaniach GPS otrzymanych przy użyciu programu Bernese jest większy, aniżeli w przypadku użycia programu Pinnacle. Rozbieżność w rozrzutach (różnica pomiędzy zewnętrzną i wewnętrzną oceną dokładności) jest szczególnie wyraźna w wynikach opracowania krótkich sesji obserwacyjnych. Mimo jednak tak dużych błędów, wynikających z zewnętrznej oceny dokładności wyników, odchylenia standardowe rozwiązań GPS dostarczone przez program Bernese są co najmniej o rząd wielkości mniejsze. Zarówno długość jak i składowa wysokościowa badanego wektora zostały wyznaczone z 2h sesji z dokładnością około 5 cm, podczas gdy dokładność wewnętrzną ich wyznaczeń oszacowana w programie Bernese kształtowała się na poziomie kilku milimetrów. Proporcja pomiędzy błędami wynikającymi z zewnętrznej i wewnętrznej oceny dokładności zachowuje się przy wydłużaniu sesji obserwacyjnej wykorzystywanej do obliczenia rozwiązania GPS.



Rys. 1. Błędy wyznaczenia długości wektora uzyskane z programu opracowania obserwacji GPS (σ_w) oraz oszacowane w procesie analizy statystycznej szeregów czasowych rozwiązań GPS (σ_m i σ_z)

Wpływ szumów oraz okresowych błędów systematycznych na rozwiązania GPS można zredukować poprzez uśrednianie rozwiązań w grupach, tworząc np. średnie z rozwiązań opartych na n 2h sesjach. Tego rodzaju proste uśrednianie nie wyeliminuje wszystkich tych efektów, które zostałyby usunięte poprzez opracowanie specjalistycznym programem jednej sesji, zawierającej obserwacje reprezentowane przez n 2h sesji. Zewnętrzna dokładność wynikająca z analizy grup rozwiązań jest nieco gorsza, choć zachowuje ona trend podobny do oceny opartej na pojedynczych rozwiązaniach.

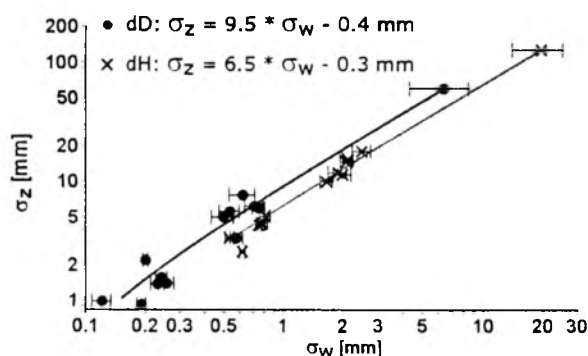
Zewnętrznie szacowana dokładność rozwiązań GPS, otrzymanych przy użyciu programu Pinnacle, wykazuje również wyraźny trend wzrostowy wraz z wydłużaniem okna

danych (sesji obserwacyjnej). Wzajemna relacja pomiędzy zewnętrznie szacowaną dokładnością a dokładnością wewnętrzną kształtuje się jednak w przypadku rozwiązań GPS uzyskanych programem Pinnacle inaczej, aniżeli dla odpowiednich rozwiązań z programu Bernese. Ocena dokładności wewnętrznej rozwiązań GPS otrzymanych z programu Pinnacle jest znacznie bardziej realistyczna od oceny dokładności wewnętrznej odpowiednich rozwiązań uzyskanych z programu Bernese. Dla obu składowych wektora, przy pewnej długości sesji obserwacyjnej, zachodzi zgodność w zewnętrznej i wewnętrznej ocenie dokładności. Dokładność wewnętrzna składowych wektora opracowywanych programem Pinnacle na podstawie dłuższych sesji obserwacyjnych jest niedoszacowana.

Uśrednione w grupach rozwiązania GPS, otrzymane przy użyciu programu Pinnacle, praktycznie pokrywają się z rozwiązaniami z pojedynczej sesji o długości odpowiadającej oknu danych w grupie.

Rozbieżności pomiędzy zewnętrznym i wewnętrznym oszacowaniem dokładności rozwiązań GPS, otrzymanych przy użyciu programu Bernese, badano na przykładach licznych wektorów łączących stacje permanentne o długościach od kilkudziesięciu do 3.9 tys. kilometrów. W oparciu o rozwiązania GPS odniesione do 3h i 24h sesji obserwacyjnych wygenerowano odpowiednie szeregi czasowe oraz poddano je analizie statystycznej. Uzyskane wyniki wskazują na wyraźną korelację pomiędzy zewnętrzną i wewnętrzną oceną dokładności rozwiązań GPS (Rys. 2).

Współczynniki skali między dokładnością wewnętrzną rozwiązań GPS uzyskanych przy użyciu programu Bernese a dokładnością zewnętrzną tych rozwiązań wynoszą odpowiednio 7 i 10 dla składowej wysokościowej i długości wektora.



Rys. 2. Korelacja pomiędzy dokładnością zewnętrzną σ_z i dokładnością wewnętrzną σ_w rozwiązań GPS otrzymanych przy użyciu programu Bernese

2.2. Szeregi obserwacji grawimetrycznych.

Koncepcja wspólnego monitorowania ruchów skorupy ziemskiej i zmian przyspieszenia siły ciężkości zakłada wyposażenie grawimetrycznych stacji pływowych w permanentnie pracujące odbiorniki GPS lub permanentnych stacji GPS w grawimetry pływowe. Zasadniczą część obserwowanego sygnału grawimetrycznego daje się opisać przy pomocy modelu pływów skorupy ziemskiej. Residualna część sygnału pozostała po odjęciu modelu pływowego od obserwacji grawimetrycznych może być rozważana jako efekt procesów o charakterze lokalnym; może ona zawierać interesującą informację geofizyczną.

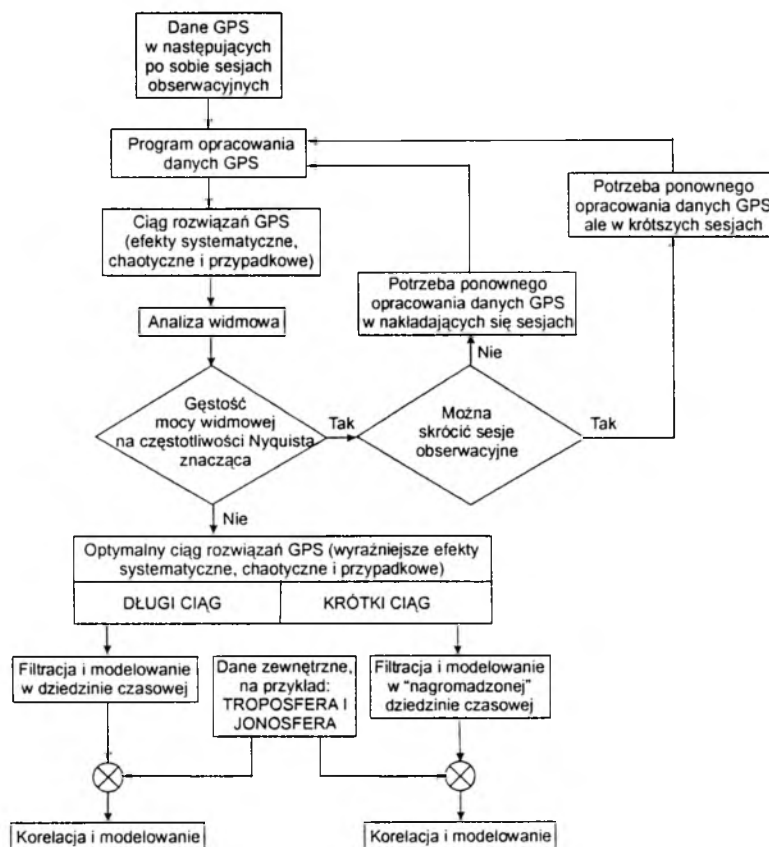
W celu interpretacji oraz określenia lokalnego charakteru zmian residuów przyspieszenia siły ciężkości przeanalizowano szeregi czasowe otrzymane z grawimetrycznych obserwacji na stacjach pływowych: Bad Homburg Castle, Black Forest Observatory, Brussels, Membach, Metsahovi, Potsdam, Strasbourg i Wettzell oraz obserwacji wykonanych przy użyciu szerokopasmowego sejsmometru STS-1 w Kijowie. W szczególności, przedmiotem badań były zaobserwowane w szeregach czasowych zmienności

o okresach od kilku godzin do jednej doby. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy wykazały, że umieszczony w pomieszczeniu termostatyzowanym grawimetr LCR-G, wyposażony w elektroniczny system rejestracji, dostarcza wysokiej jakości obserwacji przyspieszenia siły ciężkości w przedziale czasu od kilkudziesięciu minut do kilku dni. Wszystkie badane sygnały, niezależnie od instrumentu, wykazują te same cechy okresowości. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność kilkutygodniowych szeregów obserwacji grawimetrycznych do badania krótkookresowych zjawisk geodynamicznych. Analiza krótkich szeregów obserwacji przyspieszenia siły ciężkości może zatem stać się narzędziem do modelowania lokalnych zjawisk geodynamicznych i do udoskonalania modeli pływowych.

3. Metody analizy szeregów czasowych.

Badanie krótkookresowych zmian współrzędnych wektorów wyznaczonych z obserwacji GPS wymaga wygenerowania szeregów rozwiązań GPS o odpowiedniej rozdzielczości czasowej i odpowiedniej dokładności. Istotną rolę w tworzeniu takich szeregów odgrywa wybór długości sesji obserwacyjnej użytej do uzyskania rozwiązań GPS.

Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji rozdzielczości czasowej szeregów rozwiązań GPS w aspekcie detekcji konkretnych systematycznych błędów okresowych było jednym z zasadniczych zadań badawczych niniejszej pracy. Polegało ono na dobraniu odpowiedniej długości sesji obserwacyjnej gwarantującej wymaganą dokładność rozwiązania wektora oraz na zapewnieniu odpowiedniej gęstości szeregu czasowego rozwiązań poprzez ewentualne opracowywanie częściowo nakładających się sesji obserwacyjnych. Opracowaną strategię detekcji i modelowania efektów systematycznych w rozwiązaniach GPS przedstawiono schematycznie na Rys. 3.



Rys. 3. Schemat strategii detekcji i modelowania efektów systematycznych w rozwiązaniach GPS

Użycie szeregów czasowych rozwiązań GPS, opartych na nakładających się sesjach obserwacyjnych, umożliwi skuteczną detekcję efektów chaotycznych oraz oddzielenie ich od efektów o charakterze systematycznym.

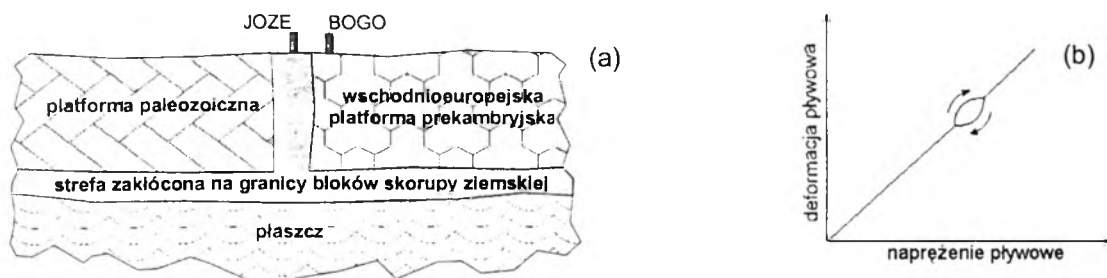
Za optymalny szereg rozwiązań GPS uważany jest szereg czasowy odpowiedni do wykrywania i modelowania systematycznych efektów okresowych w tych rozwiązaniach. Długie szeregi czasowe mogą zostać poddawane bezpośredniej filtracji w celu usunięcia z nich szumów; w dalszej kolejności można je wykorzystywać do modelowania systematycznych efektów okresowych. Bezpośredniej filtracji nie można jednak stosować do opracowywania krótkich szeregów czasowych. Aby mogły być one wykorzystane do modelowania systematycznych efektów okresowych należy dokonać ich złożenia i uśrednienia w odpowiednio wybranych interwałach czasowych, np. 24 h, co odpowiada filtracji szumów. Modele wygenerowane z odpowiednio opracowanych szeregów czasowych rozwiązań GPS mogą być w dalszej kolejności porównane, przy wykorzystaniu analizy korelacyjnej, z szeregami czasowymi danych zewnętrznych, np. parametrami troposfery lub jonosfery, w celu rozdzielenia błędów systematycznych i określenia ich źródeł.

4. Metodyczne podstawy modelowania zjawisk fizycznych przy wykorzystaniu szeregów czasowych utworzonych na bazie pomiarów geodezyjnych.

Postać modeli empirycznych użytych w niniejszej pracy określono w oparciu o wyniki analiz charakterystyki zaobserwowanych zmian w szeregach czasowych rozwiązań GPS i danych grawimetrycznych. Modele te w większości wypadków reprezentowane są przez szeregi czasowe (modele numeryczne), których parametry określone są na podstawie danych wyjściowych. Przykładowo, model zmienności dobowych rozwiązań GPS tworzony jest poprzez nałożenie na siebie dobowych interwałów rozwiązań GPS w skali czasu gwiazdowego lub słonecznego a następnie dokonanie filtracji. Tak więc dla opisanego modelu używa się następujący zestaw: 1) skala czasu, 2) parametry filtru.

Obliczone na podstawie obserwacji, wykonanych na różnych stacjach i w różnych epokach, szeregi czasowe residuów przyspieszenia siły ciężkości zawierają wyrazy o okresach od 3h do 24h i amplitudzie na poziomie kilku mikrogali i charakteryzują się wyjątkową regularnością zmienności. Za przyczynę zaobserwowanych zmienności residuów przyspieszenia siły ciężkości można uważać nieelastyczne ruchy skorupy ziemskiej towarzyszące fali pływowej. Pod wpływem fali pływowej bloki skorupy ziemskiej zostają unoszone, a następnie opadają. W rezultacie sąsiadujące ze sobą bloki skorupy ziemskiej ulegają okresowemu wzajemnemu przemieszczaniu się na granicy uskoku tektonicznych. Bloki te nie są absolutnie sztywne i ich deformacje komplikują regularny ruch powierzchniowy. Sygnał przyspieszenia siły ciężkości, odbierany na powierzchni Ziemi, odzwierciedla nie tylko efekt pływowy płaszcza Ziemi ale również ruchy w skorupie ziemskiej. Skorupę i płaszcz można uważać za oddzielne w sensie mechanicznym warstwy, rozdzielone strefą uskoku (strefa zakłóceń) (Rys. 4a).

Grawitacyjne oddziaływanie Księżyca i Słońca na Ziemię, wywołujące efekt pływowy, powoduje okresową zmienność naprężeń w warstwach litosfery, w szczególności w strefie zakłóconej. W wyniku zmienności naprężeń następują okresowe zmiany grubości tej warstwy, co znajduje odbicie w zmienności przyspieszenia siły ciężkości w punktach na powierzchni Ziemi oraz wysokości tych punktów. Jeśli własności mechaniczne skał w strefie zakłóconej odpowiadają własnościom nieliniowej mezoskopowej elastyczności, wówczas zmienność grubości warstwy nie daje się opisać przy użyciu modeli Ziemi sprężystej, powszechnie stosowanych do modelowania efektu pływowego. Nieliniowość reakcji strefy zakłóconej na oddziaływanie pływowe prowadzi do wystąpienia residualnych zmienności przyspieszenia siły ciężkości, odpowiadających właściwościom mechanicznym tej strefy.



Rys. 4. Uproszczony schemat lokalnej litosfery (a) i model reakcji Ziemi na efekt pływowy (b)

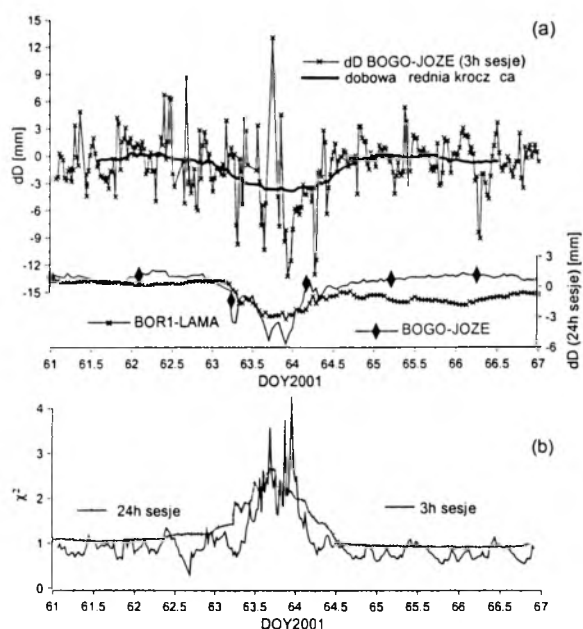
Zastosowany w niniejszej pracy model empiryczny tego zjawiska, zakłada że w strefie zakłóconej reakcja na naprężenia pływowe może być przedstawiona w postaci pętli histerezy (Rys. 4b).

Porównanie przebiegów szeregów czasowych residuów przyspieszenia siły ciężkości, wygenerowanych w oparciu o obserwacje z Black Forest Observatory i obliczonych z modelu, oraz ich widm, wskazuje na bardzo bliskie podobieństwo przebiegów odpowiednich szeregów.

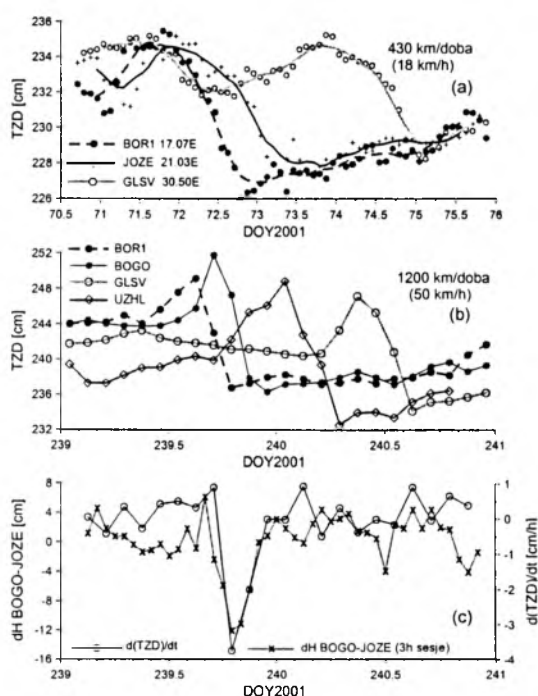
5. Praktyczne przykłady detekcji i modelowania zjawisk fizycznych z uwzględnieniem aspektów metrologicznych w oparciu o szeregi czasowe utworzone na bazie pomiarów geodezyjnych.

W wyniku interpretacji zaobserwowanych zmian w szeregach czasowych rozwiązań GPS powstają możliwości nie tylko modelowania zjawisk okresowych albo regularnych, ale również wykrywania efektów nieregularnych zjawisk, np. burz jonosferycznych i frontów troposferycznych. Do wykrywania krótkotrwałych efektów przypadkowych, lub efektów krótkookresowych, bardzo przydatne są szeregi czasowe rozwiązań GPS uzyskanych z opracowania nakładających się sesji obserwacyjnych. Taki szereg czasowy może być traktowany jako zapis procesu zmian składowych wektora z tytułu zmiennych warunków atmosferycznych. Przeprowadzone eksperymenty numeryczne dotyczyły badania reakcji układu pomiarowego na burze jonosferyczne (przykład na Rys. 5), a także na zakłócenia troposfery podczas przesuwającego się nad regionem frontu atmosferycznego (przykład na Rys. 6).

Zakłócenie spowodowane burzą jonosferyczną podobnie oddziałuje na rozwiązania GPS składowych wszystkich wektorów w rejonie zaburzeń. Przebieg szeregu rozwiązań GPS dla długości wektorów BOGO-JOZE i BOR1-LAMA w okresie burzy jonosferycznej ilustruje charakter wywołanych tym zjawiskiem zaburzeń. Zakłócenie obserwacji GPS, tak wyraźne w rozwiązaniach GPS, pokrywa się z zakłóceniem przebiegu szeregu czasowego parametru χ^2 . Względnie duże zakłócenie w rozwiązaniach GPS, jakie nastąpiło w okolicy 64 dnia 2001 roku (górne wykresy Rys. 5), praktycznie jest niezauważalne w przebiegu szeregu czasowego otrzymanego z opracowania sesji bez nakładki (zaznaczonych symbolem „♦”). Wzrost parametru χ^2 , jaki towarzyszy zwiększeniu rozrzutów rozwiązań GPS, w wyniku słabej nieliniowości systemu pomiarowego łącznie z algorytmem obliczeniowym, obarcza rozwiązania GPS błędami systematycznymi. Te błędy w długości i składowej wysokościowej wektora obliczonych w oparciu o 24h sesje obserwacji GPS kształtują się na poziomie kilku milimetrów. Takie błędy systematyczne nie obarczają rozwiązań GPS, kiedy zakłóceniom jonosfery nie towarzyszy wzrost błędów przypadkowych.



Rys. 5. Zmienność długości wektora BOGO-JOZE (a) i wewnętrzna dokładność rozwiązań (b) GPS w trakcie burzy jonosferycznej

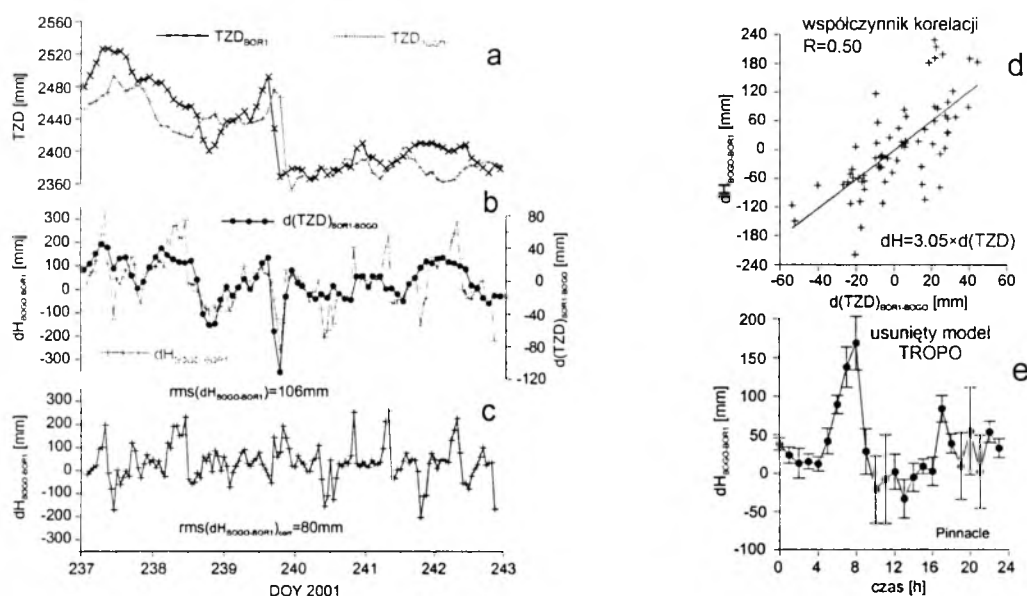


Rys. 6. Efekt frontów atmosferycznych przesuujących się z zachodu na wschód w strefie równoleżnikowej $\phi = 50^\circ$

Zmiany atmosferyczne w pasie równoleżnikowym, odpowiadającym szerokości 50° w Europie, cechują się specyficzną strukturą. Przesuwające się z zachodu na wschód fronty atmosferyczne zachowują często tę samą strukturę przez 1-2 dni na drodze 1-2 tysięcy kilometrów. Przebieg TZD w czasie dla szeregu stacji w tym pasie Europy Środkowej i Wschodniej, począwszy od Borowca (BOR1) aż do Kijowa (GLSV) i dla dwóch niezależnych epok 2001 roku, wyraźnie odzwierciedla przesuwanie się frontów atmosferycznych ze średnimi prędkościami odpowiednio 18 km/h i 50 km/h (Rys. 6a, 6b). Przesuwający się front

w znaczący sposób (o około 15 cm przy użyciu programu Pinnacle) zmniejszyła ocenę różnicy wysokości pomiędzy stacjami BOGO i JOZE, położonymi w odległości 42 km od siebie na tym samym prawie południku. Przebieg zmienności składowej wysokościowej wektora, wyznaczonej z opracowania 3h sesji, praktycznie pokrywa się z przebiegiem prędkości zmian TZD w czasie (Rys. 6c).

Wykazano, że uzasadnione jest poprawianie rozwiązań GPS na podstawie modelu wykorzystującego korelację między różnicami TZD i składową wysokościową wektora (przykład na Rys. 7 dla wektora BOGO-BOR1).



Rys. 7. Szeregi czasowe TZD dla stacji BOGO i BOR1 (a), przebieg różnic TZD oraz przebieg zmienności składowej wysokościowej wektora BOGO-BOR1 przed (b) i po wprowadzeniu poprawki δH (c), korelacja dH z $d(TZD)$ (d) i średni dobowy przebieg poprawionej składowej wysokościowej (e)

Wprowadzenie poprawek obliczonych na podstawie otrzymanego modelu do rozwiązań GPS powoduje zmniejszenie o 20% błędów średnich tych rozwiązań.

6. Podsumowanie wyników.

Realizacji potencjalnych możliwości systemu pomiarowego może posłużyć rozwiązanie niektórych metrologicznych aspektów pomiarów i wygenerowanie modeli empirycznych łączących rezultaty pomiarów GPS z danymi troposferycznymi, jonosferycznymi czy też grawimetrycznymi:

1. Określono metodykę bardziej realistycznej oceny dokładności rozwiązań GPS na podstawie pełniejszego wykorzystania dostępnych danych.
2. Po raz pierwszy zaobserwowano i wstępnie zbadano zjawisko słabej nieliniowości w systemie generującym rozwiązania GPS. Zwrócono uwagę, że z powodu tej nieliniowości przypadkowe błędy obserwacyjne generują błędy systematyczne w rozwiązaniach GPS.
3. W systematyczny sposób zbadano możliwości rozwiązań GPS, otrzymanych z opracowania nakładających się sesji obserwacyjnych, które mogą być traktowane jako zapis procesu zmian wyznaczonych składowych wektora wywołanych zmiennością warunków pomiarowych.

4. Określono możliwości wykorzystania empirycznych modeli zakłóceń spowodowanych zmianami atmosferycznymi dla poprawiania wyników opracowania obserwacji GPS programami komercyjnymi typu Pinnacle.
5. Określono możliwości wykorzystania empirycznych modeli w skali czasu gwiazdowego dla usunięcia zmienności składowych wektorów, dzięki czemu uzyskuje się zmniejszenie rozrzutów w szeregach czasowych rozwiązań GPS.
6. W szeregach czasowych pływowych obserwacji grawimetrycznych zaobserwowano i zbadano lokalne pływowe zmiany przyspieszenia siły ciężkości (względem teoretycznego modelu pływowego). Należy oczekiwać, że największe wartości tych zmian są na brzegach dużych płyt skorupy ziemskiej, w strefach uskokowych. Utworzono model lokalnych pływowych ruchów skorupy ziemskiej względem płaszcza.

7. Wnioski.

Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji rozdzielczości czasowej szeregów rozwiązań GPS w aspekcie detekcji konkretnych systematycznych błędów okresowych i redukcji błędów przypadkowych było jednym z zasadniczych zadań badawczych niniejszej pracy. Opracowana strategia, obok pełnienia funkcji skutecznego narzędzia badawczego, może służyć do poprawiania wyników rozwiązań GPS, uzyskiwanych, w szczególności, z opracowania krótkich sesji obserwacyjnych przy użyciu programów komercyjnych. Może ona znaleźć zastosowanie do:

- bardziej realnej oceny dokładności rozwiązań GPS
- oceny wiarygodności rozwiązań GPS
- tworzenia empirycznych modeli do poprawiania wyników rozwiązań GPS
- projektowania pomiarów GPS
- formułowania strategii opracowywania pomiarów GPS prowadzącej do zmniejszenia wpływu zmiennych w czasie błędów.

Przeprowadzone badania pokazały, że umieszczony w pomieszczeniu termostatyzowanym grawimetr LCR-G, wyposażony w elektroniczny system rejestracji, dostarcza wysokiej jakości obserwacji przyspieszenia siły ciężkości w przedziale czasu od kilkudziesięciu minut do kilku dni. Wykazano również, że sygnał uzyskany z grawimetru LCR-G już z okresu kilku tygodni zawiera informacje cenne dla analizy krótkookresowych zmian przyspieszenia siły ciężkości. Analiza krótkich szeregów obserwacji przyspieszenia siły ciężkości może zatem stać się narzędziem do doskonalania modeli pływowych. Szeregi takie wraz z szeregami rozwiązań GPS mogą znaleźć zastosowanie do modelowania lokalnych zjawisk geodynamicznych.

8. Prezentacja wyników pracy

Wyniki pracy zaprezentowano

na 5 konferencjach krajowych,

na 15 konferencjach zagranicznych (w tym 5 konferencjach w Ukrainie).

Wyniki opublikowano

w monografii (seria monograficzna IGiK), przyjętej do publikacji,

4 artykułach w czasopismach naukowych

10 artykułach w materiałach z konferencji naukowych.

Niniejsza praca powstała w ramach prac statutowych prowadzonych w Zakładzie Geodezji i Geodynamiki IGiK oraz w ramach realizacji projektów badawczych KBN (9T12E01918 i 8T12E04520), w których autor był jednym z wykonawców.