

ISBN 83-916216-7-7

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

SERIA MONOGRAFICZNA NR 8

JAN KRYŃSKI
YEVGEN M. ZANIMONSKIY

**ANALIZA ZMIENNOŚCI
W CIĄGACH ROZWIĄZAŃ GPS
I CIĄGACH OBSERWACJI
GRAWIMETRYCZNYCH**

Warszawa 2003



Rada Wydawnicza
przy Instytucie Geodezji i Kartografii
Editorial Council
at the Institute of Geodesy and Cartography

Adam Linsenbarth (przewodniczący, chairman),
Andrzej Ciołkosz (zastępca przewodniczącego, deputy chairman),
Teresa Baranowska, Stanisław Białousz (Wydział Geodezji i Kartografii PW),
Wojciech Janusz, Jan R. Olędzki (Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW),
Andrzej Sas-Uhrynowski,
Janusz Zieliński (Centrum Badań Kosmicznych),
Hanna Ciołkosz (sekretarz, secretary)

Redaktor naukowy wydawnictwa
Scientific Editor
Adam Linsenbarth

Zastępca redaktora naukowego wydawnictwa
Deputy Scientific Editor
Andrzej Ciołkosz

Zespół redakcyjny
Editorial Staff
Wojciech Janusz,
Andrzej Sas-Uhrynowski,
Edyta Jurczak

Adres Redakcji
Instytut Geodezji i Kartografii
02-679 Warszawa, ul. Modzelewskiego 27
Address of the Editorial Board:
Institute of Geodesy and Cartography
02-679 Warsaw, Modzelewskiego 27 Str.
Poland
e-mail: boi@igik.edu.pl

© Copyright by Instytut Geodezji i Kartografii

ISBN 83-916216-7-7
IGiK, Warszawa 2003 r.
Skład komputerowy i druk: IGiK

SPIS TREŚCI

Zarys treści.....	7
1. Wprowadzenie.....	9
2. Zgromadzenie materiału obserwacyjnego i wygenerowanie ciągów czasowych	19
3. Charakterystyka krótkookresowych zmian współrzędnych wektorów wyznaczonych z obserwacji GPS	23
4. Charakterystyka zmienności residuów przyspieszenia siły ciężkości ...	31
5. Metodyka tworzenia ciągów rozwiązań GPS pod kątem możliwości badania efektów krótkookresowych z uwzględnieniem wzajemnych korelacji.....	46
6. Wiarygodność oceny dokładności wyznaczania pozycji z pomiarów GPS	56
7. Rozdzielanie okresowych błędów systematycznych i empiryczne modelowanie zmienności współrzędnych wektorów	64
8. Korelacja zmienności składowych wektorów ze zmiennością różnic residuów przyspieszenia siły ciężkości	74
9. Korelacja zmienności różnic residuów przyspieszenia siły ciężkości ze zmiennością parametrów meteorologicznych	78
10. Korelacja zmienności składowych wektorów ze zmiennością stanu atmosfery	81
10.1. Uwzględnienie parametrów meteorologicznych	81
10.2. Uwzględnienie refrakcji troposferycznej	83
10.3. Uwzględnienie stanu jonosfery	95
11. Podsumowanie	100
Podziękowanie	102
Bibliografia	103
Streszczenie (w języku angielskim).....	110

JAN KRYNSKI

YEVGEN M. ZANIMONSKIY

**ANALYSIS OF VARIATIONS IN THE SERIES OF GPS
SOLUTIONS AND SERIES OF GRAVITY OBSERVATIONS**

TABLE OF CONTENTS

Abstract	7
1. Introduction	9
2. Collection of observational data and generation of time series	19
3. Characteristics of short-period variations of vector components determined from GPS data	23
4. Characteristics of variations of gravity residuals	31
5. Strategy of generating time series of GPS solutions for detecting short-period effects with considering mutual correlation	46
6. Reliability of accuracy estimation of GPS positioning	56
7. Separation of periodic biases and empirical modelling of variations of GPS-derived vector components	64
8. Correlation of variations of GPS-derived vector components with variations of gravity residua differences	74
9. Correlation of variations of gravity residua differences with variations of meteorological parameters	78
10. Correlation of variations of GPS-derived vector components with variations in the atmosphere	81
10.1. Correlation with meteorological parameters	81
10.2. Correlation with tropospheric refraction parameters.....	83
10.3. Correlation with ionospheric refraction parameters.....	95
11. Conclusions	100
Acknowledgements	102
Bibliography	103
Summary	110

Recenzent:
prof. dr hab. inż. Lubomir W. Baran

*Słowa kluczowe: rozwiązania GPS, residua przyspieszenia siły
ciężkości, ciągi czasowe, zmienności krótko-
okresowe, dokładność rozwiązań GPS, analiza
statystyczna, analiza spektralna, empiryczne
modelowanie*

ZARYS TREŚCI: Niniejsza 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 jest dokonanie jakościowej i ilościowej oceny krótkookresowych zmian składowych wektorów wyznaczanych z obserwacji GPS oraz zbadanie możliwości stworzenia ich modelu matematycznego. Modelowanie krótkookresowych zmian składowych wektorów wymaga dogłębnej analizy rozwiązań uzyskanych z krótkich serii obserwacyjnych z uwzględnieniem ewentualnej korelacji ze zmiennością residuów przyspieszenia siły ciężkości oraz dobowymi i sezonowymi zmianami stanu jonosfery i troposfery. W pracy wykorzystano ogólnodostępne obserwacje GPS wykonane na krajowych stacjach EPN: Borowa Góra, Borowiec, Józefosław, Lamkówko, a także na stacjach Bad Homburg, Dresden, Kijów, Potsdam, Uzhgorod. Analizie poddano ciągi czasowe rozwiązań dla składowych wektorów łączących stacje permanentne GPS. Wektory te zostały obliczone przy użyciu programu Bernese, a także komercyjnego programu Pinnacle, w oparciu o krótkie sesje obserwacyjne, obejmujące okresy od kilkunastu do kilkuset dni. Badane ciągi czasowe residuów przyspieszenia siły ciężkości uzyskano na podstawie obserwacji grawimetrycznych wykonanych na stacjach w Borowej Górze, Lamkówku i Józefosławiu przy użyciu wspomaganych komputerowo grawimetrów polowych LCR-G z jednoczesną automatyczną rejestracją warunków meteorologicznych. Dodatkowo w celu interpretacji oraz określenia lokalnego charakteru zmian residuów przyspieszenia siły ciężkości przeanalizowano ciągi czasowe otrzymane z grawimetrycznych obserwacji na stacjach pływowych międzynarodowego Globalnego Projektu Geodynamicznego (GGP): 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 ciągach czasowych zmienności o okresach od kilku godzin do jednej doby.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania ogólnej charakterystyki krótkookresowych zmienności w ciągach rozwiązań wektorów z obserwacji GPS oraz w ciągach czasowych uzyskanych z obserwacji grawimetrycznych. Na kolejnym etapie prace koncentrowały się nad rozwiązaniem zagadnienia optymalizacji rozdzielczości czasowej ciągów rozwiązań GPS w aspekcie detekcji konkretnych systematycznych błędów okresowych. Polegało ono na dobraniu odpowiedniej długości sesji obserwacyjnej zapewniającej wymaganą dokładność rozwiązania wektora oraz na ewentualnym częściowym nakładaniu opracowywanych sesji obserwacyjnych w celu zapewnienia odpowiedniej gęstości czasowej rozwiązań. Zadanie to zostało wykonane na podstawie analizy spektralnej wyników obliczeń przeprowadzonych przy użyciu programu Bernese dla

wybranych wektorów. W oparciu o opracowaną metodykę wygenerowano ciągi czasowe składowych wektorów pomiędzy stacjami permanentnymi GPS, które następnie posłużyły do analizowania krótkookresowych błędów systematycznych, rozdzielenia ich efektów w zależności od źródeł ich powstawania oraz do badań nad ich modelowaniem.

Oddzielny rozdział pracy poświęcono analizie wiarygodności oceny dokładności rozwiązań GPS otrzymywanych zarówno przy użyciu programu Bernese, jak i programu Pinnacle. W wyniku analizy rozwiązań GPS określono współczynniki skali między parametrami wewnętrznej i zewnętrznej oceny dokładności tych rozwiązań.

Zastosowanie ciągów czasowych rozwiązań, opartych na wykorzystaniu obserwacji z częściowo pokrywających się (zachodzących na siebie) interwałów, umożliwiło efektywne wykrywanie nagłych zmian wartości współrzędnych wektorów obliczonych z obserwacji GPS. Szczegółnej analizie poddano wpływ atmosfery na zmienność rozwiązań GPS. Dla okresów odpowiadających przedziałom czasowym badanych rozwiązań GPS utworzono ciągi czasowe przebiegów zmienności całkowitej zawartości elektronów (TEC) w jonosferze, troposferycznego opóźnienia zenitalnego (TZD) oraz parametrów meteorologicznych, takich jak temperatura, ciśnienie i wilgotność, a także parametr aktywności słonecznej. Przeprowadzono analizę zależności korelacyjnych między krótkookresowymi zmianami wartości współrzędnych wektora i zmianami TEC (ze szczególnym uwzględnieniem burz magnetycznych) oraz zmianami TZD (ze szczególnym uwzględnieniem frontów atmosferycznych). Wykorzystanie aparatu analizy korelacji umożliwiło wygenerowanie wielu modeli, których zastosowanie pozwala na obniżenie poziomu zakłóceń w rozwiązaniach GPS.

Przeprowadzono analizę porównawczą zmian w ciągach czasowych składowych wektorów obliczonych z obserwacji GPS oraz w ciągach czasowych różnic residuów przyspieszenia siły ciężkości na stacjach Borowa Góra, Lamkówko i Józefostaw. Poddano również pod dyskusję empiryczny model krótkookresowych zmian przyspieszenia siły ciężkości. Przedstawiono także koncepcję łącznego wykorzystania ciągów czasowych obserwacji grawimetrycznych i GPS.

Uzyskane wyniki zostały wykorzystane do fizycznej interpretacji krótkookresowych zmian wyników pomiarów składowych badanych wektorów oraz zmian residuów przyspieszenia siły ciężkości, a następnie do utworzenia ich empirycznych modeli.

1. WPROWADZENIE

Naturalne sprzężenie zachodzące między stopniem poznania (szczegółowością opisu) zjawiska fizycznego a możliwościami technicznymi pomiaru parametrów jego modelu jest stymulatorem rozwoju nauki i technologii. Rozwojowi technik obserwacyjnych, będących naturalną konsekwencją postępu technologicznego, towarzyszy wzrost precyzji pozyskiwania wielkości obserwowanych oraz, często idący z nim w parze, wzrost czasowej rozdzielczości obserwacji.

Stan przestrzeni fizycznej, w której wykonywane są obserwacje geodezyjne, służące w efekcie końcowym do wyznaczania pozycji, jest zmienny w czasie. Stopień złożoności modeli matematycznych, aproksymujących czasową zmienność stanu przestrzeni fizycznej, dobierany jest odpowiednio do rodzaju i precyzji obserwacji. Wśród przykładów udoskonalania modeli matematycznych w miarę wzrostu precyzji obserwacji można wymienić modele stosowane we współczesnych opracowaniach globalnych sieci GPS, VLBI i SLR. Wpływ nieuwzględnionych w modelu matematycznym zmian w czasie stanu przestrzeni fizycznej oraz systemu pozycjonowania, które mają charakter okresowy lub losowy, na wyniki opracowań obserwacji geodezyjnych powszechnie minimalizuje się poprzez uśrednianie obserwacji wykonywanych w odpowiednio długich interwałach czasowych.

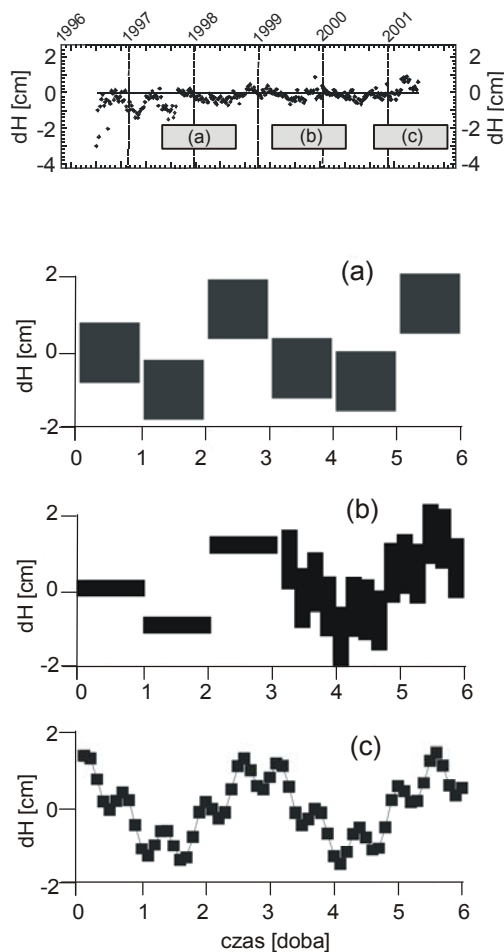
Ruch obrotowy Ziemi wokół swojej osi oddziałuje zarówno na fizykę, jak i na geometrię Ziemi oraz otaczającej ją atmosfery. Nie pozostaje on również bez wpływu na obserwacje obiektów pozaziemskich z powierzchni Ziemi. Z uwagi na okresowość ruchu obrotowego Ziemi należy zatem spodziewać się wzajemnej korelacji między okresowymi zmianami współrzędnych pozycji wyznaczanych z takich obserwacji i zmianami przyspieszenia siły ciężkości, a także zmianami stanu atmosfery. W szczególności korelacji takiej można oczekiwać w składowej wysokościowej. Zmienność w czasie, niezależnie od ruchu obrotowego Ziemi, charakteryzuje również struktura istniejących globalnych systemów pozycjonowania. Okresowy charakter zmienności w czasie systemu GPS wiąże się z powtarzalnością konfiguracji wchodzących w skład tego systemu satelitów. Powtarzalność wyników pomiarów uzyskiwanych z krótkich serii obserwacyjnych (pojedyncze godziny lub jeszcze krótsze serie) zbliża się do poziomu wynikającego z precyzji pomiarów GPS dzięki zastosowaniu odpowiednich modeli matematycznych. Zmiany w czasie przyspieszenia siły ciężkości zachodzą pod wpływem znacznej liczby zjawisk fizycznych na Ziemi oraz w jej otoczeniu, jak również zjawisk spowodowanych siłami przyciągania ciał niebieskich. Czasowe serie obserwacyjne, rejestrowane odpowiednim grawimetrem pływowym, odzwierciedlają te zmiany. Nie ulega

wątpliwości, że efekty pływowe powodują zmiany w położeniu stacji GPS. W procesie opracowywania obserwacji GPS zazwyczaj nie uwzględnia się modelu pływów skorupy ziemskiej. Przy opracowywaniu dobowych sesji obserwacyjnych błędy z tytułu nieuwzględnienia tego modelu ulegają uśrednieniu i w konsekwencji osiągają poziom przynajmniej o rząd wielkości niższy aniżeli błędy wynikające z samego systemu GPS. Stosowane dotychczas strategie opracowywania obserwacji GPS nie spełniają wymagań dokładnościowych wobec postępu technologicznego, za którym idzie wzrost rozdzielczości rozwiązań GPS w skali czasowej lub możliwość skracania sesji obserwacyjnych (rys. 1.1) używanych do precyzyjnego wyznaczania pozycji w czasie prawie rzeczywistym. Typowemu przebiegowi zmienności rozwiązań tygodniowych dla składowej wysokościowej pozycji stacji (górny wykres rys. 1.1) przeciwstawiono symbolicznie przebieg zmienności rozwiązań dobowych (szerokość blozków odpowiada długości sesji obserwacyjnej użytej do uzyskania rozwiązania) dla tej składowej (rys. 1.1a) wraz z uzyskiwanymi z obliczeń ich błędami średnimi (wysokości blozków odpowiadają wielkości błędu średniego). Doskonalenie modelowania obserwacji GPS, niezależnie od użytego odbiornika i oprogramowania, prowadzi bądź do zmniejszenia błędu wyznaczenia pozycji (rys. 1.1b – lewa strona), bądź umożliwia skrócenie sesji obserwacyjnej (rys. 1.1b – prawa strona). Skracanie sesji obserwacyjnej z jednoczesnym zmniejszeniem błędu wyznaczenia pozycji (rys. 1.1c) wymaga dalszych badań. Uzyskanie w czasie rzeczywistym pozycji z milimetrową dokładnością (Hoffmann-Wellenhof i Remondi, 1985) stanowi ciągle wyzwanie dla środowiska naukowego.

Rosnące zapotrzebowanie na precyzyjne określanie pozycji w czasie prawie rzeczywistym wymaga prowadzenia badań krótkookresowych zmian współrzędnych wyznaczanych z obserwacji GPS (Cisak et al., 1999; Kryński i Cisak, 2000). Kolokacja rozwiązań GPS wraz z danymi grawimetrycznymi oraz uwzględnieniem niemodelowanych efektów atmosferycznych może prowadzić do rozdzielenia efektów kinematycznych i dynamicznych, głównie dla składowej wysokościowej, a także do stworzenia narzędzia do lepszego modelowania obserwacji GPS.

Osiągnięcie dokładności pomiaru odpowiadającej precyzji systemu pomiarowego (np. GPS, grawimetr absolutny) wymaga obecnie opracowywania wielodobowych sesji obserwacyjnych. W interesie podniesienia efektywności i znaczącego obniżenia kosztów pomiarów geodezyjnych leży skrócenie czasu obserwacji z jednoczesnym zachowaniem wysokiej dokładności wyznaczanych wielkości. Wiąże się to z koniecznością doskonalenia modelu matematycznego. W szczególności dotyczy to rozszerzenia istniejącego modelu o wyrazy krótkookresowe. Celowość prowadzenia badań nad problemem wyznaczania pozycji z najwyższą dokładnością w możliwie krótkim czasie sygnalizowana była uprzednio w literaturze, np. (Pesec, 1999). Leży ona u podstaw prowadzonych w ośrodkach geodezyjnych na świecie prac badawczych, które dotyczą

modelowania jonosfery (Baran et al., 1997; Baran i Shagimuratov, 1998), meteorologii (van der Marel i Pesec, 1999), monitorowania ruchów skorupy ziemskiej w rejonach o szczególnej aktywności geodynamicznej etc.

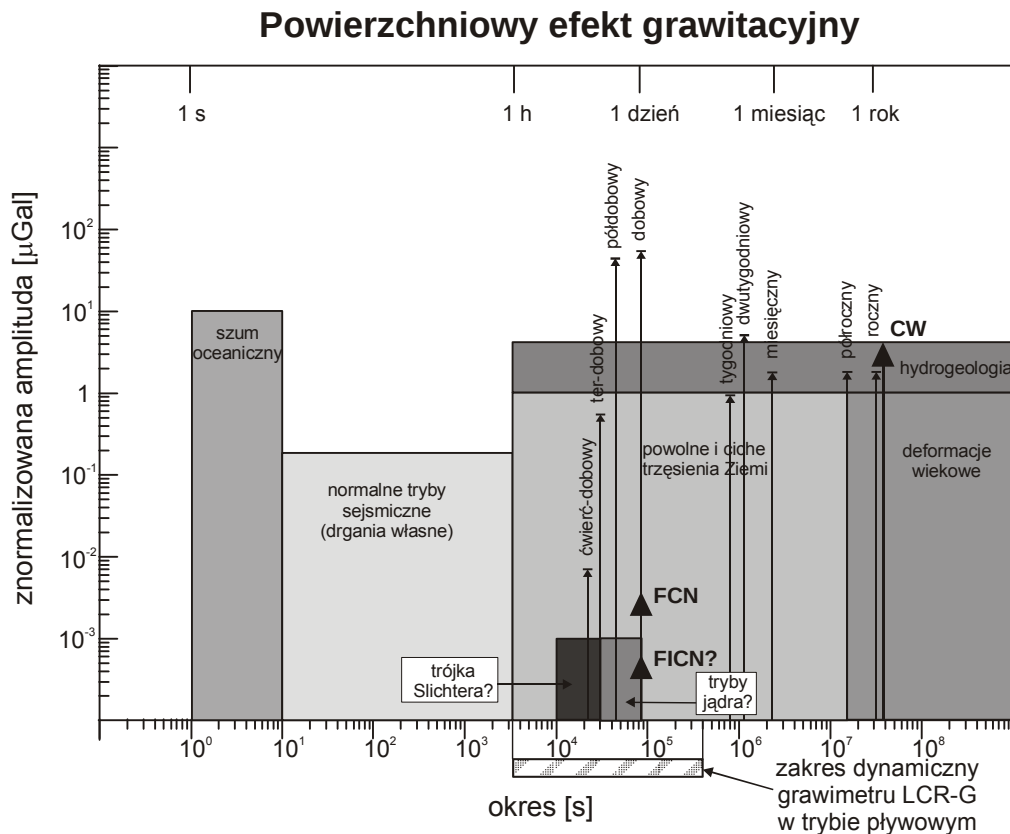


Rys. 1.1. Rozdzielczość czasowa i dokładność rozwiązań GPS
(Krynski i Zanimonskiy, 2001c)

Potrzeba modelowania efektów krótkookresowych odnosi się również do ciągów czasowych obserwacji przyspieszenia siły ciężkości, którego zmiany na punkcie mają związek ze zmianami składowej pionowej położenia punktu. Zmiany przyspieszenia siły ciężkości są od dziesiątków lat rejestrowane, za pomocą grawimetrów pływowych, na stacjach należących do światowej sieci zorganizowanej w ramach Międzynarodowej Służby Pływów Ziemi, działającej pod patronatem Międzynarodowej Asocjacji Geodezji.

Zmiany residuów przyspieszenia siły ciężkości zawierają składowe okresowe o okresach od 3 h do 24 h i osiągają poziom kilku mikrogali. Mogą być one interpretowane jako efekt okresowych ruchów pionowych stacji.

Niezbędnymi cechami grawimetru stosowanego do klasycznych obserwacji pływowych jest mały dryft i stabilność czułości w interwałach czasowych od 5 miesięcy do roku. Przyrządami najlepiej spełniającymi te wymagania i jednocześnie zapewniającymi obecnie najwyższą precyzję są grawimetry nadprzewodzące. Tego typu instrumenty rejestrują przyspieszenie siły ciężkości na 17 stacjach Globalnej Sieci Grawimetrycznej w ramach Globalnego Projektu Geodynamicznego. Na kilku punktach pomiary tymi grawimetrami wykonywane są już od kilku lat. Próbkowanie co jedną sekundę daje możliwość otrzymania precyzyjnych danych w bardzo szerokim przedziale okresów, tj. od 2 sekund do 3 lat (Hinderer, 1997) (rys. 1.2).



Rys. 1.2. Zakres dynamiczny grawimetru LCR-G w trybie pływowym w odniesieniu do powierzchniowych efektów grawitacyjnych (Hinderer, 1997)

Rolę grawimetru pływowego może odegrać grawimetr polowy klasy LCR-G, przystosowany do zapisu rejestrowanego z odpowiednim krokiem obserwowanego sygnału (Krynski i Zanimonskiy, 2000). Na rysunku 1.2 zaznaczono zakres dynamiczny grawimetru LCR-G w trybie pływowym w odniesieniu do powierzchniowych efektów grawitacyjnych.

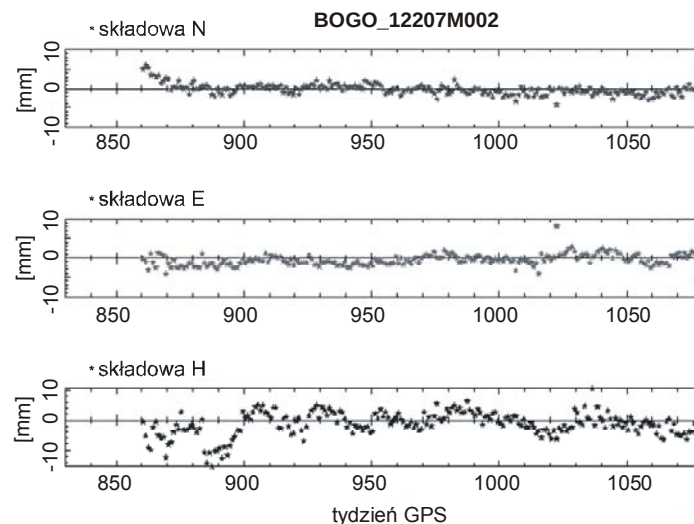
Residua obserwacji grawimetrycznych na stacjach pływowych (wielkości obserwowane, od których odjęto wielkości obliczone z regionalnego modelu pływów ziemskich) posiadają wyraźne elementy okresowe. Długookresowe zmiany w residuach przyspieszenia siły ciężkości od dawna są przedmiotem intensywnych badań (El Wahabi et al., 1997). Obecność zmian krótkookresowych w residuach przyspieszenia siły ciężkości, tj. zmian o okresach dobowym, półdobowym i krótszych (w szczególności tzw. trójka Slichtera¹, rys. 1.2, odnosząca się do efektów globalnych związanych z procesami zachodzącymi w jądrze Ziemi), była już sygnalizowana w literaturze (np. Crossley et al., 1999). Efekty te, z uwagi na ich okresowość, w dużej mierze eliminowane są z absolutnych pomiarów przyspieszenia siły ciężkości, dokonywanych aparatem balistycznym, poprzez uśrednianie na długich interwałach czasowych. Z poznawczego punktu widzenia mogą one jednak być traktowane jako źródło informacji o niemodelowanych zjawiskach fizycznych i jako takie wymagają wnikliwej analizy.

Wyznaczanie z centymetrową dokładnością absolutnej pozycji punktów z pomiarów GPS wymaga długotrwałych kampanii obserwacyjnych na rozległej sieci punktów pomiarowych, a następnie żmudnego i pracochłonnego opracowania obserwacji. Wraz ze wzrostem długości sesji obserwacyjnej zwiększa się liczba stopni swobody, a tym samym maleje błąd rozwiązania. Błąd ten dodatkowo ulega zmniejszeniu dzięki wykorzystaniu do obliczenia pozycji punktu obserwacji wykonanych na innych stacjach sieci. W praktyce precyzyjnych pomiarów geodezyjnych jako najkrótsze przyjmuje się dobowe sesje obserwacyjne (rys. 1.1a). Dodatkowo często uśrednia się rozwiązania uzyskane z kilku następujących po sobie sesji dobowych. Zasada korzystania w obliczeniach z dobowych sesji obserwacji GPS przy wyznaczaniu pozycji z centymetrową dokładnością wynika nie tyle z konieczności uzyskania dużej liczby obserwacji nadliczbowych, ile z potrzeby wygładzania rozwiązania poprzez usunięcie z niego niemodelowanych błędów systematycznych o charakterze okresowym. Podobne podejście ma miejsce w przypadku precyzyjnych względnych pomiarów GPS. Rozwiązania z całkowitymi nieoznaczonościami, o wysokiej dokładności wewnętrznej, uzyskuje się dla kilkudziesięciokilometrowych wektorów co prawda już na podstawie kilkugodzinnych sesji obserwacyjnych, jednak zmienność ciągów czasowych takich rozwiązań zazwyczaj znacznie przekracza błędy

¹ Na rysunku 1.2 znaki zapytania zostały umieszczone przy trybach sejsmicznych, których istnienie nie do końca zostało empirycznie zweryfikowane.

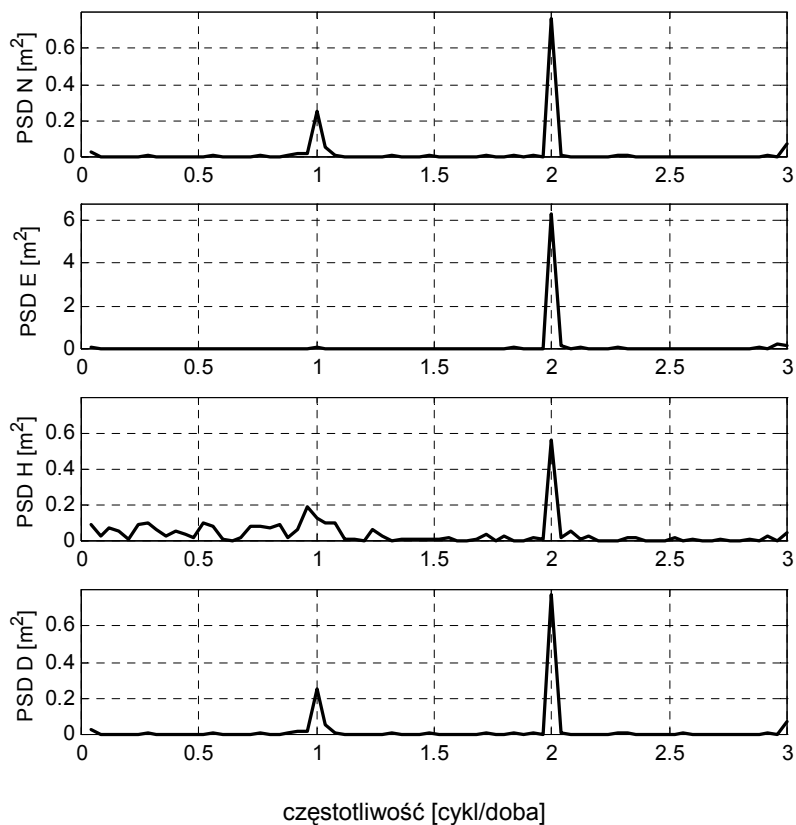
wyznaczenia wektorów z poszczególnych kilkugodzinnych sesji obserwacyjnych, oszacowane na podstawie wewnętrznej oceny dokładności.

Długookresowe zmiany współrzędnych stacji permanentnych GPS wyznaczane są regularnie dla stacji sieci IGS oraz dla stacji permanentnych EUREF (Bruyninx, 1999) na podstawie rozwiązań tygodniowych. Przykładowo, przebieg zmienności współrzędnych stacji BOGO (wg Bruyninx) przedstawiono na rysunku 1.3. Na podstawie dobowych rozwiązań badane są, w ośrodkach krajowych i centrach międzynarodowych, długookresowe zmiany w składowych wektorów łączących stacje permanentne GPS (np. Baran, 1996).



Rys. 1.3. Przebieg zmienności rozwiązań tygodniowych dla stacji BOGO

Występowanie zmian krótkookresowych, tj. zmian o okresach jednej doby i krótszych, w składowych wektorów wyznaczanych z obserwacji GPS sygnalizowane było w literaturze (np. Xu i Knudsen, 1999). Badania nad zmiennością rozwiązań wektorów wyznaczanych na podstawie krótkich sesji obserwacyjnych GPS, w oparciu o materiał obserwacyjny z krajowych stacji permanentnych GPS sieci EUREF, rozpoczęto w IGiK w 1999 roku. W uzyskanych ciągach czasowych rozwiązań wektora BOGO-JOZE, niezależnie od oprogramowania użytego do opracowania obserwacji GPS, zaobserwowano wyraźne zmiany okresowe o okresach 12 h i 24 h. Okresowość tę ilustruje przebieg gęstości widmowej mocy (PSD) dla składowych wektora BOGO-JOZE na rysunku 1.4.

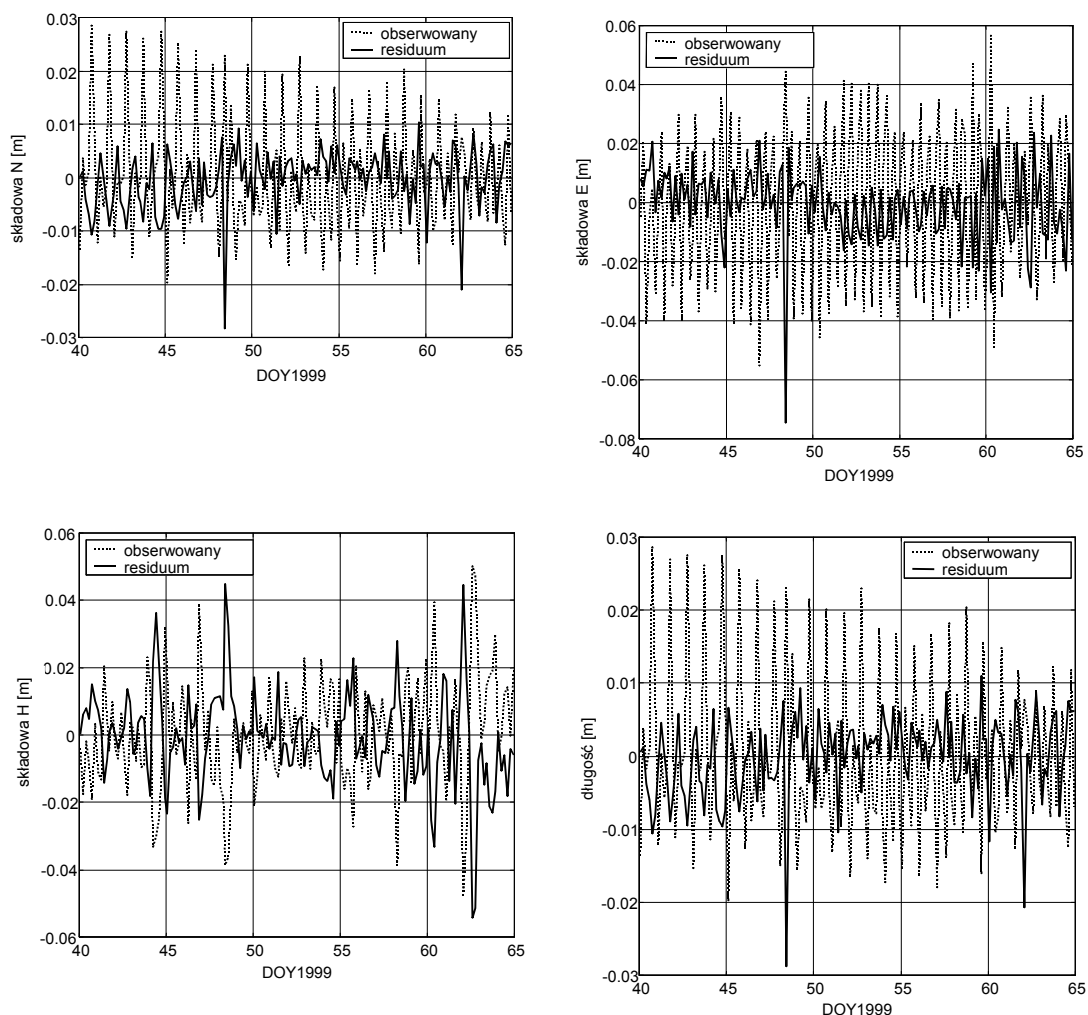


Rys. 1.4. Gęstość mocy widma (PSD) dla składowych wektora BOGO-JOZE

Sygnały reprezentowane przez ciągi czasowe składowych wektora BOGO-JOZE, uzyskane z opracowania programem GPPS 4 h sesji obserwacyjnych z okresu 25 dni, wobec wyraźnych zmienności o okresach dobowym i półdobowym, aproksymowano funkcjami harmonicznymi, złożonymi z dwóch częstotliwości: $f_1 = 1$ cykl/dobę i $f_2 = 2$ cykle/dobę

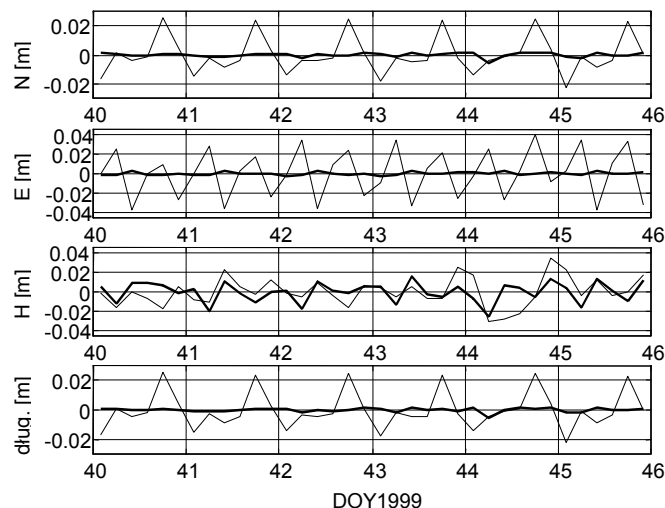
$$A_0 + A_1 \sin(2\pi f_1 t + \psi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \psi_2) .$$

Parametry A_0 , A_1 , ψ_1 , A_2 , ψ_2 tych funkcji obliczono przy użyciu metody najmniejszych kwadratów. Po odjęciu uzyskanych w ten sposób funkcji modelowych od oryginalnych sygnałów otrzymano residualne sygnały dla każdej ze składowych wektora. Przebieg residualnych sygnałów na tle oryginalnych sygnałów zmienności poszczególnych składowych wektora przedstawiono na rysunku 1.5.



Rys. 1.5. Obserwowany przebieg zmienności składowych wektora BOGO-JOZE oraz przebieg sygnałów residualnych

W składowych północnej, wschodniej, wysokościowej i długości wektora uzyskano, dla oryginalnego sygnału z opracowania programem GPPS, zmiany w przedziałach odpowiednio 5 cm, 10 cm, 10 cm i 4 cm (Cisak et al., 1999). Wyniki opracowania tego samego wektora programem Bernese charakteryzują się znacznie mniejszymi zmiennościami, a mianowicie 1 cm, 1 cm, 4 cm i 1 cm, odpowiednio w składowych północnej, wschodniej, wysokościowej i długości wektora (rys. 1.6) (Kryński i Cisak, 2000).



Rys. 1.6. Przebieg sygnałów rozwiązań GPS dla składowych wektora BOGO-JOZE otrzymanych z obliczeń programami GPPS (cienka linia) i Bernese (gruba linia)

Istnienie w ciągach czasowych rozwiązań GPS efektów okresowych o okresach 12 h i 24 h i amplitudach zgodnych z wynikami badań przeprowadzonymi w IGiK (Kryński i Cisak, 2000) znalazło potwierdzenie w badaniach wykonanych w Instytucie Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezycznej Politechniki Warszawskiej. Wykorzystując opracowane programem Bernese 1 h sesje obserwacyjne z okresu 22 dni dla 29 punktów sieci EUREF analizowano zmienność rozwiązań dla współrzędnych stacji IGS/EUREF w Józefosławiu (Bogusz et al., 2000). Uzyskano zmienności współrzędnych wynoszące 1 cm, 1 cm i 2.5 cm, odpowiednio w składowych północnej, wschodniej i wysokościowej, z wyraźnie występującą okresowością, o okresach 12 h i 24 h.

Zaobserwowane zmiany okresowe praktycznie nie mają wpływu na rozwiązania oparte na dobowych seriach obserwacyjnych, na których ulegają one uśrednieniu. Opracowanie serii obserwacyjnych krótszych od dobowych, tj. serii trwających co najwyżej kilka godzin, może powodować wprowadzenie istotnych błędów systematycznych do rozwiązań wektorów i dalej do wyznaczonych współrzędnych punktów. Powtarzalność wyników uzyskanych z obserwacji wykonanych w krótkich seriach obserwacyjnych charakteryzuje się błędem, który może znacznie przekraczać błąd wynikający z oszacowań dostarczanych przez programy służące do opracowywania obserwacji GPS. Interpretacja i modelowanie błędów systematycznych w rozwiązaniach wektorów wymaga wnikliwej analizy ciągów czasowych rozwiązań wektorów o odpowiedniej rozdzielczości czasowej i dokładności.

Niezależnym źródłem informacji, jakie mogłoby znaleźć zastosowanie w interpretacji zaobserwowanych zmian okresowych rozwiązań GPS, są ciągi czasowe obserwacji przyspieszenia siły ciężkości, którego zmiany na punkcie mają związek ze zmianami składowej wysokościowej położenia punktu. W wyniku analizy serii grawimetrycznych obserwacji pływowych wykonanych w Borowej Górze stwierdzono (Chojnicki, 1997), że amplitudy zmian residuów (wielkości obserwowane, od których odjęto wielkości obliczone z regionalnego modelu pływów ziemskich) osiągają poziom $10 \mu\text{Gal}$. Dalsze analizy ciągów obserwacji grawimetrycznych z lat 1995–1997 wykazały istnienie wyraźnych krótkookresowych zmienności residuów o okresach zgodnych z raportowanymi w literaturze (El Wahabi et al., 1997). Obserwacje grawimetryczne, prowadzone w sposób ciągły na stacjach permanentnych GPS, mogą być źródłem informacji, która przyczyni się do wyjaśnienia pochodzenia przynajmniej części błędów systematycznych w rozwiązaniach składowej wysokościowej wektorów z obserwacji GPS (Krynski i Zanimonskiy, 2000; Neumeyer et al., 2002).

Wobec rosnącego zapotrzebowania na rozwój szybkich i dokładnych technik satelitarnych wyznaczania pozycji oraz problemów związanych z wykorzystaniem wyników pomiarów GPS do celów geodynamicznych, zaobserwowanie krótkookresowych zmienności w ciągach rozwiązań GPS oraz w ciągach residuów obserwacji grawimetrycznych, a także ich wstępna ocena ilościowa posłużyły do sformułowania zadań badawczych objętych niniejszą pracą.

2. ZGROMADZENIE MATERIAŁU OBSERWACYJNEGO I WYGENEROWANIE CIĄGÓW CZASOWYCH

Do przeprowadzenia analizy jakościowej i ilościowej krótko- i długookresowych zmian składowych wektorów wyznaczanych z obserwacji GPS oraz krótkookresowych zmian residuów przyspieszenia siły ciężkości niezbędne było zgromadzenie i wstępne opracowanie obserwacji GPS i obserwacji grawimetrycznych z wielu stacji, a następnie wygenerowanie odpowiednich ciągów czasowych. Korzystano z ogólnodostępnych obserwacji GPS wykonanych na stacjach permanentnych sieci EPN oraz obserwacji grawimetrycznych wykonanych na stacjach pływowych, uczestniczących w programie GPP. W wyniku dwustronnych porozumień uzyskano, wykonane przy użyciu grawimetrów pływowych, obserwacje grawimetryczne z okresu 2 lat ze stacji Metsahovi oraz z okresu 10 lat ze stacji Black Forest Observatory. Instytut Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej udostępnił uzyskane przy użyciu grawimetru polowego LCR-G obserwacje grawimetryczne z okresu kilkunastu tygodni ze stacji w Józefosławiu. Dodatkowo przystosowano do ciągłych obserwacji grawimetrycznych stanowiska w obserwatoriach w Borowej Górze i w Lamkówku i w latach 2000–2002, przy użyciu grawimetrów LCR-G, zgromadzono kilka kilkumiesięcznych ciągów obserwacyjnych z tych stacji. W obserwatorium w Borowej Górze założono mikrosieć (rys. 5.4), na której przeprowadzono dwie kilkudniowe kampanie pomiarowe GPS. Do tworzenia ciągów czasowych parametrów meteorologicznych wykorzystano zainstalowane w obserwatoriach w Borowej Górze i w Lamkówku czujniki meteorologiczne z automatyczną rejestracją oraz ogólnodostępne dane ze stron internetowych. Strony internetowe posłużyły również za źródło danych troposferycznych (TZD), a także w dużej mierze danych jonosferycznych (TEC). Część danych jonosferycznych została wygenerowana w procesie opracowywania obserwacji GPS programem Bernese v.4.2. Zestawienie zgromadzonego i wstępnie opracowanego materiału obserwacyjnego: rozwiązań GPS, obserwacji grawimetrycznych, danych meteorologicznych, TZD i TEC zamieszczono w tablicach 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 i 2.5.

Tablica 2.1. Opracowane rozwiązania GPS

Okres obserwacji	Długość sesji obserwacyjnej	Rozdzielczość czasowa	Wektory	Program obliczeniowy
21 dni 18.09–08.10.1999	4 h	4 h	BOGO-LAMA BOGO-JOZE LAMA-JOZE	Bernese v.4.2
21 dni 18.09–08.10.1999	4 h	1 h	BOGO-LAMA BOGO-JOZE LAMA-JOZE	Bernese v.4.2
19 dni 13.08–01.09.2001	1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h	1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h	BOGO-IGIK BOGO-JOZE IGIK-JOZE	Bernese v.4.2
4 miesiące 02–05.2001	3 h	0.5 h	BOGO-LAMA BOGO-JOZE LAMA-JOZE BOR1-BOGO BOR1-JOZE BOR1-LAMA	Bernese v.4.2
4 miesiące 02–05.2001	24 h	1 h	BOR1-BOGO BOR1-JOZE BOR1-LAMA BOGO-JOZE BOGO-LAMA LAMA-JOZE	Bernese v.4.2
200 dni 05.01–11.08.2001	23 h 56 m	23 h 56 m	LAMA-BOGO BOR1-LAMA LAMA-JOZE JOZE-UZHL JOZE-BOR1 BOGO-BOR1 BOGO-JOZE BOGO-UZHL BOR1-UZHL LAMA-UZHL	Bernese v.4.2
5 dni 27.09–01.10.2000	4 h	1h	BOR1-0217 BOR1-00R3 BOR1-3230 BOR1-BOGO	Bernese v.4.2 (z modelowaniem troposfery i bez modelowania troposfery)
5 dni 27.09–01.10.2000	1 h	40 m	3230-0217 3230-00R3 0217-00R3	Pinnacle
5 godzin 29.09.2000	1 h	1m	BOGO-0217	Pinnacle
79 dni 12.10–29.12.2001	1 h	1h	BOGO-BOGI	Pinnacle
7 dni 24–30.08.2001	4 h	1h	HOBU-PTBB BOGO-BOR1 JOZE-LAMA PTBB-POTS	Pinnacle
15 dni 14–29.08.2001	2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 8 h, 9 h, 10 h, 11 h, 12 h, 13 h, 14 h, 17 h, 18 h, 19 h, 20 h, 21 h, 22 h, 23 h, 25 h, 26 h, 27 h, 28 h	1 h	BOGO-JOZE	Pinnacle

Tablica 2.2. Opracowane residua przyspieszenia siły ciężkości

Okres obserwacji	Rozdzielczość czasowa	Stacja	Źródło danych	Jakość obserwacji
36 miesięcy 1999–2001	1 h	Bad Homburg	strony internetowe	dobra
36 miesięcy 1999–2001	1 m	Black Forest	University of Karlsruhe	dobra
8 miesięcy 06.1997–01.1998	1 h	Brussels	strony internetowe	dobra
rok z przerwami 1999	10 s	Kijów	IGF, Kijów	brak ciągłości
8 miesięcy 06.1997–01.1998	1 h	Membach	strony internetowe	dobra
36 miesięcy 1999–2001	1 m	Metsahovi	FGI, Helsinki	dobra
34 miesiące 08.1996–05.1999	1 h	Potsdam	strony internetowe	dobra
8 miesięcy 06.1997–01.1998	1 h	Strasbourg	strony internetowe	dobra
12 miesięcy 07.1997–07.1998	1 h	Wettzell	strony internetowe	dobra
4 miesiące 11.2000–04.2001	15 m	Borowa Góra	własne pomiary	brak ciągłości
4 miesiące 12.2000–03.2001	1 m	Lamkówko	własne pomiary	brak ciągłości, szumy
3 tygodnie 09.1999–10.1999	15 m	Józefosław	IGWiAG, PW	brak ciągłości
7 miesięcy 10.2001–04.2002	15 m	Borowa Góra	własne pomiary	brak ciągłości
7 miesięcy 10.2001–04.2002	1 m	Lamkówko	własne pomiary	brak ciągłości, szumy
2 miesiące 01.2001–02.2001	15 m	Józefosław	IGWiAG, PW	brak ciągłości, szumy
2 miesiące 10.2002–12.2002	1 m	Lamkówko	własne pomiary	brak ciągłości, szumy

Tablica 2.3. Opracowane ciągi danych meteorologicznych

Okres obserwacji	Rozdzielczość czasowa	Stacja	Parametry meteorol.	Źródło danych	Jakość obserwacji
42 dni 29.07–08.09.2001	10 m 15 m 1 m 10 m 10 m 15 m	BOGO DRES GOPE LAMA POTS WROC	ciśnienie, temperatura, wilgotność	BKG, Frankfurt am Main	dobra
7 miesięcy 05.1999–11.1999	10 m	BOGO	ciśnienie, temperatura, wilgotność	własne pomiar	dobra
1 rok 01.1999–02.1999	1 h	POTS	ciśnienie, temperatura	strony internetowe	dobra
36 miesięcy 1999–2001	1 m	METS	ciśnienie, temperatura	FGI, Helsinki	dobra

Tablica 2.4. Opracowane ciągi TZD

Okres obserwacji	Rozdzielczość czasowa	Stacja	Źródło danych	Jakość obserwacji
42 dni 29.07–08.09.2001	2 h	BOGO, BOR1, DRES, GLSV, GOPE, HOBV, JOZE, LAMA, POTS, PTBB, UZHL, WROC	EUREF Analysis Center BKG, Frankfurt am Main	dobra
146 dni 20.01–15.06.2002	1 h	BOGO, BOR1, DRES, GLSV, GOPE, HOBV, JOZE, KARL, KLOP, LAMA, MOPI, POLV, POTS, PTBB, SULP, TUBO, UZHL, WROC, WTZR	GeoForschungs- Zentrum Potsdam (combination of trop. estimates from all analysis centers)	dobra

Tablica 2.5. Opracowane ciągi TEC

Okres obserwacji	Rozdzielczość czasowa	Stacja	Źródło danych	Jakość obserwacji
4 lata 1999–2002	2 h	BOGO, TIDB, DAV1	strony internetowe IONEX	dobra

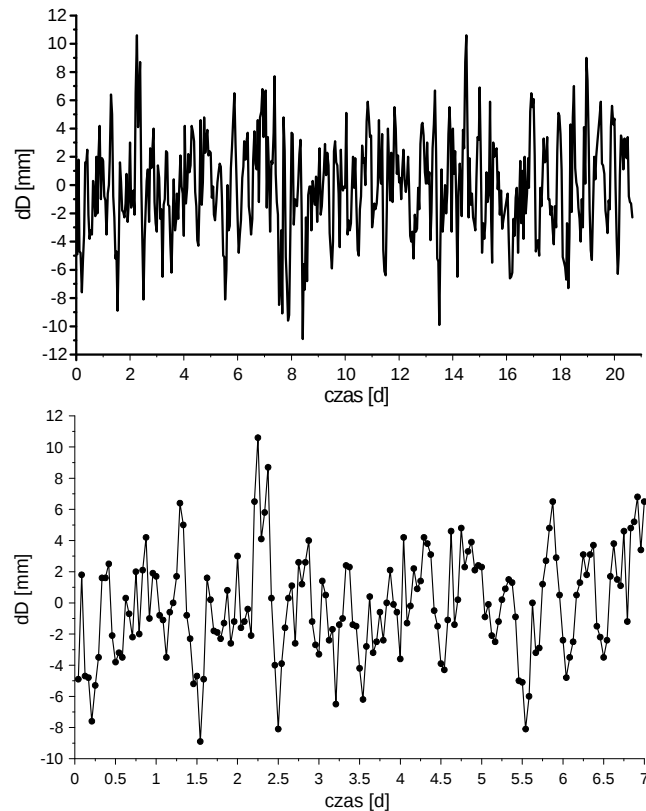
3. CHARAKTERYSTYKA KRÓTKOOKRESOWYCH ZMIAN WSPÓLRZĘDNYCH WEKTORÓW WYZNACZONYCH Z OBSERWACJI GPS

Wraz z rozpowszechnieniem stosowania techniki GPS do precyzyjnego wyznaczania pozycji pojawiła się potrzeba rzetelnej oceny dokładności i wiarygodności uzyskiwanych wyników. Różnice między rozwiązaniami uzyskiwanymi z opracowania różnych sesji obserwacyjnych GPS są zazwyczaj dużo większe, niżby to wynikało z wewnętrznej oceny dokładności poszczególnych rozwiązań. Zagadnienie to zilustrowane wynikami eksperymentów numerycznych zostanie omówione w rozdziale 6 niniejszej pracy.

Badanie przyczyn występowania zmienności rozwiązań GPS ma istotne znaczenie dla doskonalenia modelowania obserwacji GPS w procesie precyzyjnego obliczania pozycji oraz doskonalenia oceny dokładności rozwiązań GPS (Teunissen, 2002), a także dla rozwoju efektywnego wykorzystania technologii RTK.

Ciągi czasowe rozwiązań GPS nie mają dokładnie charakteru procesu losowego. Ich struktura jest w rzeczywistości bardzo złożona. Na zmienności w ciągach czasowych rozwiązań GPS składają się zarówno procesy losowe, jak i procesy chaotyczne oraz procesy o charakterze systematycznym (Kryński et al., 2002a; 2002b). Źródłem błędów przypadkowych w rozwiązaniach GPS są zasadniczo błędy obserwacji. Niedoskonałość modeli używanych do opracowania obserwacji GPS oraz niemodelowane 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 towarzyszące pojawianiu się nieśledzonego uprzednio satelity nad horyzontem, zejściem śledzonego satelity poniżej horyzontu lub nagłym wyłączeniem satelity z systemu. Źródła błędów systematycznych można sklasyfikować w odniesieniu do trzech segmentów satelitarnego globalnego systemu nawigacyjnego, a mianowicie segmentu naziemnego (odbiornik, antena i oprogramowanie a także stałość położenia punktu), segmentu kosmicznego (orbity satelitów i konfiguracja satelitów) oraz segmentu środowiskowego (modele jonosfery i troposfery) (Kryński i Zanimonskiy, 2001d).

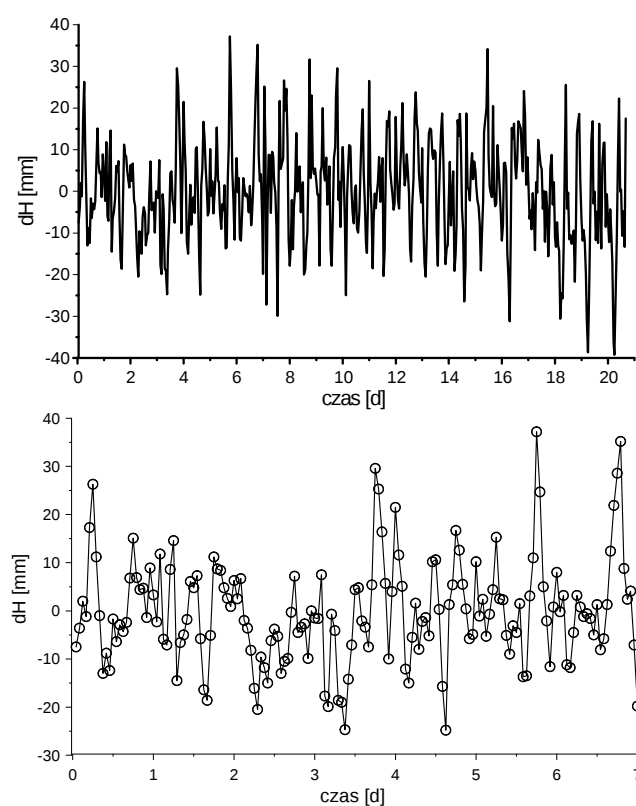
Wyniki analiz ciągów czasowych rozwiązań GPS wskazały na to, iż w zmienności ciągów zawarte są wyrazy okresowe i trendy niemodelowane w procesie opracowania obserwacji (Kryński et al., 2000; 2002a; Bruyninx, 2001; Poutanen et al., 2001). Dla przykładu, przebiegi zmienności w długości i składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE (42 km), obliczonych programem Bernese v.4.2 w oparciu o 4 h sesje obserwacyjne z okresu 21 dni (dolne rysunki) oraz w powiększeniu z okresu 7 dni (górne rysunki), przedstawiono odpowiednio na rysunkach 3.1 i 3.2.



Rys. 3.1. Zmienność długości wektora BOGO-JOZE otrzymanej z opracowania 4 h sesji obserwacyjnych

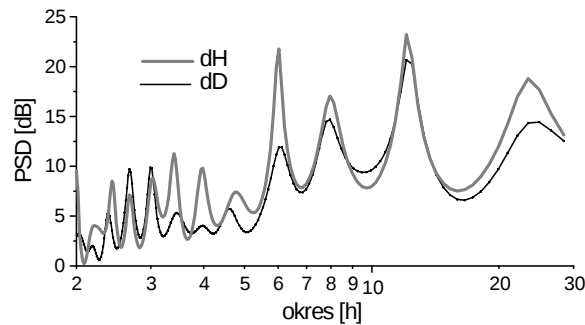
Zgodnie z powszechnym doświadczeniem, otrzymane amplitudy zmian w składowej wysokościowej są około trzykrotnie większe od amplitud zmian w długości wektora. W zmienności składowych wektora dominują wyrazy o charakterze regularnym, w tym wyrazy o wyraźnej okresowości. Regularność zmienności w ciągach czasowych rozwiązań GPS, bardzo

wysoka w przypadku krótkich wektorów, maleje wraz ze wzrostem długości wektorów (Kryński i Zanimonskiy, 2001c). Regularność ta zostanie omówiona w rozdziale dotyczącym rozdzielania okresowych błędów systematycznych, gdyż do jej badania wymagana jest wysoka rozdzielczość czasowa ciągów rozwiązań GPS. Wyższa rozdzielczość czasowa ciągów rozwiązań GPS umożliwi także częściowe wyeliminowanie skoków w ich przebiegach.



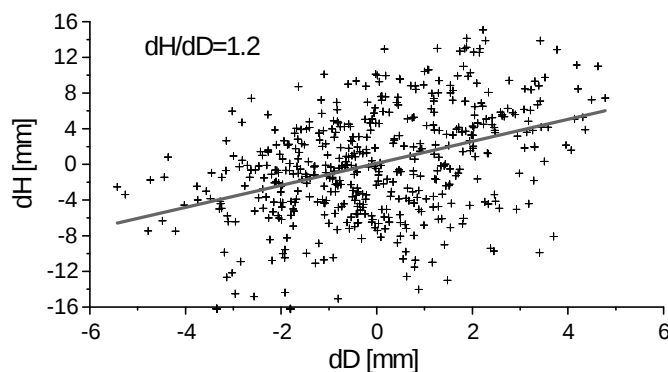
Rys. 3.2. Zmienność składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE otrzymanej z opracowania 4 h sesji obserwacyjnych

Na rysunku 3.3 pokazano widma przebiegów zmian składowych wektora BOGO-JOZE, przedstawione uprzednio w dziedzinie czasu na rysunkach 3.1 i 3.2. Przebiegi zmian dla różnych składowych wektora mają tę samą charakterystykę spektralną. W ciągach o wyższej aniżeli dobową rozdzielczości czasowej przeważająca część widma mocy tych zmian koncentruje się wokół okresów odpowiadających 12 h i 24 h (Bogusz et al., 2000; Kryński i Cisak, 2000; Kryński et al., 2000).



Rys. 3.3. Widma zmienności składowych wektora BOGO-JOZE otrzymanych z opracowania 4 h sesji obserwacyjnych

W dziedzinie czasu obserwuje się słabą korelację między zmiennością składowej wysokościowej i długości wektora (rys. 3.4).



Rys. 3.4. Korelacja składowej wysokościowej i długości wektora BOGO-JOZE otrzymanych z opracowania 4 h sesji obserwacyjnych

Występowanie tej korelacji nie ma wyjaśnienia fizycznego i wynika z właściwości istniejącego satelitarnego nawigacyjnego systemu pomiarowego. Wyrazy okresowe o okresie rzędu kilku godzin są zapewne nierzeczywistymi efektami procesów losowych powstałymi z powodu nieliniowości systemu.

Wpływ błędów okresowych, o okresach krótszych bądź równych jednej dobie, na rozwiązania GPS jest znacznie zredukowany w przypadkach, gdy rozwiązania te uzyskiwane są na podstawie opracowania – powszechnie stosowanych w precyzyjnych pomiarach geodezyjnych oraz dla badań geodynamicznych – dobowych sesji obserwacyjnych. Ciągi czasowe dobowych rozwiązań GPS charakteryzują się wygładzonym przebiegiem, zakłóconym głównie systematycznymi błędami o długich okresach oraz

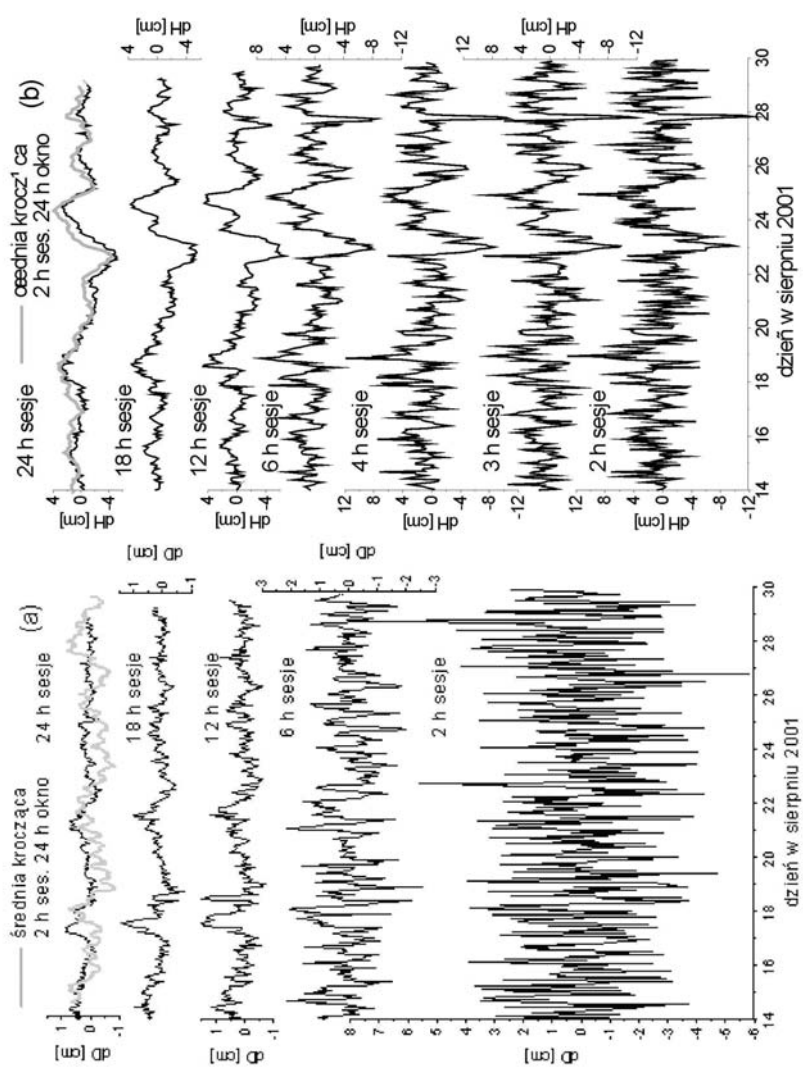
efektami o charakterze chaotycznym. Im krótsze są sesje obserwacyjne użyte do wygenerowania ciągów czasowych rozwiązań GPS, tym bardziej zauważalne są zmienności w tych ciągach o okresie doby gwiazdowej. Liczne nagłe zmiany w konfiguracji satelitów występują z okresowością doby gwiazdowej. Powodują one specyficzne skokowe zmiany w ciągach czasowych obliczanych z obserwacji GPS składowych wektorów, o okresach wyraźnie krótszych od jednej doby, np. rzędu 1 h. Zmiany takie mają raczej charakter chaotyczny niż losowy. Jeśli pominąć wspomniane skokowe zmiany, zmienność konstelacji satelitów powoduje zmienności o charakterze ciągłym w parametrach procesu pomiarowego, tj. stosunku sygnału do szumu, opóźnień atmosferycznych, efektu wielotorowości, poprawek orbitalnych itp. Rysunki 3.5a i 3.5b ilustrują zależność pomiędzy długością sesji obserwacyjnej i przebiegiem zmienności składowych wektora. Przedstawiono na nich przebiegi ciągów czasowych rozwiązań GPS dla długości i składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE, uzyskanych przy użyciu programu Pinnacle, w oparciu o sesje obserwacyjne o długościach od 2 h do 24 h (z nakładką, przesuniętych o 1 h).

Wydłużanie sesji obserwacyjnej powoduje wygładzenie rozwiązania. Ciągi czasowe rozwiązań GPS opartych na dłuższych sesjach obserwacyjnych charakteryzują się gładszym przebiegiem oraz mniejszą amplitudą zmienności. Są one obarczone mniejszym szumem. Jednocześnie ulegają w nich zmniejszeniu systematyczne błędy okresowe, a zatem redukcji ulega informacja przydatna do badania zmienności krótkookresowych.

Zmienności w ciągach czasowych dla długości wektora różnią się pod względem charakteru od odpowiednich zmienności dla składowej wysokościowej. W zmienności rozwiązań dla długości wektora, uzyskanych z opracowania krótkich sesji obserwacyjnych, dominuje składowa chaotyczna. Wraz z wydłużaniem sesji używanych do generowania rozwiązań GPS następuje wzrost stabilności rozwiązań widoczny na rysunku 3.5a w postaci zmniejszania się rozrzutu pomiędzy rozwiązaniami.

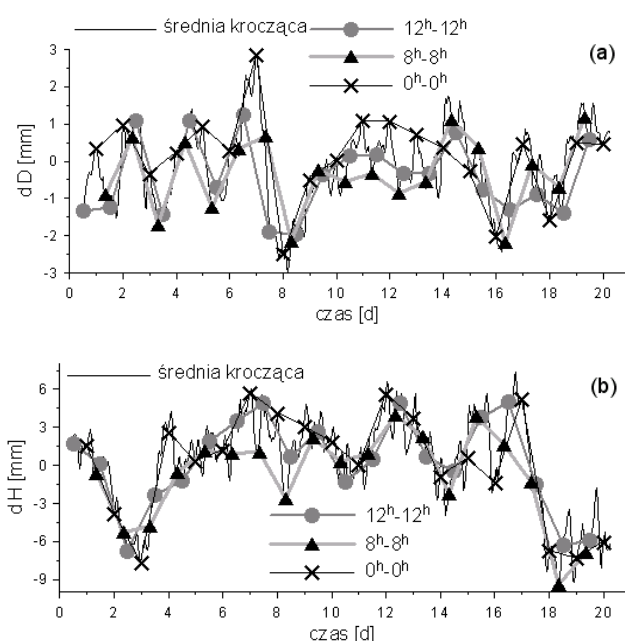
Na najwyższym wykresie rysunku 3.5a przedstawiono przebiegi rozwiązań GPS uzyskanych z 24 h sesji obserwacyjnych oraz wielkości uśrednione w interwałach 24 h w oparciu o średnie kroczące z rozwiązań 2 h sesji obserwacyjnych. Uzyskana znacząca różnica w przebiegach obu krzywych ma charakter losowy. Przyczyny występowania tej różnicy należy się dopatrywać w niestabilności algorytmu obliczeniowego użytego w oprogramowaniu do opracowywania obserwacji GPS.

W zmienności przebiegów ciągów czasowych dla składowej wysokościowej obok większego aniżeli dla długości wektora szumu zauważa się dominację składowej deterministycznej. Szczegóły dotyczące porównania wyników opracowań pojedynczych sesji i grup sesji podane są w rozdziale 6 niniejszego opracowania.



Rys. 3.5. Zależność między długością sesji obserwacyjnej i przebiegiem zmienności składowych wektora: długości (a) i składowej wysokościowej (b)

Z wykresów przedstawionych na rysunku 3.6 wynika, że wybór początku opracowywanych dobowych sesji obserwacyjnych (12^h , 8^h lub 0^h) nie pozostaje bez wpływu na jakość rozwiązania GPS. W przypadku badanego wektora rozbieżności w rozwiązaniach opartych na dobowych sesjach obserwacyjnych o różnym początku dochodzą do 2 mm w długości wektora oraz do 5 mm w składowej wysokościowej.



Rys. 3.6. Zmienność długości (a) i składowej wysokościowej (b) wektora BOGO-JOZE otrzymanej z 24 h sesji (z uśrednienia odpowiednich sześciu 4 h sesji)

Regularność zmienności konstelacji satelitów GPS sprawia, że wynikające z niej zmiany w parametrach procesu oraz w wynikach rozwiązania GPS są okresowe i mają okres jednej doby gwiazdowej. Analiza spektralna i korelacyjna ciągów czasowych rozwiązań GPS potwierdza istnienie wyrazów okresowych o takim okresie (Kryński et al., 2002a). Wyrazy okresowe o okresie doby gwiazdowej występują zarówno w zmienności składowych wektora, jak i w zmienności współczynników korelacji między wyznaczonymi składowymi wektora, w zmienności liczby, użytych do rozwiązania wektora, pojedynczych różnic obserwacji fazowych etc.

Uzyskanie wyników opracowania kilkugodzinnych sesji obserwacyjnych GPS na tym samym poziomie dokładności, jaki otrzymuje się z opracowania sesji dobowych wymaga zastosowania odpowiednich modeli krótkookresowych błędów systematycznych. Wykonane w tym zakresie prace ukierunkowane były na tworzenie modeli empirycznych, przeznaczonych do rozdzielenia wpływu efektów dobowych z tytułu zmieniającej się konfiguracji satelitów od efektów wywołanych warunkami meteorologicznymi (Krynski i Zanimonskiy, 2001a; Krynski et al., 2002c). Do tworzenia modeli korzystano z danych obserwacyjnych ze stacji permanentnych GPS oraz z obserwacji GPS wykonanych na punktach minisiatki poligonu testowego w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym w Borowej Górze.

Istotnym wynikiem przeprowadzonych badań jest opracowana strategia detekcji i modelowania błędów systematycznych w ciągach czasowych rozwiązań GPS (Krynski i Zanimonskiy, 2002b). Strategia ta polega na analizie spektralnej ciągów rozwiązań GPS o odpowiedniej rozdzielczości czasowej oraz na badaniu korelacji uzyskanych zmienności rozwiązań GPS ze zmiennością parametrów zewnętrznych. Szczegółowemu opisowi opracowanej strategii poświęcony jest rozdział 5 niniejszej monografii.

Do opracowania danych GPS przy użyciu programu Bernese używano orbit precyzyjnych dostarczanych przez CODE (Centre for Orbit Determination in Europe) oraz globalny model jonosfery (Schaer, 1999), stosując następującą strategię:

- sprawdzenie dokładności współrzędnych stacji w oparciu o rozwiązanie nieoznaczoności na częstotliwości L3 (*iono-free*),
- wyznaczenie parametrów troposfery bez modelu *a priori* z użyciem funkcji mapowania Dry-Niell (jeden parametr na godzinę dla 24 h sesji, jeden parametr na dwie godziny dla 4 h sesji, jeden parametr na 3 godziny dla 3 h sesji),
- rozwiązanie nieoznaczoności na częstotliwości L5 (*wide-lane*) z modelem jonosfery CODE przy ustalonych współrzędnych stacji (Hugentobler et al., 2001),
- ponowne rozwiązanie nieoznaczoności na częstotliwości L3 z użyciem uprzednio wyznaczonych nieoznaczoności na częstotliwości L5 oraz rozwiązanie nieoznaczoności na częstotliwości *narrow-lane*,
- obliczenie ostatecznych współrzędnych wektorów.

Do opracowania danych GPS przy użyciu programu Pinnacle używano precyzyjnych orbit końcowych, opracowanych przez IGS (*final orbits* i *final clocks*) oraz modelu troposfery Goad&Goodman. Obliczenia wykonano w trybie L3 (*iono-free*).

4. CHARAKTERYSTYKA ZMIENNOŚCI RESIDUÓW PRZYSPIESZENIA SIŁY CIĘŻKOŚCI

Niezależnie od stacji pływowych, dostarczających obserwacji grawimetrycznych do badań o skali globalnej, istnieją liczne, okresowo działające stacje grawimetryczne, często znajdujące się w rejonach o wzmożonej aktywności geodynamicznej. Stabilność, czułość i precyzja współczesnych grawimetrów umożliwiają zaobserwowanie efektów o okresach od kilku godzin do kilkunastu dni. Zasadnicza część obserwowanego sygnału grawimetrycznego daje się opisać za pomocą modelu pływów skorupy ziemskiej i może być obliczona przy użyciu np. programu ETERNA 3.3 (Wenzel, 1996). 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. Klasyczne narzędzia wykorzystywane do spektralnej analizy efektu pływowego nie nadają się do opracowania krótkich ciągów obserwacji grawimetrycznych. Zaproponowana metoda opracowania obserwacji grawimetrycznych polega na analizie spektralnej krótkich ciągów czasowych z synchroniczną detekcją przy wykorzystaniu modelowych pływów jako podstawowego sygnału. Metoda ta pozwala na wyznaczenie regularnych zmian przyspieszenia siły ciężkości o amplitudach rzędu mikrogala, które pozostają w zależności ze zmianami pływowymi i są charakterystyczne dla poszczególnych stacji.

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 (Zanimonskiy et al., 1999; Wöppelman et al., 1999). Ta druga wersja, znacznie atrakcyjniejsza z poznawczego punktu widzenia z uwagi na dużo większą liczbę i lepsze pokrycie Ziemi stacjami permanentnymi GPS aniżeli stacjami pływowymi, jest jednak bardzo kosztowna, biorąc pod uwagę użycie instrumentów pływowych najwyższej klasy. Stosowanie w tym celu bardzo drogie grawimetrów nadprzewodzących nie jest jednak konieczne. Specjaliści od monitorowania pływów ziemskich, koncentrujący się na rejestracji długich serii obserwacyjnych, stanowczo wymagają od grawimetru długookresowej stabilności. Grawimetry geodezyjne uważane są za mało przydatne do pomiaru pływów, głównie z powodu znacznego i nieprzewidywalnego w dłuższym okresie czasu dryftu. Do badania krótkookresowych zmian przyspieszenia siły ciężkości można korzystać z krótkich serii obserwacyjnych. Wymagania dotyczące stabilności stawiane grawimetrom przeznaczonym do tego celu mogą być łagodniejsze. Stosunkowo tani grawimetr geodezyjny powinien zapewnić wysoką jakość danych w wystarczająco szerokim zakresie częstotliwości. Wprowadzenie w czyn idei

Melchiora dotyczącej wykorzystania polowych grawimetrów geodezyjnych do obserwacji pływowych w przerwach pomiędzy kampaniami polowymi (Melchior, 1983) wydaje się korzystne zarówno jeśli idzie o utrzymanie sprawności grawimetrów, jak i biorąc pod uwagę możliwości uzyskania uzupełniających danych pływowych. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy pokazują, że umieszczony w pomieszczeniu termostatyzowanym grawimetr LaCoste&Romberg typu G (LCR-G), wyposażony w elektroniczny system rejestracji, dostarcza wysokiej jakości obserwacji przyspieszenia siły ciężkości w przedziale czasu od kilkudziesięciu minut do kilku dni. Odpowiada to dynamicznemu zakresowi częstotliwości na poziomie przekraczającym 20 dB (10^2) (Krynski i Zanimonskiy, 2000; Zanimonskiy i Krynski, 2000b; 2000c). Podobne wnioski wyciągnięto na podstawie badań przeprowadzonych w innych ośrodkach (np. El Wahabi et al., 1997). Zakres częstotliwości uzyskany z pomiarów grawimetrem LCR-G mieści się w granicach powszechnie używanych narzędzi współczesnej analizy spektralnej. Do opisu zjawiska fizycznego w takim zakresie częstotliwości wystarcza w dodatku prosty² model matematyczny. Znakomicie upraszcza to opis i interpretację obserwowanego procesu.

Okresy w przedziale od dziesiątków minut do kilkudziesięciu godzin w ciągach czasowych obserwacji grawimetrycznych odpowiadają licznym, interesującym zjawiskom fizycznym. Należą do nich główne fale pływowe, tj. fale o okresach dobowym, pół-dobowym i 8 h wraz z ich harmonikami oraz złożonymi częstotliwościami występującymi w zmianach przyspieszenia siły ciężkości. Ruchy oscylacyjne wewnętrznego jądra Ziemi, jako źródło krótkookresowych zmian przyspieszenia siły ciężkości, są obecnie przedmiotem intensywnych badań (Crossley et al., 1999). Dodatkowego źródła zmian przyspieszenia siły ciężkości należy dopatrywać się w zjawiskach występujących nieregularnie, takich jak fale uderzeniowe w atmosferze, opady i procesy wulkaniczne (Delmelle et al., 1999), których czas trwania mieści się w badanym przedziale okresów. Na uwagę zasługuje również ruch skorupy ziemskiej względem płaszcza. Ruch ten jest spowodowany zarówno oddziaływaniem oceanu i atmosfery na skorupę ziemską, jak i wzajemnym oddziaływaniem skorupy i płaszcza Ziemi. Jest wielce prawdopodobne, iż oddziaływanie to w istotny sposób przyczynia się do residualnych zmian przyspieszenia siły ciężkości (względem teoretycznego modelu pływowego). Należy oczekiwać, że największe wartości tych zmian będzie można zaobserwować przede wszystkim na brzegach dużych płyt

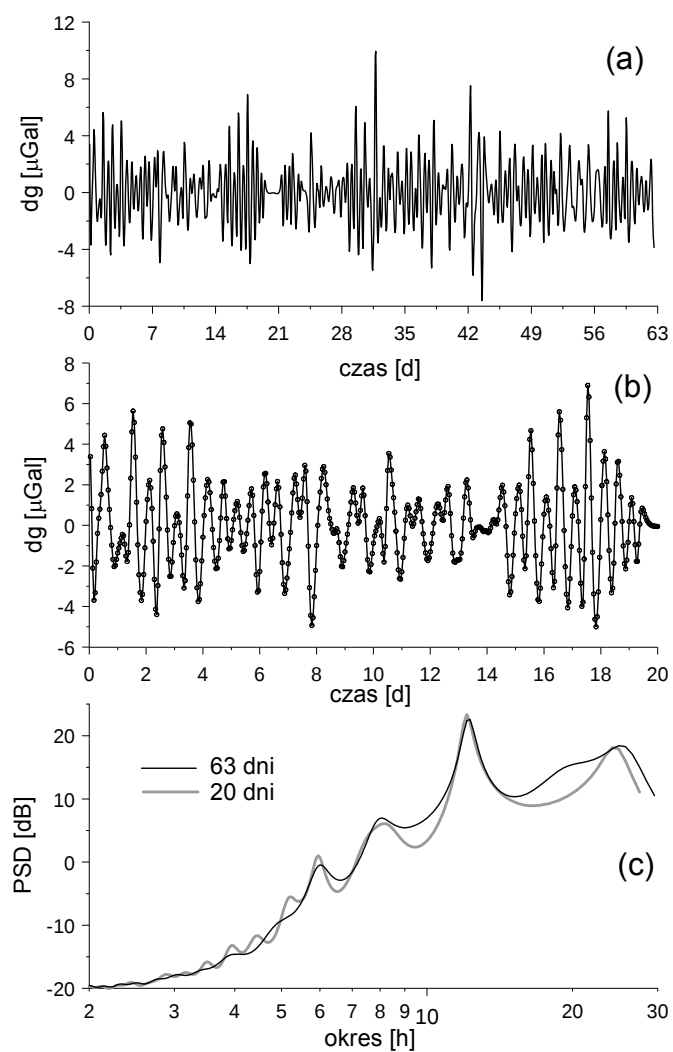
² Pod pojęciem prostego modelu matematycznego w dziedzinie częstotliwości rozumiany jest model w postaci funkcji o niewielkiej liczbie parametrów (małej liczbie funkcji bazowych, wystarczających do opisanie modelowanego sygnału).

skorupy ziemskiej, w strefach uskokowych (Zanimonskiy i Krynski, 2000a; 2000c).

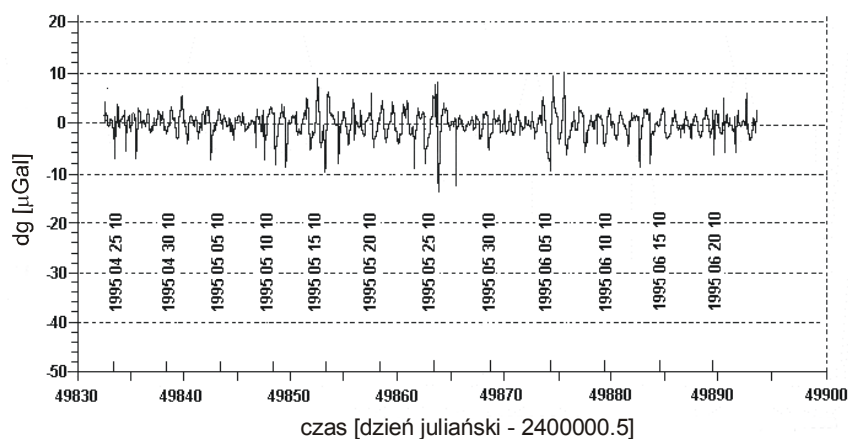
W 1998 roku w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie przeprowadzono prace studialne związane z analizą residuów zmian przyspieszenia siły ciężkości. Analizie poddano ciąg czasowy obserwacji grawimetrycznych uzyskanych w latach 1995–1997 za pomocą grawimetru Askania Gs11 w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym w Borowej Górze. Należy podkreślić, że Obserwatorium to jest położone na granicy strefy Teisseyre’a-Tornquista, oddzielającej dwie płyty kontynentalne. Co więcej, na terenie Obserwatorium znajduje się główny punkt absolutny krajowej osnowy grawimetrycznej, mikrosieć grawimetryczna, a także dwie permanentne stacje GPS sieci IGS/EUREF. Mimo pewnych nieciągłości w zarejestrowanych danych, skoków (gwałtownych zmian poziomu odniesienia) oraz nieliniowości dryftu, wyselekcjonowano kilkanaście przedziałów o długości co najmniej miesiąca o ciągłym zapisie danych. Residualne zmiany przyspieszenia siły ciężkości uzyskano poprzez odjęcie pływów teoretycznych, obliczonych programem ETERNA 3.3 od wstępnie opracowanych zaobserwowanych wielkości przyspieszenia siły ciężkości. Uzyskane residua mają zdecydowanie charakter okresowy, a ich amplitudy osiągają poziom 3–5 μGal (rys. 4.1a, 4.1b) (Zanimonskiy i Kryński, 2000b).

Okresy residuów odpowiadają okresom głównych fal pływowych oraz ich nieliniowych transformacji (rys. 4.1c). Zmiany residuów wykazują również charakter okresowo pulsujący. Zespół 4–5 pulsacji o okresie 24 h powtarza się co 14 dni (rys. 4.1b). Podobne pulsacje oraz zbliżone do harmonicznego zachowanie residualnych zmian przyspieszenia siły ciężkości widoczne są na wykresie (rys. 4.2), opisującym wyniki opracowania klasyczną techniką określenia parametrów pływowych obserwacji grawimetrycznych z lat 1995–1997, wykonanych w Borowej Górze (Chojnicki, 1998). Chojnicki, który znacząco przyczynił się do założenia w Borowej Górze stacji pływowej, w swoim raporcie koncentrował się głównie na ocenie jakości rejestracji efektu pływowego, stabilności i czułości. Nie zwrócił on jednak szczególnej uwagi na regularność zmian wyrazów residualnych.

Do określenia kryteriów badania krótkookresowych efektów, w krótkich ciągach czasowych, bardziej przydatne od ciągów rozwiązań GPS są ciągi residuów przyspieszenia siły ciężkości z uwagi na ich większą rozdzielczość czasową, regularność przebiegu i znacznie niższy poziom szumów. Badania w tym zakresie przeprowadzono przy wykorzystaniu obserwacji pochodzących ze stacji pływowych, uczestniczących w międzynarodowym programie pod nazwą Globalny Projekt Geodynamiczny, stacji pływowej w Józefosławiu oraz – po odpowiednim przystosowaniu – ze stacji w Borowej Górze i w LamkóWKu.

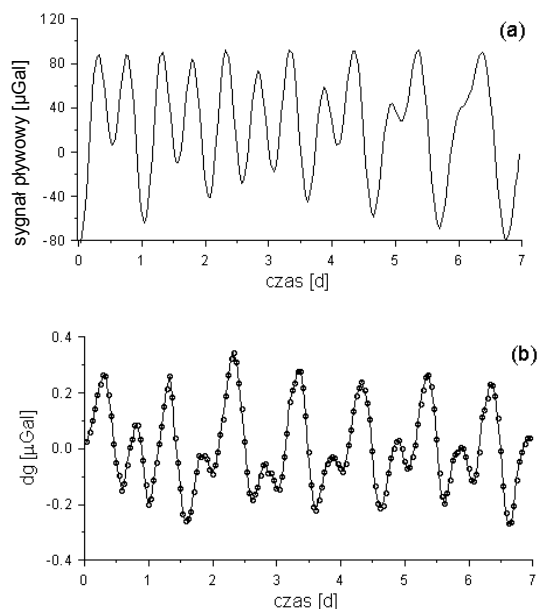


Rys. 4.1. Residua obserwacji grawimetrycznych wykonanych grawimetrem Askania Gs11 z okresu 63 dni (a), 20 dni (b) oraz ich widmo (c)



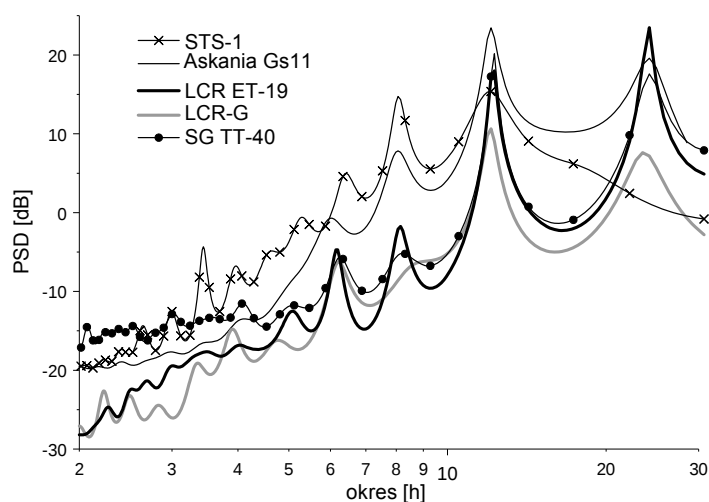
Rys. 4.2. Przykład zmian residuów grawimetrycznych uzyskanych na podstawie obserwacji wykonanych w Borowej Górze przy użyciu grawimetru *Askania Gs11* (Chojnicki, 1996)

W pierwszej kolejności poddano analizie obserwacje wykonane przy użyciu grawimetru LCR-ET19 w Black Forest Observatory. Przebieg ciągu czasowego obserwowanego przyspieszenia siły ciężkości oraz odpowiadających mu residuów z dowolnie wybranego okresu 7 dni (bardzo krótki ciąg czasowy) przedstawiono na rysunku 4.3.



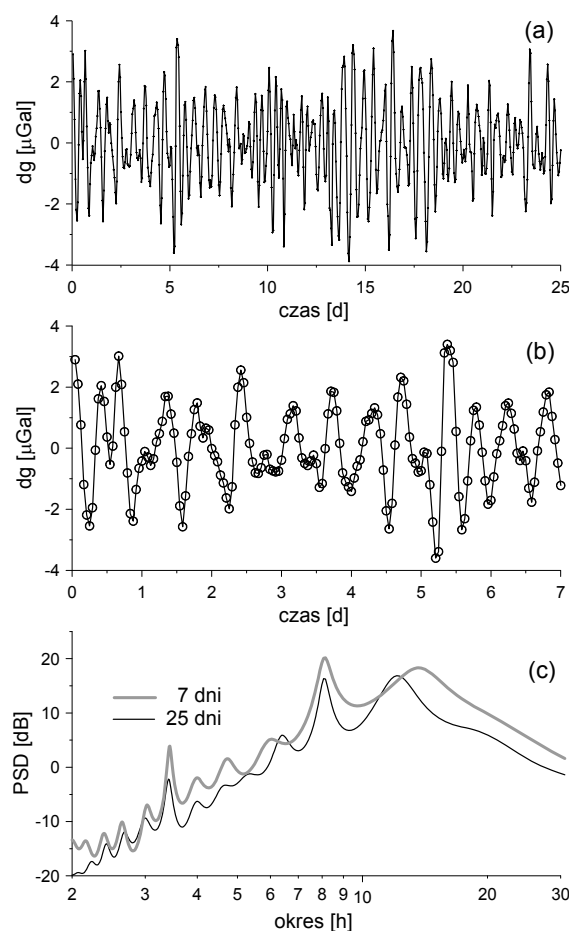
Rys. 4.3. Obserwowany w BFO grawimetrem LCR-ET19 sygnał przyspieszenia siły ciężkości (a) i obliczone residua przyspieszenia siły ciężkości (b)

Ciąg ten posiada charakterystykę okresową podobną do reprezentowanej przez wyniki uzyskane grawimetrem Askania Gs11 w Borowej Górze, jednak o amplitudach o rząd wielkości mniejszych. W celu pozyskania do dalszych analiz większej liczby danych o niższym poziomie szumu zainstalowano w Borowej Górze polowy grawimetr LCR-G, zaopatrzony w woltomierz cyfrowy. Grawimetr ten umieszczono w termostacie utrzymującym stałą temperaturę 30°C oraz przystosowano go do komputerowej rejestracji obserwacji. Analizę uzyskanych danych prowadzono równoległe z analizą obserwacji zarejestrowanych w innych obserwatoriach, tj. grawimetru nadprzewodzącego SG z Bad Homburg oraz szerokopasmowego sejsmometru STS-1 z Kijowa (korzystając z uprzejmości Instytutu Geofizyki w Kijowie) (Zanimonskiy i Krynski, 2000b). Charakterystyki widmowe sygnałów z 5 różnych instrumentów z okresami w przedziale od 2 h do 30 h przedstawiono na rysunku 4.4.



Rys. 4.4. Charakterystyka widmowa przyspieszenia siły ciężkości obserwowanego 5 różnymi instrumentami

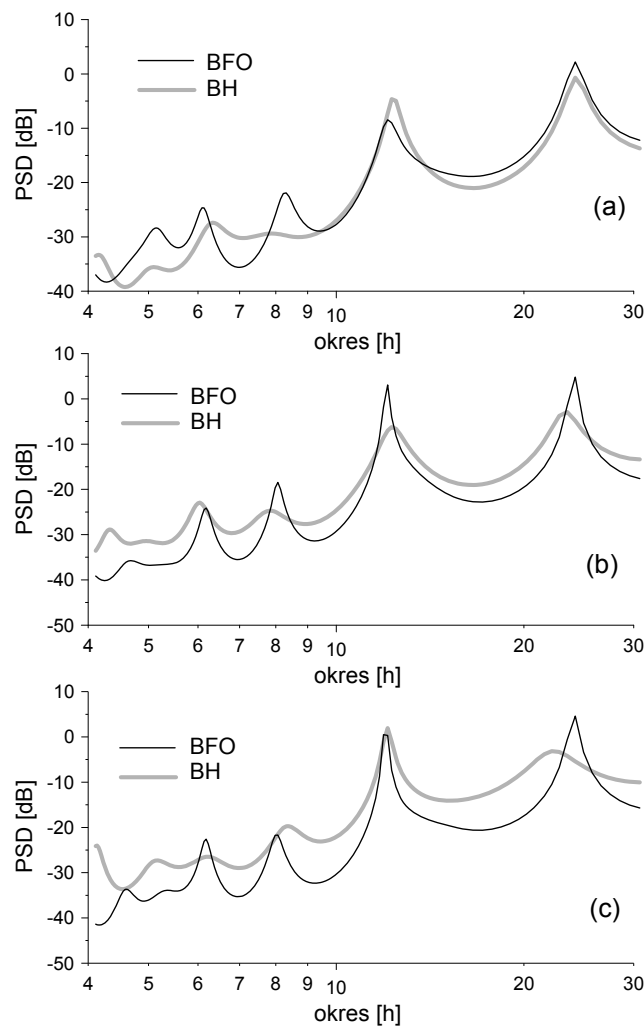
Wszystkie badane sygnały, niezależnie od instrumentu oraz dowiązania ich do skali czasu, wykazują te same cechy okresowości. Rysunek 4.4 wskazuje również, że sygnał uzyskany z grawimetru LCR-G zawiera informacje cenne dla analizy krótkookresowych zmian przyspieszenia siły ciężkości. Bardzo wartościowe dane dla takiej analizy uzyskuje się z obserwacji przy użyciu szerokopasmowego sejsmometru STS-1. Przykład residualnych zmian przyspieszenia siły ciężkości uzyskanych z STS-1 oraz ich charakterystyki widmowej są przedstawione na rysunku 4.5.



Rys. 4.5. Residua przyspieszenia siły ciężkości otrzymane z obserwacji sejsmometrem STS-1 w okresie 25 dni (a), 7 dni (b) oraz ich widmo (c)

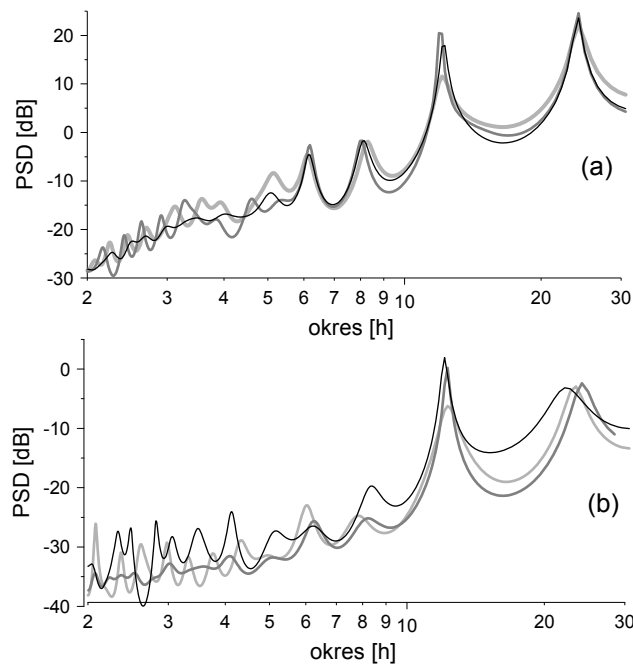
Wpływ długości serii czasowych na jakość oceny efektów krótkookresowych badano przy użyciu obserwacji grawimetrycznych z dwóch stacji pływowych: Black Forest Observatory (sprężynowy grawimetr pływowy LCR-ET19) i Bad Homburg Castle (grawimetr nadprzewodzący SG TT-40) (Zanimonskiy i Kryński, 2000b). Widma przebiegów ciągów czasowych residuów przyspieszenia siły ciężkości z obserwacji na tych stacjach, otrzymane na podstawie ciągów obserwacyjnych o długościach od kilkunastu do kilkudziesięciu dni, wskazują na wyraźną regularność w dziedzinie częstotliwości przebiegu residuów przyspieszenia siły ciężkości. Uzyskane wyniki potwierdzają przydatność kilkutygodniowych ciągów obserwacji grawimetrycznych do badania krótkookresowych zjawisk

geodynamicznych. Widma przebiegów różnych 10-dniowych ciągów czasowych residuów przyspieszenia siły ciężkości, zarówno z obserwacji grawimetrem LCR-ET19 w Black Forest Observatory, jak i grawimetrem nadprzewodzącym SG TT-40 w Bad Homburg Castle, charakteryzują się zgodnością wewnętrzną oraz wzajemnym podobieństwem (rys. 4.6 i 4.7). Podobieństwo to dotyczy, w szczególności, widm ciągów czasowych obserwacji z tych stacji w paśmie okresów dobowych, półdobowych, 8 h i 6 h (rys. 4.7).



Rys. 4.6. Widma przebiegów trzech różnych 10-dniowych ciągów czasowych residuów przyspieszenia siły ciężkości z obserwacji na stacjach pływowych Black Forest Observatory (BFO) i Bad Homburg Castle (BH)

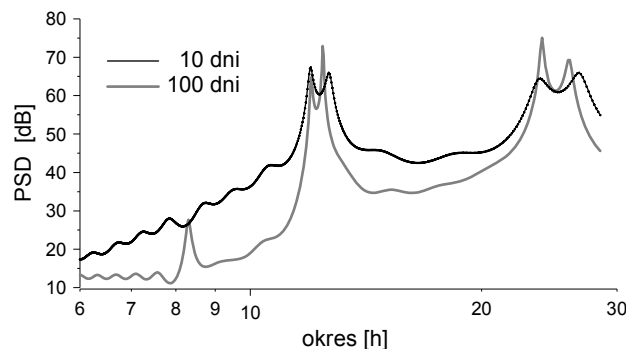
Mimo jakościowej przewagi grawimetru nadprzewodzącego nad grawimetrem sprężynowym, jakim jest grawimetr LCR-ET19, większa zgodność wewnętrzna oraz znacznie mniejsze zakłócenia w paśmie wysokich częstotliwości dają się zauważyć w widmach obserwacji pochodzących z grawimetru LCR-ET19 w Black Forest Observatory. Stanowisko tego grawimetru usytuowane jest głęboko pod ziemią, w pomieszczeniach dawnej kopalni, odizolowanych od wszelkich zakłóceń zewnętrznych. Aczkolwiek rozdzielczość widmowa tak krótkich ciągów czasowych nie pozwala na pełne rozdzielenie wzajemnie bliskich częstotliwości, np. w pasmach dobowym i półdobowym (rys. 4.8), to jednak uwypukla ona wysokie częstotliwości, które nie są reprezentowane w istniejących modelach pływowych z poprawkami regionalnymi (rys. 4.6). Analiza krótkich ciągów obserwacji przyspieszenia siły ciężkości może zatem stać się narzędziem do modelowania lokalnych zjawisk geodynamicznych i do udoskonalania modeli pływowych.



Rys. 4.7. Widmo residuów przyspieszenia siły ciężkości obliczonych z obserwacji LCR-ET19 w Black Forest Observatory (a) i SG TT-40 w Bad Homburg Castle (b) dla trzech 10-dniowych zbiorów obserwacji

Z porównania widm uzyskanych dla ciągów obserwacyjnych z dwóch różniących się klasą grawimetrów (rys. 4.7a, 4.7b) wynika, że obserwacje z obu grawimetrów mogą być wykorzystane do badania zmienności przyspieszenia siły ciężkości. Lepszy poziom rozdzielności bliskich sobie częstotliwości zapewnia jednak analiza ciągów czasowych wygenerowanych z obserwacji grawimetrem nadprzewodzącym (rys. 4.8). Rozdzielczość widmowa zależy nie tylko od rozdzielczości czasowej, ale i od długości ciągu czasowego, na podstawie którego obliczane jest widmo. Na rysunku 4.8 przedstawiono widma uzyskane z maksymalną rozdzielczością, jaką zapewnia użyta metoda autoregresji dla ciągów czasowych o długościach 10 dni i 100 dni. Widmo otrzymane z opracowania 100-dniowego ciągu obserwacyjnego charakteryzuje się wyraźnie większą rozdzielnością spektralną. Uzyskane w pracy wyniki wskazują na to, że im dłuższe są ciągi czasowe obserwacji grawimetrycznych, tym wzajemnie bliższe stają się widma (w zakresie pojedynczych dób) ciągów obserwacji z pływowego grawimetru sprężynowego LCR-ET i grawimetru nadprzewodzącego SG (Zanimonskiy i Kryński, 2000a).

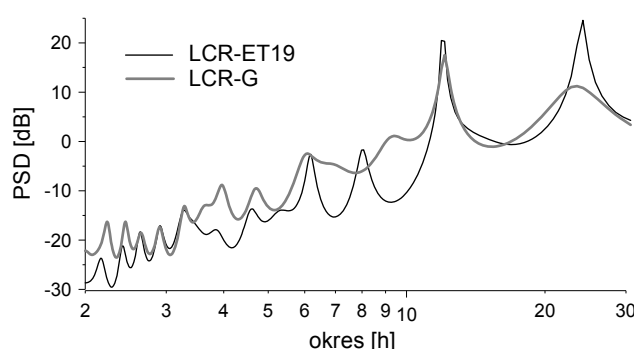
Przeprowadzone eksperymenty pozwalają wnioskować, że do wyznaczenia efektów krótkookresowych w zmianach przyspieszenia siły ciężkości, w przeciwieństwie do klasycznych metod opracowywania danych ze stacji pływowych, wystarczy analiza krótkich serii obserwacji (rys. 4.6, 4.7 i 4.8) (Zanimonskiy i Kryński, 2000b).



Rys. 4.8. Widma przebiegów ciągów czasowych przyspieszenia siły ciężkości z obserwacji na stacji pływowej Bad Homburg Castle

Wykorzystując koncepcję Melchiora (1983), dotyczącą wykorzystania grawimetrów polowych do monitorowania efektu pływowego, badano przydatność danych grawimetrycznych, rejestrowanych w sposób ciągły przy użyciu grawimetru polowego LCR-G, do analizowania krótkookresowych zmian przyspieszenia siły ciężkości. Badanie przeprowadzono, porównując

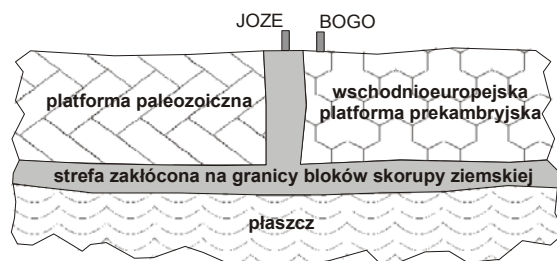
widma ciągów obserwacyjnych otrzymanych z grawimetrów LCR-G i LCR-ET. Charakterystykę widmową 12-dniowych sygnałów z grawimetrów LCR-ET (Black Forest Observatory) oraz LCR-G (Borowa Góra) dla okresów od 2 h do 30 h przedstawiono na rysunku 4.9.



Rys. 4.9. Widma residuów przyspieszenia siły ciężkości obliczone z 12-dniowych ciągów obserwacji grawimetrami LCR – pływowym i połowym

Wyniki przedstawione na rysunku 4.9 potwierdzają użyteczność danych z grawimetru LCR-G do analizy regularnych zmian przyspieszenia siły ciężkości na podstawie krótkich ciągów obserwacyjnych.

Obliczone na podstawie obserwacji, wykonanych na różnych stacjach i w różnych epokach, ciągi czasowe residuów przyspieszenia siły ciężkości zawierają wyrazy o okresach od 3 h do 24 h 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. 4.10).



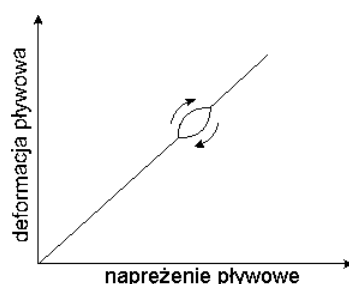
Rys. 4.10. Uproszczony schemat lokalnej litosfery

Jak wykazują badania sejsmiczne, struktura skał w strefie zakłóceń, w postaci sąsiadujących ze sobą utwardzonych skalnych elementów, różni się pod względem własności mechanicznych od struktury skał tworzących platformę skorupy ziemskiej. W strefie tej mogą, w szczególności, rządzić własności nieliniowej mezoskopowej elastyczności materiałów. Taki rodzaj elastyczności cechuje skały pochodzenia wulkanicznego i skały przeobrażone. Występujące w skałach skaży i pęknięcia wpływają na własności mechaniczne tych skał, w szczególności na ich elastyczną reakcję (Guyer i Johnson, 1999). W pracy tej wykazano zgodność modeli nieliniowych quasi-statycznych zależności między siłami i naprężeniami w skałach, w pasmach częstotliwości wokół 10^3 Hz (pasmo dźwiękowe) i wokół 1 Hz (pasmo sejsmiczne), z danymi eksperymentalnymi.

Grawitacyjne oddziaływanie Księżyca i Słońca na Ziemię, wywołujące efekt pływowy, powoduje okresową zmienność naprężeń w warstwach litosfery, w szczególności w strefie zakłóconej, znajdującej się między skorupą i płaszczem Ziemi. 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.

Skorupę ziemską można w tym znaczeniu uważać za warstwę elastyczną, deformowaną poprzez efekt pływowy płaszcza. Główna część efektu pośredniego w obserwowanym sygnale przyspieszenia siły ciężkości odpowiada elastycznej deformacji układu płaszcz–skorupa. Co więcej, skorupa ziemską zawiera skonsolidowany materiał, którego zasadnicze właściwości fizyczne wynikają z samego procesu jego tworzenia. Zastosowana w niniejszej pracy koncepcja modelu empirycznego tego zjawiska oparta jest na koncepcji modelowania nieliniowości (Guyer i Johnson, 1999), lecz odniesiona do pasma pływowego (wokół 10^{-5} Hz).

Określony jest w niej empiryczny model składającej się ze skalnych elementów warstwy, której reakcja na siły zewnętrzne przyjmuje formę histerezy. W strefie zakłóconej, znajdującej się między skorupą i płaszczem Ziemi, łączna reakcja dużej ilości takich elementów na naprężenia pływowe może być przedstawiona w postaci pętli histerezy (rys. 4.11).

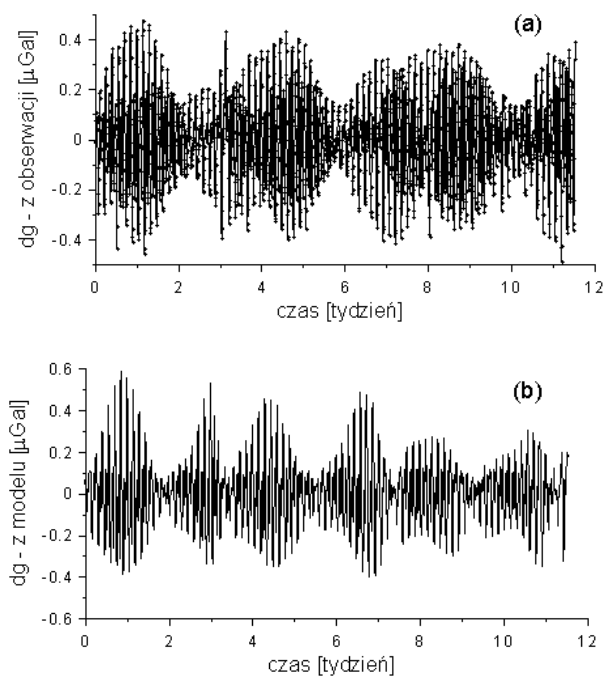


Rys. 4.11. Model reakcji Ziemi na efekt pływowy

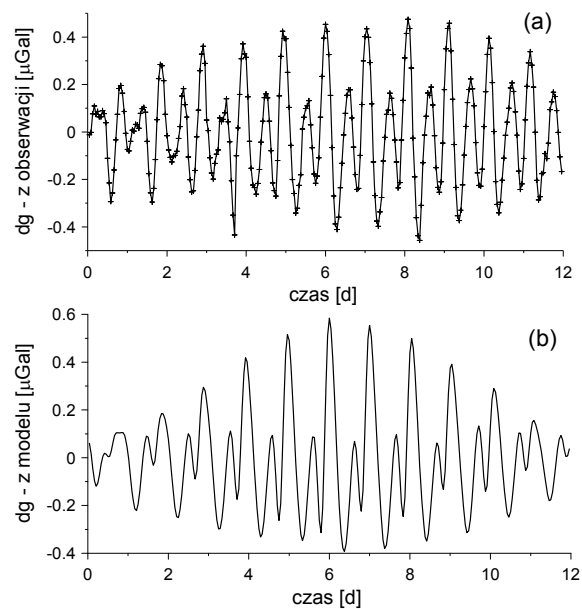
W opisie właściwości sprężystych Ziemi dominującą rolę odgrywają elementy liniowe. W celu weryfikacji hipotezy o istnieniu pływowej histerezy opracowano ciągi czasowe residuów przyspieszenia siły ciężkości z uwzględnieniem pętli histerezy. Położenie pętli histerezy odpowiada charakterowi deformacji Ziemi, potraktowanej jako układ podlegający zniekształceniom mechanicznym. W opracowaniu przyjęto, że zmiany przyspieszenia siły ciężkości obliczone np. przy użyciu programu ETERNA są w pierwszym przybliżeniu proporcjonalne do naprężeń pływowych. Przykłady wyników obliczeń dla obserwacji grawimetrycznych z Black Forest Observatory przedstawiono na rysunkach 4.12 i 4.13. W tych przykładach położenie pętli histerezy odpowiadało momentowi przejścia naprężeń pływowych od ściskających do rozciągających.

Zainteresowanie strukturą geologiczną litosfery w otoczeniu Warszawy, gdzie znajdują się dwa obserwatoria: Borowa Góra i Józefosław (rys. 4.10), uwidocznione jest w licznych opracowaniach naukowych. W szczególności pewne modele własności geodynamicznych rejonu obserwatorium w Józefosławiu zostały omówione w związku z analizą obserwacji grawimetrycznych wykonanych na tej stacji (Ząbek et al., 2002). Wyraźne sezonowe zmiany przyspieszenia siły ciężkości, stwierdzone na podstawie powtarzanych wielokrotnie pomiarów przy użyciu grawimetru balistycznego ZZG, są interpretowane w oparciu o hipotezę o okresowych zmianach własności geologicznych w skałach strefy zakłóconej (strefa Teisseyre'a-Tornquista) między dwoma blokami skorupy ziemskiej.

Przebiegi ciągów czasowych residuów przyspieszenia siły ciężkości, wygenerowanych na podstawie obserwacji ze stacji Black Forest Observatory z okresu 12 tygodni i 12 dni oraz obliczonych z modelu, przedstawiono odpowiednio na rysunkach 4.12 i 4.13.

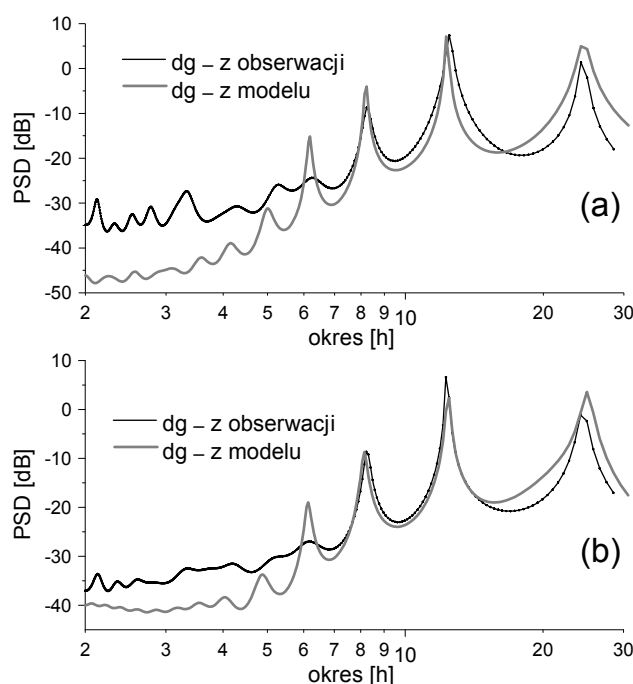


Rys. 4.12. 12-tygodniowy ciąg czasowy residuów przyspieszenia siły ciężkości dg dla stacji Black Forest Observatory: obliczony z obserwacji (a), obliczony z modelu (b)



Rys. 4.13. 12-dniowy ciąg czasowy residuów przyspieszenia siły ciężkości dg dla stacji Black Forest Observatory: obliczony z obserwacji (a), obliczony z modelu (b)

Na rysunkach 4.14a i 4.14b przedstawiono widma residuów przyspieszenia siły ciężkości, uzyskane odpowiednio z 10- i 100-dniowych ciągów obserwacyjnych ze stacji Black Forest Observatory oraz z modeli (Zanimonskiy i Kryński, 2000a).



Rys. 4.14. Widma residuów przyspieszenia siły ciężkości dg ze stacji Black Forest Observatory i z modeli, uzyskane dla 10-dniowych ciągów obserwacyjnych (a) i 100-dniowych ciągów obserwacyjnych (b)

Porównanie wykresów (a) i (b) na rysunku 4.14 wskazuje na bardzo bliskie podobieństwo przebiegów widm residuów przyspieszenia siły ciężkości, a także widm ich modeli dla 10-dniowych i 100-dniowych ciągów obserwacyjnych. Rozdzielczość widmowa na rysunku 4.14 nie dorównuje jakości rozdzielczości uzyskanej na podstawie analizy obserwacji ze stacji Bad Homburg Castle (rys. 4.8). Dla modelowania histerezy pływowej istotne jest jednak wydzielenie głównych pasm widmowych, tj. 24 h, 12 h, 8 h i 6 h. Przy weryfikacji modeli, która polega na sprawdzeniu podobieństwa widm w głównych pasmach, zakłócenia widmowe wokół okresów 24 h i 12 h nie odgrywają istotnej roli.

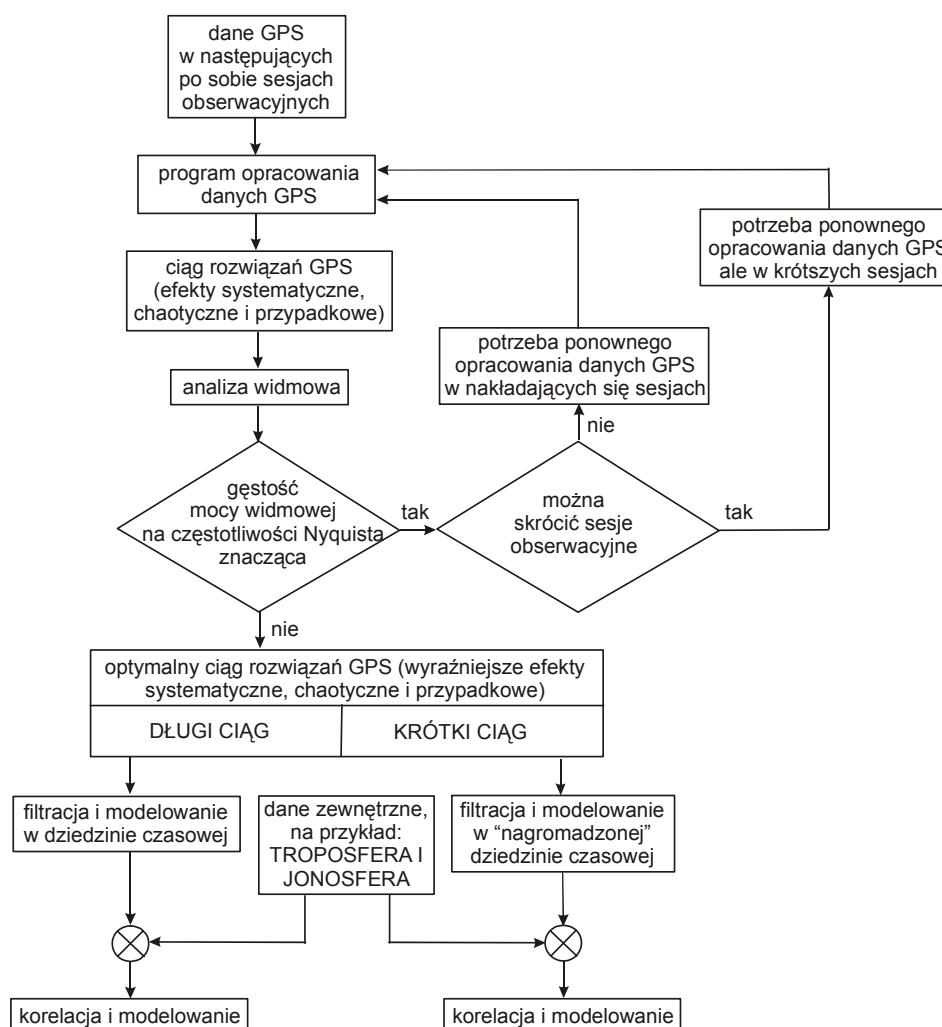
5. METODYKA TWORZENIA CIĄGÓW ROZWIĄZAŃ GPS POD KĄTEM MOŻLIWOŚCI BADANIA EFEKTÓW KRÓTKOOKRESOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM WZAJEMNYCH KORELACJI

W przypadku rozłącznych, następujących po sobie sesji obserwacji GPS, używanych do generowania kolejnych rozwiązań GPS, długość sesji obserwacyjnych określa rozdzielczość czasową ciągu rozwiązań. Badanie krótkookresowych zmian współrzędnych wektorów wyznaczonych z obserwacji GPS wymaga wygenerowania ciągów rozwiązań GPS o odpowiedniej rozdzielczości czasowej i odpowiedniej dokładności. Istotną rolę w tworzeniu takich ciągów odgrywa wybór długości sesji obserwacyjnej użytej do uzyskania rozwiązań GPS. Do badania zmienności ciągów rozwiązań GPS niezbędne jest określenie optymalnej³ długości sesji obserwacyjnej, między innymi z uwagi na skokowe zmiany w rozwiązaniach GPS, spowodowane pojawianiem się nowych satelitów nad horyzontem oraz schodzeniem śledzonych satelitów poniżej horyzontu. Wydłużanie sesji obserwacyjnej niekoniecznie prowadzi do określenia jej optymalnej długości. Wydłużaniu sesji obserwacyjnej towarzyszy wzrost dokładności wewnętrznej rozwiązania GPS, ale również wzrost efektu rozmycia spektralnego. Wraz z wydłużaniem sesji obserwacyjnej zmniejsza się zatem niepewność oszacowania rozwiązania GPS i jednocześnie zmniejszeniu ulega częstotliwość Nyquista⁴. Suma tych dwóch, wzajemnie przeciwstawnych efektów zależy również od widma szumu i widma samego sygnału. Zwiększenie częstotliwości Nyquista można osiągnąć poprzez użycie częściowo nakładających się sesji obserwacyjnych zamiast skracania wzajemnie rozdzielnych sesji. Korelacja towarzysząca ciągom czasowym rozwiązań GPS, uzyskanych z opracowania nakładających się sesji obserwacyjnych, jest znacznie mniejsza od odpowiadającej klasycznym ciągom czasowym o charakterze losowym. Dla przykładu, współczynnik korelacji w ciągu czasowym rozwiązań GPS uzyskanych z opracowania sesji obserwacyjnych z 87% nakładką kształtuje się na poziomie 0.5 podczas gdy odpowiedni współczynnik dla szerokopasmowego procesu losowego przekracza 0.8 (Kryński et al., 2002a).

³ W niniejszej pracy pojęcia optymalności i optymalizacji nie są używane w ścisłym sensie matematycznym, kiedy to wymagane jest określenie odpowiednich kryteriów. Są one stosowane w znaczeniu „jak w najlepszy sposób wykorzystać dostępne dane” (Moritz, 1980).

⁴ Najwyższa częstotliwość składowej sygnału, którą można określić w wyniku próbkowania z zadaną częstotliwością nazywana jest częstotliwością Nyquista. Częstotliwość Nyquista zdefiniowana jest jako połowa częstotliwości próbkowania (Ozimek, 1985).

Materiał obserwacyjny gromadzony na stacjach permanentnych GPS doskonale nadaje się do wykorzystania do analiz jakościowych rozwiązań GPS w oparciu o badania ich ciągów czasowych. Dostępność długich ciągów obserwacji GPS ze stacji permanentnych GPS, np. stacji sieci EPN, umożliwia generowanie ciągów czasowych rozwiązań GPS o różnej rozdzielczości czasowej, różnym poziomie korelacji i różnych stopniach wygładzenia.



Rys. 5.1. Schemat strategii detekcji i modelowania efektów systematycznych w rozwiązaniach GPS

Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji rozdzielczości czasowej ciągów 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 ciągu czasowego rozwiązań poprzez ewentualne opracowywanie częściowo nakładających się sesji obserwacyjnych. Opracowaną strategię detekcji i modelowania efektów systematycznych w rozwiązaniach GPS przedstawiono schematycznie na rysunku 5.1 (Krynski i Zanimonskiy, 2002a).

Rozdzielczość czasowa ciągów rozwiązań GPS jest określona gęstością próbkowania, która w przypadku opracowywania bezpośrednio następujących po sobie rozdzielnych sesji obserwacyjnych odpowiada długości pojedynczej sesji. Im dłuższe są opracowywane sesje obserwacyjne, tym bardziej wygładzone uzyskuje się rozwiązanie GPS i tym gładzy jest ciąg czasowy wygenerowany z rozwiązań GPS. W procesie wygładzania następuje naturalnie zmniejszenie efektu błędów przypadkowych; jednocześnie ulega redukcji wpływ okresowych błędów systematycznych. Rozwiązania GPS otrzymane z opracowania krótszych sesji obserwacyjnych są obciążone zatem większymi błędami systematycznymi aniżeli rozwiązania GPS oparte na dłuższych sesjach obserwacyjnych. Badanie błędów systematycznych rozwiązań GPS na podstawie analizy ich ciągów czasowych wymaga od tych ciągów odpowiedniej rozdzielczości czasowej. Stąd wskazane jest analizowanie ciągów czasowych rozwiązań GPS uzyskanych z opracowania krótkich sesji obserwacyjnych, mimo faktu, iż rozwiązania z krótszych sesji obserwacyjnych obciążone są większym szumem. Skracanie sesji obserwacyjnych ograniczone jest jednak warunkami rozwiązywalności wektorów, co generalnie wiąże się z ich długością. Poprzez opracowywanie częściowo nakładających się na siebie sesji obserwacyjnych uzyskuje się zwiększenie rozdzielczości czasowej ciągów rozwiązań GPS.

Skracanie opracowywanych sesji obserwacyjnych i/lub opracowywanie wzajemnie nakładających się sesji (różnica pomiędzy początkami następujących po sobie sesji jest krótsza od długości opracowywanych sesji) prowadzi zatem do zwiększenia rozdzielczości czasowej ciągów rozwiązań GPS. Koncepcja nakładających się sesji znajduje zastosowanie w opracowywaniu danych w postaci ciągów czasowych. Wady i zalety tej koncepcji są dyskutowane w literaturze (np. Harris, 1978; Nuttall and Carter, 1982; Webley et al., 2002). Wraz ze wzrostem nakładki zwiększeniu ulega rozdzielczość czasowa ciągu oraz wzrasta stopień wykorzystania informacji wyjściowej; jednocześnie następuje wzrost korelacji między wyznaczanymi parametrami. Zwiększenie korelacji nie stanowi istotnego problemu w badaniach charakteru zmienności przebiegu ciągów czasowych; korelacje należy jednak uwzględnić przy wyznaczaniu parametrów statystycznych, np. średniego błędu wartości średniej. Użycie ciągów czasowych rozwiązań GPS,

opartych na nakładających się sesjach obserwacyjnych, umożliwia skuteczną detekcję efektów chaotycznych oraz oddzielenie ich od efektów o charakterze systematycznym. W procesie tworzenia optymalnego ciągu rozwiązań GPS o wymaganej rozdzielczości czasowej jako wskaźnik do dalszego skracania sesji lub rozpoczęcia opracowywania sesji z nakładką może być wykorzystana gęstość mocy spektralnej na częstotliwości Nyquista. Za optymalny do badania konkretnych błędów systematycznych ciąg czasowy rozwiązań GPS uważany jest ciąg o optymalnej rozdzielczości czasowej i otrzymany z opracowania sesji obserwacyjnych o optymalnej długości. Z takiego ciągu wyraźnie dają się wyodrębnić efekty okresowe oraz efekty o charakterze chaotycznym. Optymalny ciąg rozwiązań GPS jest zatem ciągiem czasowym odpowiednim do wykrywania i modelowania systematycznych efektów okresowych w tych rozwiązaniach. Długie ciągi 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 ciągów czasowych. Aby mogły być one wykorzystane do modelowania systematycznych efektów okresowych należy dokonać ich złożenia (*stacking*) i uśrednienia w odpowiednio wybranych interwałach czasowych, np. 24 h, co odpowiada filtracji szumów. Modele wygenerowane z odpowiednio opracowanych ciągów czasowych rozwiązań GPS mogą być w dalszej kolejności porównane, przy wykorzystaniu analizy korelacyjnej, z ciągami czasowymi danych zewnętrznych, np. parametrami troposfery lub jonosfery, w celu rozdzielenia błędów systematycznych i określenia ich źródeł.

Prace nad zastosowaniem ciągów czasowych z nakładką do analizowania krótkookresowych zmienności rozwiązań GPS prowadzone są niezależnie w kilku ośrodkach badawczych na świecie. Przykładowo, w procesie analizy ciągów czasowych rozwiązań GPS dla wektora Hartebeesthoek (HRAO) – Sutherland (SUTH) w RPA najlepsze wyniki uzyskano w przypadku użycia 4 h sesji obserwacyjnych z 3.5 h nakładką (Neumeyer et al., 2002).

Ścisła analiza ciągów rozwiązań GPS uzyskanych z opracowania nakładających się sesji obserwacyjnych wymaga modyfikacji istniejących pakietów oprogramowania, polegającej na dołączeniu do nich dodatkowych narzędzi służących do oceny statystycznej skorelowanych danych. Procedury te są znacznie bardziej złożone aniżeli dostępne w klasycznych oprogramowaniach statystycznych. Swoboda manewru użytkownika programu do opracowywania danych GPS jest ograniczona do wyboru parametrów i ewentualnie wyboru oprogramowania. Doświadczenie pozwala użytkownikowi dokonać wyboru odpowiednich parametrów, a także skorzystać z odpowiedniej strategii opracowania obserwacji GPS (oprogramowanie naukowe, np. Bernese, lub nawet oprogramowanie

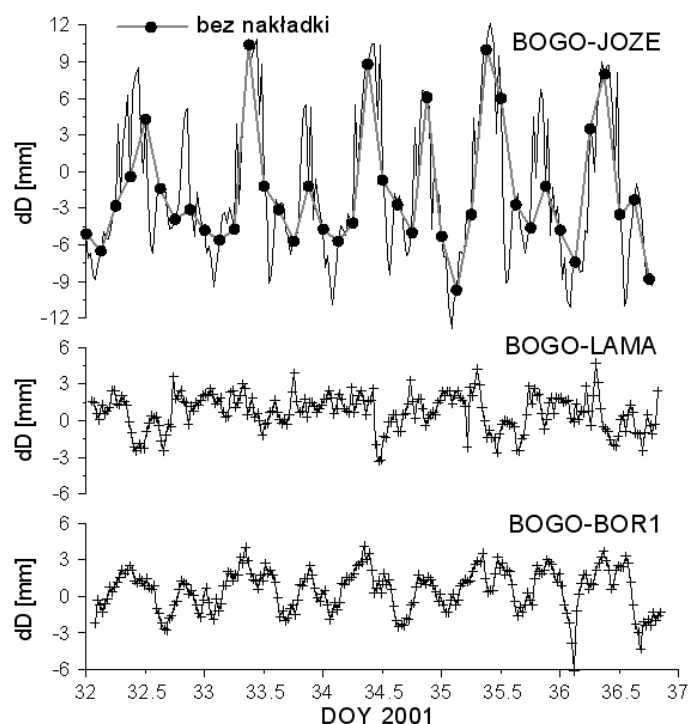
komercyjne, np. Pinnacle). Dalsze opracowanie rozwiązań GPS jest w zasadzie rutynowym zadaniem analizy statystycznej.

Ciąg czasowy rozwiązań GPS nie odzwierciedla dokładnie procesu o charakterze losowym. Proces reprezentowany przez ten ciąg jest podobny do superpozycji procesów wygenerowanych przez generatory liczb losowych, liczb chaotycznych oraz przebiegów okresowych i wielomianowych (Kryński et al., 2002a). W przypadku procesów losowych współczynnik autokorelacji statystyk z nakładających się segmentów zmiennych losowych pozostaje w niemal liniowej zależności ze stopniem pokrycia się tych segmentów. Z przeprowadzonej w niniejszej pracy analizy ciągów czasowych rozwiązań GPS, uzyskanych z opracowania nakładających się sesji obserwacyjnych, wynika, że współczynnik autokorelacji statystyk tych rozwiązań maleje znacznie szybciej, niż wynikałoby to ze zmniejszania się stopnia pokrycia sesji. Co więcej, zmiany współczynnika autokorelacji są nieregularne.

Już pierwsze badania ciągów czasowych rozwiązań GPS otrzymanych z nakładających się sesji obserwacyjnych ze stacji permanentnych sieci EPN dostarczyły obiecujących wyników. Wskazały one na możliwość wydzielenia okresowych zmian składowych wektora oraz na rozdzielenie efektów wywołanych zmianami konfiguracji satelitów GPS o podstawowym okresie równym dobie gwiazdowej (Kryński i Zanimonskiy, 2001a) od efektów wywołanych zmianami parametrów meteorologicznych (Kryński i Zanimonskiy, 2001b) i zmianami w stanie jonosfery (Kryński i Zanimonskiy, 2002a) o okresie równym dobie słonecznej.

Zalety stosowania ciągów czasowych rozwiązań GPS, otrzymanych z nakładających się sesji obserwacyjnych, do analizowania okresowych błędów systematycznych potwierdzają przeprowadzone eksperymenty numeryczne z wykorzystaniem ciągów rozwiązań GPS dla kilku wektorów opartych na krajowych stacjach EPN. Na rysunku 5.2 przedstawiono ciągi czasowe rozwiązań długości wektorów BOGO-JOZE (42 km), BOGO-LAMA (159 km) i BOGO-BOR1 (271 km) otrzymanych z opracowania programem Bernese v.4.2 3 h sesji obserwacyjnych z okresu 5 dni z nakładką 2.5 h.

Dla wektora BOGO-JOZE, dla którego amplituda zmienności jest największa, pokazano również przebieg ciągu czasowego rozwiązań długości opartych na 3 h nie nakładających się sesjach obserwacyjnych. Z porównania dwóch ciągów czasowych dla tego wektora natychmiast wynika, że zwiększając poprzez zastosowanie nakładki rozdzielczość czasową, uzyskuje się wyraźniejszy obraz okresowych błędów systematycznych w rozwiązaniach i jednocześnie zmniejszone zostają dudnienia sygnału.

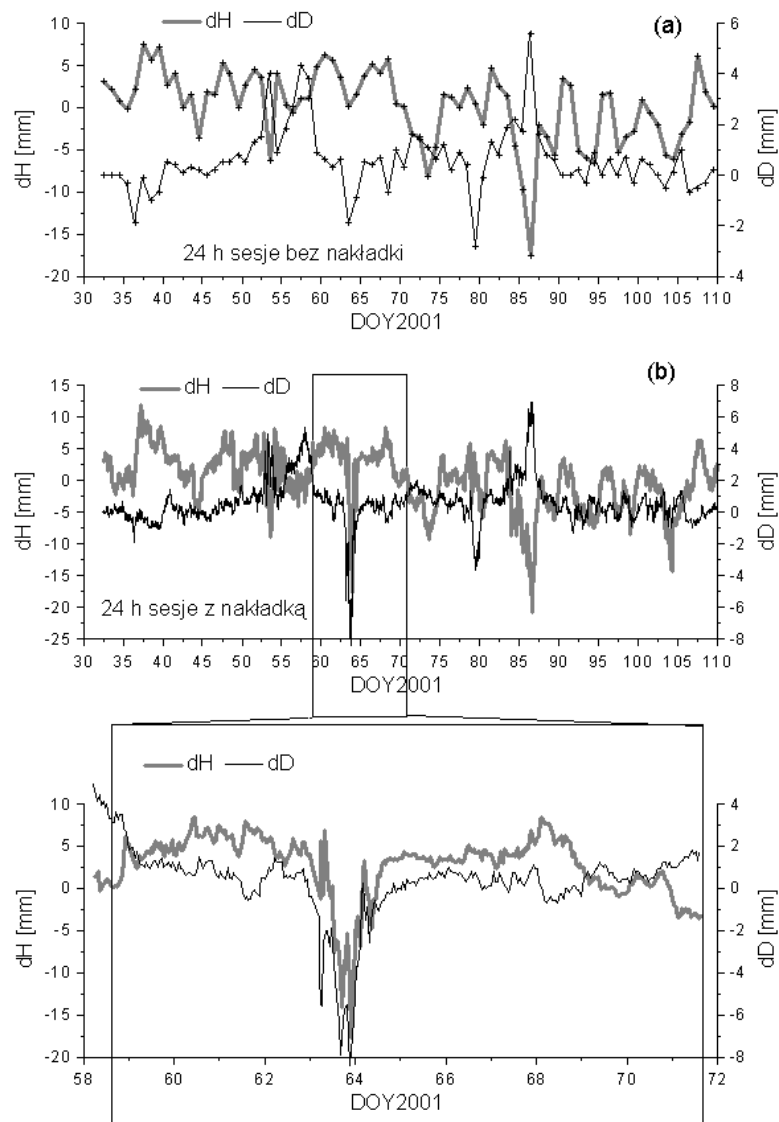


Rys. 5.2. Ciągi czasowe rozwiązań długości wektorów BOGO-JOZE, BOGO-LAMA i BOGO-BOR1 otrzymanych z opracowania 3h sesji obserwacyjnych z nakładką 2.5 h

Użyteczność ciągów czasowych rozwiązań GPS z nakładką badano także, analizując 120-dniowe ciągi składowych wektorów opartych na stacjach EPN: BOGO, BOR1, JOZE i LAMA, uzyskanych z opracowania 24 h sesji. Na rysunku 5.3 przedstawiono ciągi czasowe rozwiązań składowej wysokościowej oraz długości wektora BOGO-JOZE otrzymanych z opracowania programem Bernese v.4.2 24 h sesji obserwacyjnych bez nakładki oraz z nakładką 23 h.

Zakłócenia w rozwiązaniach GPS dla wektorów opartych na stacjach EPN: BOGO, BOR1, JOZE i LAMA uzyskanych z opracowania 24 h sesji obserwacyjnych spowodowane efektami niemodelowanymi są znacznie wyraźniejsze w ciągu czasowym otrzymanym z opracowania sesji obserwacyjnych z nakładką (23 h) (rys. 5.3b) aniżeli w ciągu bez nakładki (rys. 5.3a). Względnie duże zakłócenie w rozwiązaniach GPS, jakie nastąpiło w okolicy 64 dnia 2001 roku (górny wykres rys. 5.3b), przedstawione w powiększeniu na dolnym wykresie rysunku 5.3b, praktycznie jest niezauważalne w przebiegu ciągu czasowego otrzymanego z opracowania sesji bez nakładki (Krynski i Zanimonskiy, 2002a). Zmienność rozwiązań GPS w rejonie tego zakłócenia nie ma charakteru losowego. Zwiększenie

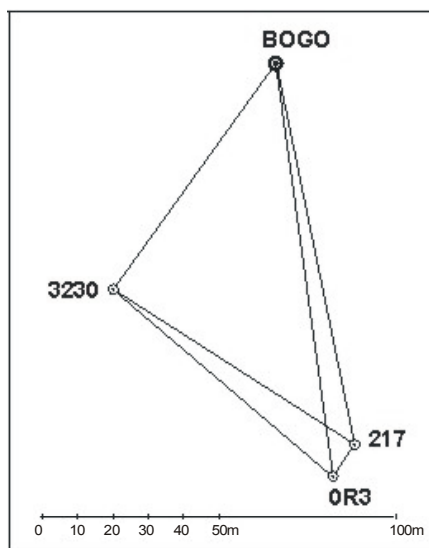
rozdzielczości czasowej ciągu rozwiązań umożliwia detekcję zakłóceń i ewentualnych „grubych błędów”. Ułatwia ono również uzupełnianie luk w ciągach czasowych, co niekiedy jest konieczne, aby możliwe stało się użycie narzędzi analizy spektralnej.



Rys. 5.3. Ciągi czasowe rozwiązań składowej wysokościowej oraz długości wektora BOGO-JOZE otrzymanych z opracowania 24 h sesji obserwacyjnych bez nakładki (a) oraz z nakładką 23 h (b)

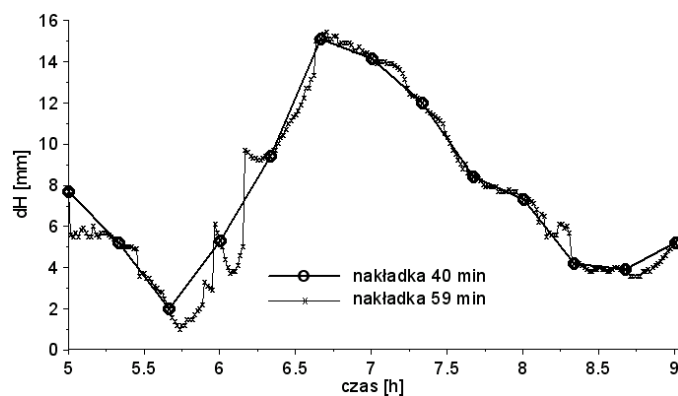
Zaobserwowane zakłócenie przebiegu ciągu czasowego w okolicy 64 dnia 2001 roku może być potraktowane jako zjawisko losowe. Jego lokalizacja w skali przestrzenno-czasowej odpowiada burzy jonosferycznej przewidzianej w prognozie zakłóceń geomagnetycznych IPS. Efekt tej burzy nie został usunięty z obserwacji w procesie modelowania jonosfery za pomocą standardowo używanego przy opracowywaniu obserwacji GPS programem Bernese v.4.2 modelu jonosfery w postaci warstwy pojedynczej. Podany przykład potwierdza, iż zwiększenie rozdzielczości czasowej ciągu rozwiązań zwiększa możliwość rozdzielenia efektów o charakterze regularnym od efektów o charakterze losowym.

Podobne eksperymenty numeryczne zostały przeprowadzone przy użyciu materiału obserwacyjnego zgromadzonego na punktach mikrosieci w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym w Borowej Górze (rys. 5.4) podczas 5-dniowej kampanii obserwacyjnej we wrześniu 2000 roku (Krynski i Zanimonski, 2002a).

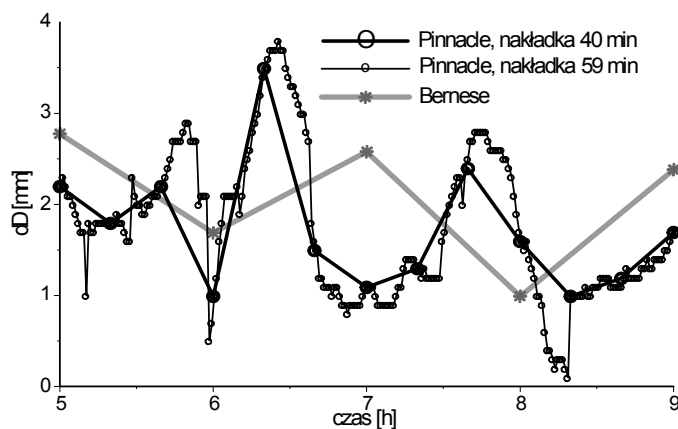


Rys. 5.4. Testowa mikrosieć w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym w Borowej Górze

Na rysunkach 5.5 i 5.6 przedstawiono przebieg krótkiego ciągu czasowego rozwiązań składowej wysokościowej i długości wektora BOGO-0217 (107 m) uzyskanych z opracowania 1 h sesji obserwacyjnych z nakładką 40 minut oraz z nakładką 59 minut, przy użyciu programu Pinnacle, a na rysunku 5.6 dodatkowo także wyniki uzyskane przy pomocy programu Bernese v.4.2 dla 1 h sesji, bez nakładki.



Rys. 5.5. Płynne i skokowe zmiany składowej wysokościowej krótkiego wektora (107 m) w ciągach rozwiązań GPS o różnej rozdzielczości czasowej



Rys. 5.6. Płynne i skokowe zmiany długości krótkiego wektora (107 m) w ciągach rozwiązań GPS o różnej rozdzielczości czasowej

Przebiegi zmienności rozwiązań krótkiego wektora w składowej wysokościowej i długości wektora, przedstawione odpowiednio na rysunkach 5.5 i 5.6, odzwierciedlają (podobnie jak i składowych poziomych) oddziaływanie zmienności konfiguracji satelitów na rozwiązanie GPS. Oddziaływanie to odbywa się za pośrednictwem warunków geometrycznych rozwiązania, jakości rozwiązania nieoznaczoności, efektów wielotorowości oraz błędów w określeniu środka fazowego anteny.

Wynik eksperymentu potwierdza, że dzięki zwiększeniu rozdzielczości czasowej ciągu rozwiązań możliwe jest wykrycie efektów o charakterze chaotycznym. Na wykresach (rys. 5.5 i 5.6) przebiegów rozwiązań z nakładką 59 minut efekty te uwidaczniają się w postaci gwałtownych skoków.

Zaobserwowany w rozwiązaniach krótkich wektorów (o długości rzędu 100 m) efekt zmienności konfiguracji satelitów, w tym efekt wielotorowości, wystąpił także wyraźnie w rozwiązaniach dłuższych wektorów o jednym końcu na stacji BOR1, drugim zaś na punktach mikrosieci w Borowej Górze, tj. BOGO, 0217, 00R3 i 3230 (długość 271 km). Wektory te obliczono na podstawie 4 h sesji z 3 h nakładką, wykorzystując obserwacje 5-dniowej kampanii obserwacyjnej w sierpniu 2001 roku. Porównanie ciągów czasowych rozwiązań GPS dla poszczególnych wektorów można wykorzystać do wyznaczenia efektu wielotorowości (Krynski et al., 2001).

Opracowana metodyka tworzenia ciągów zmian współrzędnych wektorów pod kątem możliwości wykrywania, rozdzielania i modelowania efektów krótkookresowych może być stosowana do wyznaczania błędów z tytułu wielotorowości oraz w określaniu środka fazowego anteny na stacjach permanentnych GPS.

6. WIARYGODNOŚĆ OCENY DOKŁADNOŚCI WYZNACZANIA POZYCJI Z POMIARÓW GPS

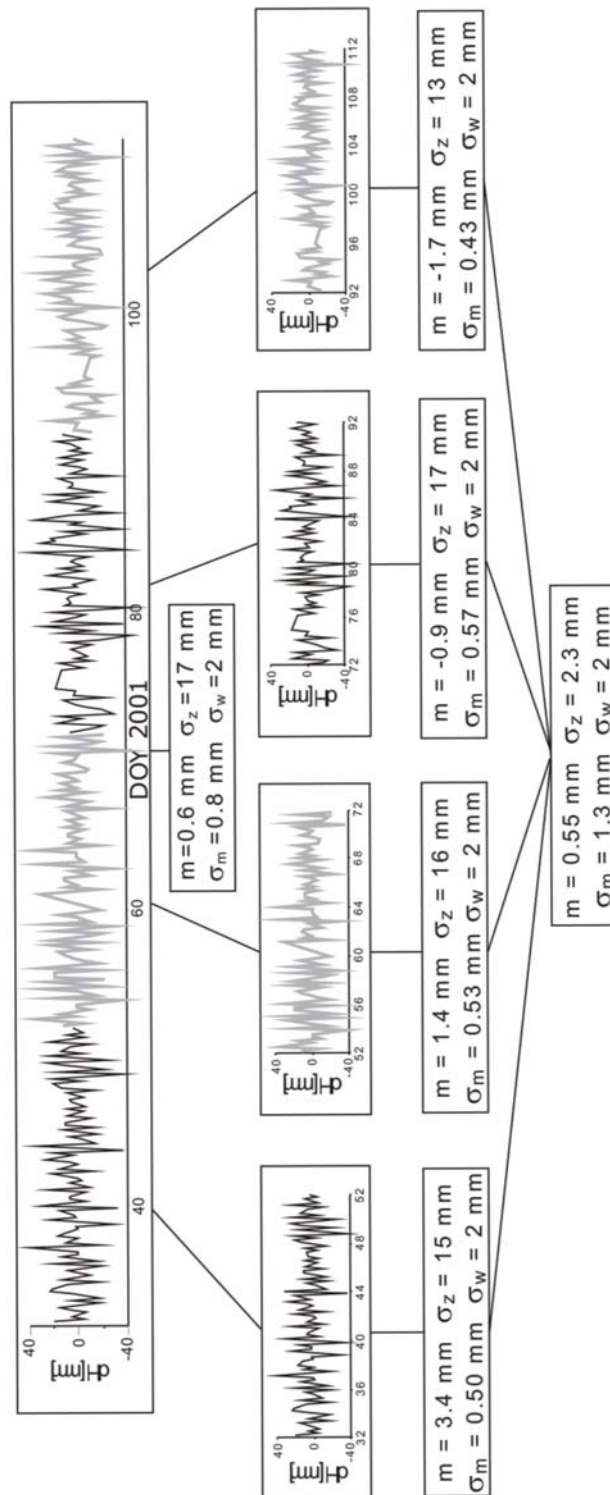
Ocena dokładności składowych wektorów wyznaczanych z opracowania obserwacji GPS, towarzysząca wynikom obliczeń uzyskiwanych zarówno przy użyciu programów komercyjnych, jak i naukowych, odzwierciedla bardziej ocenę spójności wewnętrznej opracowywanych danych aniżeli rzeczywistą dokładność pozycjonowania (np. Gandolfi et al., 2003). W ocenie tej pozostają nieuwzględnione liczne krótkookresowe błędy systematyczne, łącznie z błędami modelowania obserwacji GPS, o niekiedy niestabilnych amplitudach. Stąd ocena dokładności dostarczana na wyjściu programów opracowania obserwacji GPS jest zazwyczaj zbyt optymistyczna. Rozwiązania dla składowych wektorów lub współrzędnych stacji otrzymywane z opracowania różnych sesji obserwacji GPS, w szczególności sesji o jednakowych długościach, charakteryzują się znacznie większą zmiennością, aniżeli wynikałoby to z oceny dokładności tych rozwiązań. Niezawodność w ocenie dokładności wyznaczania pozycji przy wykorzystaniu techniki GPS jest niezwykle istotna w praktyce geodezyjnej, a także w pomiarach dla celów geodynamicznych. W rutynowym opracowaniu danych GPS uzyskuje się jedno rozwiązanie z sesji obserwacyjnej. Dane z pojedynczej sesji mogą jednak być reprezentowane przez ciąg nakładających się, krótszych sesji obserwacyjnych. Wiarygodną ocenę dokładności rozwiązań GPS można uzyskać, analizując ciągi takich rozwiązań (Krynski i Zanimonskiy, 2003b).

Podniesienie dokładności rozwiązań GPS poprzez doskonalenie modelowania obserwacji oraz oceny tej dokładności stanowi przedmiot zaawansowanych badań (np. Teunissen, 2002). W badaniach szczególnie przydatne są rozwiązania GPS uzyskane na podstawie obserwacji gromadzonych na stacjach permanentnych (Krynski i Zanimonskiy, 2002a). Do rozdzielenia efektów wywołujących zmienności w rozwiązaniach GPS, a także do oceny wielkości tych zmienności przydatne są narzędzia analizy statystycznej i analizy spektralnej.

Wiarygodność oceny dokładności rozwiązań GPS można badać w oparciu o analizę rozwiązań GPS otrzymanych z różnej długości sesji obserwacyjnych dla wektorów o różnych długościach, w różnych rejonach geograficznych. Przy wyborze danych do eksperymentów numerycznych oraz strategii opracowania tych danych kierowano się uwarunkowaniami praktycznymi (długości mierzonych w praktyce geodezyjnej wektorów najczęściej zawierają się w granicach od 10 do 100 km), możliwościami dostępnego oprogramowania oraz doświadczeniem zdobytym przy opracowywaniu obserwacji GPS oraz interpretacji uzyskiwanych wyników. Spośród wielu obliczonych wektorów jako reprezentatywny do zilustrowania wyników badań wiarygodności oceny dokładności rozwiązań GPS wybrano

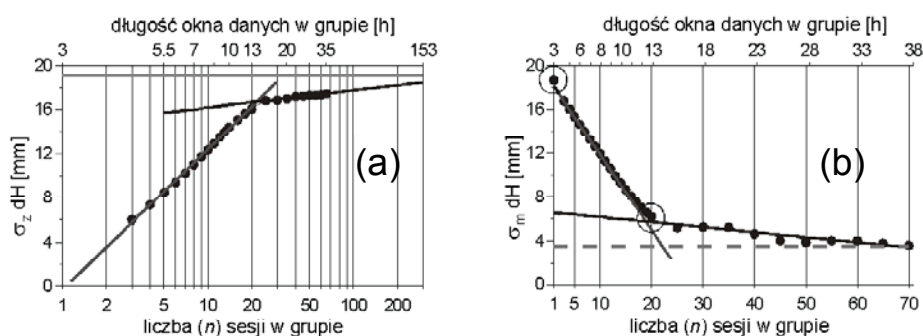
wektor BOGO-JOZE o długości 42 km. Do wygenerowania ciągów rozwiązań dla składowych wektora BOGO-JOZE przy użyciu programów Bernese v.4.2 i Pinnacle użyte zostały obserwacje z 2001 roku. Program Bernese wykorzystano do wygenerowania ciągów rozwiązań GPS w oparciu o 2 h, 3 h, 4 h i 6 h sesje obserwacyjne z nakładką (przesunięcie 1 h) z 19 dni sierpnia, 3 h sesje z nakładką (przesunięcie 0.5 h) oraz 24 h sesje z nakładką (przesunięcie 1 h) z okresu 4 miesięcy od lutego do maja. Przy użyciu programu Pinnacle obliczono ciągi rozwiązań GPS opartych o 2 h, 3 h, 4 h, 5 h, 6 h, 8 h, 9 h, 10 h, 11 h, 12 h, 13 h, 14 h, 17 h, 18 h, 19 h, 20 h, 21 h, 22 h, 23 h, 25 h, 26 h, 27 h i 28 h sesje z nakładką (przesunięcie 1 h) z 15 dni sierpnia. Wybrane do opracowania dane reprezentują dwa różne okresy sezonowych zmian atmosferycznych. Okres zimowo-wiosenny odpowiada spokojnej atmosferze, podczas gdy okres letni – wysokiej dynamice zmian w atmosferze. Analizowano rozrzuty rozwiązań GPS w poszczególnych ciągach 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. Zasadę tworzenia grup rozwiązań GPS pod kątem ich analizy statystycznej przedstawiono na rysunku 6.1 na przykładzie ciągu rozwiązań składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE.

W badanym ciągu rozwiązań GPS, o typowej dla wektora łączącego permanentne stacje GPS zmienności, odchylenia standardowe poszczególnych rozwiązań GPS, które są miarą wewnętrznej dokładności tych rozwiązań, utrzymują się na niemal stałym poziomie. Stąd średnie w grupie odchylenia standardowe σ_w rozwiązań GPS przyjmują tę samą wartość 2 mm we wszystkich grupach na rysunku 6.1 i ich kombinacjach. Estymatory statystyk: wartości średniej m , odchylenia standardowego σ_z oraz odchylenia standardowego średniej arytmetycznej σ_m , które są wykorzystywane do oceny zewnętrznej dokładności rozwiązań GPS, przyjmują różne wartości w grupach. Wartości średnie różnią się między sobą nie tylko w odniesieniu do grup o różnych wymiarach, ale także do grup o tej samej liczbie rozwiązań. Proces uśredniania rozwiązań z poszczególnych grup (statystyki w dolnym prostokącie na rys. 6.1) prowadzi do podobnego wyniku, jak uzyskany z rozwiązania opartego na obserwacjach wchodzących w skład tych grup, lecz o bardziej realistycznej ocenie jego dokładności (ocena dokładności wewnętrznej σ_w odpowiada w tym przypadku ocenie dokładności zewnętrznej σ_z).



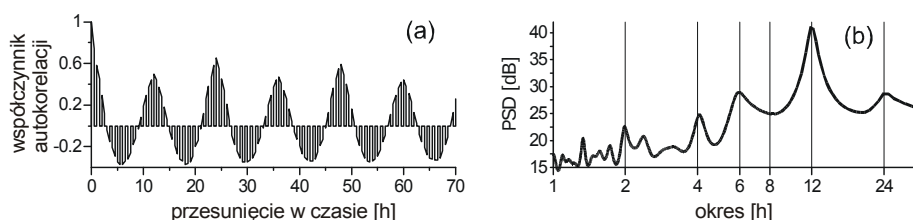
Rys. 6.1. Schemat tworzenia grup rozwiązań GPS oraz przykład towarzyszących tym grupom statystyk

Rozrzut rozwiązań GPS wewnątrz grupy zwiększa się wraz ze wzrostem liczby rozwiązań wchodzących w skład badanej grupy, co jest związane z długością przedziału danych przypisanego grupie (rys. 6.2a). Z drugiej strony rozrzut średniej z rozwiązań w grupie maleje ze wzrostem liczby przypisanych grupie rozwiązań (rys. 6.2b). Na rysunku 6.2 przedstawiono wykresy przebiegu wymienionych rozrzutów dla składowej wysokościowej badanego wektora, otrzymanej przy użyciu programu Bernese v.4.2 z opracowania 3 h sesji z nakładką (przesunięcie 0.5 h) dla okresu 3 miesięcy.



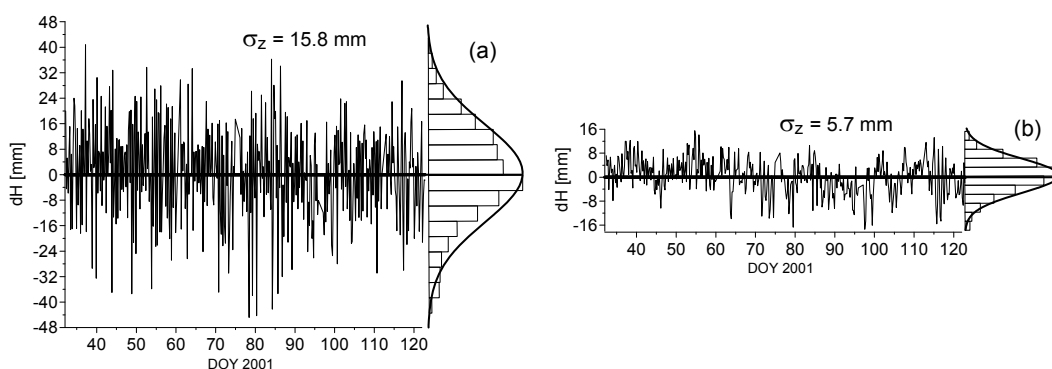
Rys. 6.2. Średnie odchylenie standardowe σ_z w grupie n kolejnych rozwiązań składowej wysokościowej wektora (a) oraz średnie odchylenie standardowe σ_m średniej z n kolejnych rozwiązań w grupie (b). Długość interwału czasu, z którego dane wykorzystano do uzyskania rozwiązań wchodzących w skład grupy n kolejnych sesji odpowiada długości okna danych. Szara linia na (a) odpowiada odchyleniu standardowemu w grupie obejmującej 3-miesięczne obserwacje. Szara przerywana linia na (b) odpowiada dokładności średniego rozwiązania z 3-miesięcznych danych

W obu przypadkach pokazanych na rysunku 6.2 obserwuje się skokową zmianę w przyroście rozrzutu rozwiązań GPS dla okien danych o długościach około 12 h. Przy dłuższych oknach danych zmienność rozrzutu rozwiązań GPS staje się zaniedbywalnie mała. Stąd mechanizm zakłócający rozwiązania GPS oparte na krótszych od 12 h sesjach obserwacyjnych różni się od mechanizmu zakłócającego rozwiązania GPS otrzymywane z dłuższych sesji obserwacyjnych. Rozwiązania GPS oparte na danych z krótszych niż 12 h sesji są obarczone głównie szumem oraz systematycznymi błędami okresowymi wynikającymi z konstelacji satelitów GPS. Z rysunku 6.2b wynika również, że składową pionową wektora o długości 42 km wyznacza się z 12 h sesji obserwacyjnych z dokładnością 6–7 mm. Dominację okresowości o okresie 12 h w przebiegu zmienności rozwiązań GPS ilustruje rysunek 6.3.



Rys. 6.3. Funkcja autokorelacji (a) i widmo gęstości mocy (PSD) (b) dla składowej wysokościowej wektora obliczonej z 3 h sesji w oparciu o dane z okresu 3 miesięcy

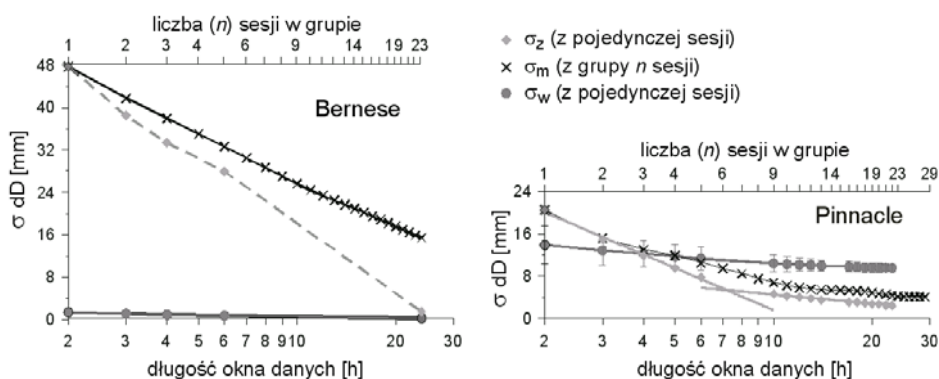
Wraz z wydłużaniem sesji obserwacyjnych (a tym samym okna danych), na podstawie których uzyskiwane są rozwiązania GPS, zmniejszeniu ulega rozrzut tych rozwiązań. Zmniejszenie rozrzutu rozwiązań GPS następuje na skutek uśredniania efektów przypadkowych (szumu) i okresowych błędów systematycznych. Ciągi czasowe rozwiązań GPS opartych na dłuższych sesjach obserwacyjnych charakteryzują się dużo większą gładkością, aniżeli odpowiednie ciągi rozwiązań oparte o krótkie sesje. Takie wygładzanie można symulować poprzez stosowanie odpowiednich kombinacji rozwiązań GPS otrzymanych z krótkich sesji obserwacyjnych i ich uśrednianie. Przykładowo efekt takiego wygładzania dla składowej wysokościowej wektora, obliczonej w oparciu o 3 h sesje obserwacyjne i uśrednionej przy użyciu średniej kroczącej o oknie 12.5 h, przedstawiono na rysunku 6.4.



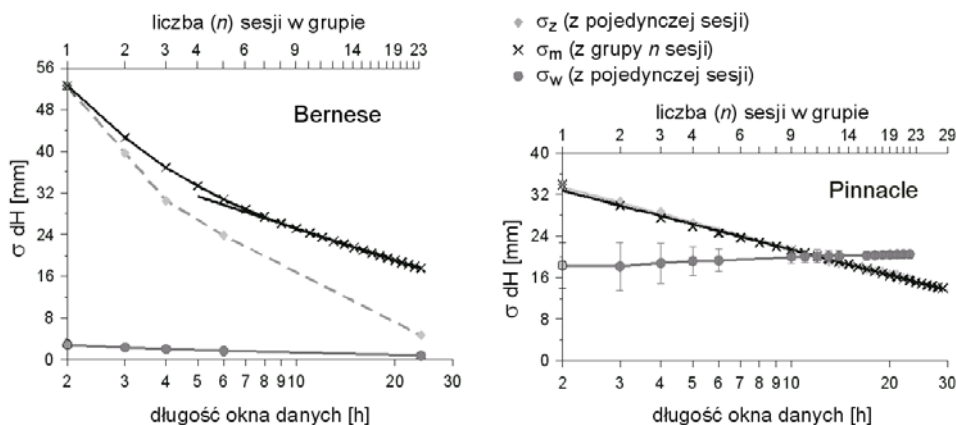
Rys. 6.4. Ciąg czasowy rozwiązań GPS dla składowej wysokościowej opartych na 3 h sesjach z nakładką (przesunięcie 0.5 h) (a) oraz średnia krocząca z oknem 12.5 h (uśrednienie 20 kolejnych rozwiązań z pojedynczych sesji) (b)

Przedstawione wyniki odnoszą się do zewnętrznej oceny dokładności rozwiązań GPS. Ocena ta jest oparta na analizie powtarzalności rozwiązań GPS w ciągach o wysokiej rozdzielczości czasowej. Szacowana w ten sposób dokładność nie odpowiada oszacowaniu poprzez odchylenia standardowe σ_{w_2} .

dostarczane przez programy przeznaczone do opracowywania obserwacji GPS. Uzyskiwane z obliczeń tymi programami odchylenia standardowe charakteryzują dokładność wewnętrzną systemu (łącznie z algorytmem obliczeniowym). W ocenie tej pominięte są krótkookresowe błędy systematyczne, toteż wypada ona zbyt optymistycznie. Wykresy na rysunkach 6.5 i 6.6 umożliwiają porównanie zewnętrznej i wewnętrznej dokładności wyznaczania składowej wysokościowej wektora przy użyciu, odpowiednio, programów Bernese i Pinnacle.



Rys. 6.5. Błędy wyznaczenia długości wektora uzyskane z programu opracowania obserwacji GPS (σ_w) oraz oszacowane w procesie analizy statystycznej ciągów czasowych rozwiązań GPS (σ_m i σ_z)



Rys. 6.6. Błędy wyznaczenia składowej wysokościowej wektora uzyskane z programu opracowania obserwacji GPS (σ_w) oraz oszacowane w procesie analizy statystycznej ciągów czasowych rozwiązań GPS (σ_m i σ_z)

Rozrzut w rozwiązaniach GPS otrzymanych przy użyciu programu Bernese jest większy aniżeli w przypadku użycia programu Pinnacle. Rozbieżność w rozrzutach jest szczególnie wyraźna w wynikach opracowania krótkich sesji obserwacyjnych. Większą rozbieżność uzyskuje się w wyznaczanych długościach wektorów aniżeli w innych składowych wektora. Stosowanie strategii QIF przy opracowywaniu danych GPS programem Bernese, która nie jest najbardziej odpowiednia dla obliczania krótkich wektorów (wektor BOGO-JOZE ma długość 42 km), może częściowo tłumaczyć dużą rozbieżność w rozwiązaniach GPS. Mimo tak dużych błędów, wynikających z zewnętrznej oceny dokładności wyników, odchylenia standardowe rozwiązań GPS dostarczone przez program Bernese są jednak przynajmniej o rząd wielkości mniejsze. Różnica między zewnętrzną i wewnętrzną oceną dokładności jest szczególnie widoczna w przypadku rozwiązań GPS opartych na krótkich sesjach obserwacyjnych. Zarówno składowa wysokościowa, jak i długość badanego wektora zostały wyznaczone z 2 h sesji z dokładnością około 5 cm, podczas gdy dokładność wewnętrzna ich wyznaczeń oszacowana w programie Bernese kształtowała się na poziomie kilku milimetrów. Rozbieżność ta maleje wraz z wydłużaniem się sesji obserwacyjnej wykorzystywanej do obliczenia rozwiązania GPS i dla 24 h sesji osiąga poziom kilku milimetrów, przy zachowaniu jednak proporcji pomiędzy błędami wynikającymi z zewnętrznej i wewnętrznej oceny dokładności.

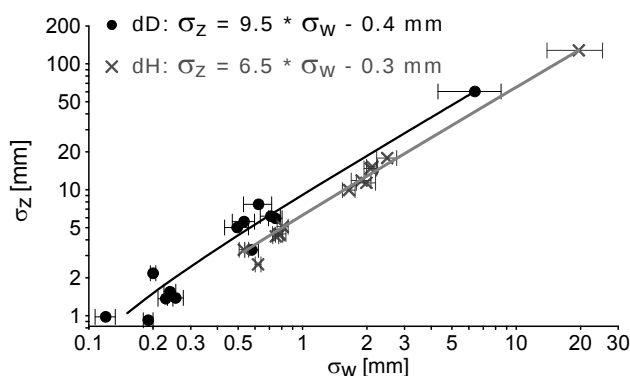
Wpływ szumów oraz okresowych błędów systematycznych na rozwiązania GPS można zredukować poprzez uśrednianie rozwiązań w grupach, tworząc np. średnie z rozwiązań opartych na n 2 h sesjach. Tego rodzaju proste uśrednianie nie wyeliminuje wszystkich tych efektów, które zostałyby usunięte poprzez opracowanie programem Bernese jednej sesji, zawierającej obserwacje reprezentowane przez n 2 h 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 niż 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, w którym stosowane są bardziej zaawansowane modele obserwacji GPS. Dla składowej wysokościowej badanego wektora, obliczonej na podstawie 2 h sesji obserwacyjnych, uzyskano dokładność zewnętrzną na poziomie 3.5 cm, podczas gdy dokładność wewnętrzna wyznaczenia tej składowej wyniosła

około 2 cm. W tym samym przypadku dla długości wektora otrzymano dokładność zewnętrzną 2 cm, zaś dokładność wewnętrzną z programu Pinnacle wyniosła 1.5 cm. Dla obu składowych wektora, przy pewnej długości sesji obserwacyjnej, zachodzi zgodność w zewnętrznej i wewnętrznej ocenie dokładności. Osobliwości te odpowiadają 12 h długości sesji dla składowej wysokościowej oraz 4 h długości sesji dla długości wektora. Dokładność wewnętrzną 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. Zjawisko to szczególnie wyraźnie uwidacznia się dla składowej wysokościowej.

Rozbieżności między zewnętrznym i wewnętrznym oszacowaniem dokładności rozwiązań GPS, otrzymanych przy użyciu programu Bernese, badano na przykładach licznych wektorów o długościach od kilkudziesięciu do kilku tysięcy kilometrów. W oparciu o rozwiązania GPS odniesione do 3 h i 24 h sesji obserwacyjnych pokrywających okres 4 miesięcy 2001 roku wygenerowano odpowiednie ciągi czasowe oraz poddano je analizie statystycznej. Uzyskane wyniki wskazują na wyraźną korelację pomiędzy zewnętrzną i wewnętrzną oceną dokładności rozwiązań GPS (rys. 6.7).



Rys. 6.7. Korelacja między dokładnością zewnętrzną σ_z i dokładnością wewnętrzną σ_w rozwiązań GPS otrzymanych przy użyciu programu Bernese

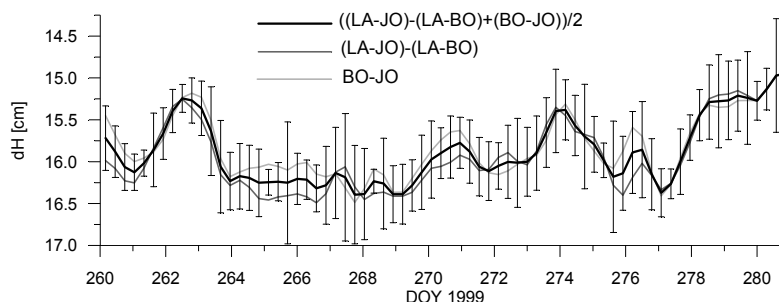
Współczynniki skali między dokładnością wewnętrzną rozwiązań GPS uzyskanych przy użyciu programu Bernese a dokładnością zewnętrzną tych rozwiązań wynoszą odpowiednio 7 i 10 dla składowej wysokościowej i długości wektora. Podobne skalowanie wewnętrznej dokładności w celu bardziej realistycznego szacowania błędów pomiarowych na lokalnych sieciach opisane jest w pracy (Ollikainen, 1997).

7. ROZDZIELANIE OKRESOWYCH BŁĘDÓW SYSTEMATYCZNYCH I EMPIRYCZNE MODELOWANIE ZMIENNOŚCI WSPÓŁRZĘDNYCH WEKTORÓW

Zmienności w przebiegach ciągów czasowych rozwiązań GPS odzwierciedlają efekt nakładania się błędów, które zniekształcają poszczególne rozwiązania GPS. Obok składowej losowej, zmienności te zawierają składową systematyczną oraz składową chaotyczną. Rozdzielenie tych składowych jest możliwe w procesie analizy ciągów czasowych rozwiązań GPS, np. przy użyciu strategii opracowanej w ramach niniejszej pracy (rozdz. 5). Strategia ta obejmuje również jakościową i ilościową analizę poszczególnych składowych, stwarzając tym samym podstawę do modelowania efektów systematycznych i eliminowania efektów chaotycznych.

Wstępne badania w tym zakresie przeprowadzono na ciągach czasowych rozwiązań wektorów w oparciu o obserwacje GPS, wykonane na stacjach permanentnej sieci EUREF: Borowa Góra (BOGO), Józefosław (JOZE) i Lamkówko (LAMA). Wykorzystując obserwacje z okresu 21 dni (260–280 dni GPS 1999 r.), za pomocą programu Bernese v.4.2 uzyskano rozwiązania wektorów BOGO-JOZE, JOZE-LAMA i LAMA-BOGO na podstawie 4 h sesji obserwacyjnych z 75% pokryciem, tj. początek każdej następnej sesji jest przesunięty o 1 h w stosunku do początku poprzedniej. Przebiegi zmienności w badanych ciągach czasowych noszą ewidentne cechy regularności. Analiza spektralna tych ciągów potwierdziła, że we wszystkich składowych badanych wektorów występują wyraźne półdobowe i dobowe zmiany okresowe (Zanimonskiy i Kryński, 2000a). Dla każdej ze składowych obliczono także ciągi czasowe zamknięcia trójkąta. W ciągach tych trudno dopatrzeć się regularności zmian. Zmiany te jednak są mniejsze od zmian występujących w odpowiadających im składowych poszczególnych wektorów. Amplituda obserwowanych zmian w zamknięciu trójkąta jest największa w składowej wysokościowej i wynosi około 3 mm. Przebieg zmienności składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE oraz zmienności zamknięcia trójkąta dla tej składowej wraz z błędem standardowym przedstawiono na rysunku 7.1.

Uzyskane zgodności w zamknięciu trójkąta wyraźnie przemawiają za tym, że dominujący wpływ na zmienność wyników obliczeń składowych wektorów na podstawie kilkugodzinnych sesji obserwacji GPS mają nieuwzględnione efekty systematyczne. Podobieństwo w przebiegach zmienności rozwiązań GPS dla odpowiednich składowych wektorów trójkąta świadczy o silnej wzajemnej korelacji tych efektów. Jednocześnie zgrubna ocena wpływu błędów przypadkowych jest zgodna z oszacowaniami błędów rozwiązań uzyskanymi w procesie obliczeń wektorów (Kryński i Zanimonskiy, 2001a).



Rys. 7.1. Zmiany składowej pionowej wektora BOGO-JOZE z bezpośrednich obliczeń, z kombinacji dwóch wektorów tworzących z nim trójkąt oraz średniej (linia pogrubiona) z powyższych dwóch wyznaczeń

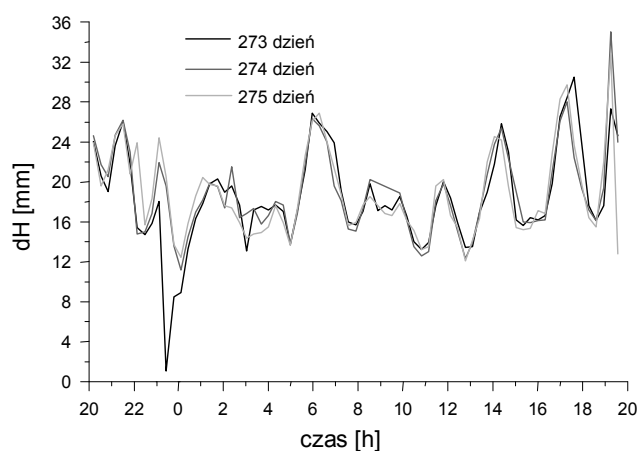
Krótkie ciągi czasowe rozwiązań GPS mogą być wykorzystywane do badania regularnych zmian w składowych opracowywanych wektorów. W tym celu tworzone są średnie dobowe przebiegi rozwiązań GPS. Proces takiego uśredniania jest skutecznym filtrem dla błędów przypadkowych⁵ i prowadzi do wygładzenia przebiegu zmian wynikowego ciągu (o argumentie w przedziale o długości 24 h), a jednocześnie do uwypuklenia efektów dobowych i subdobowych. Średnie dobowe przebiegi rozwiązań GPS mają nadzwyczaj regularny charakter zmienności. Stwierdzenie to znalazło potwierdzenie w wynikach wielu eksperymentów obliczeniowych, obejmujących zarówno wektory łączące krajowe stacje EPN, jak i krótkie wektory mikrosieci w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym w Borowej Górze (Krynski i Zanimonskiy, 2001a).

W wynikach opracowań krótkich, kilkusetmetrowych wektorów wpływy błędów systematycznych wynikających z błędów orbit satelitów oraz z modelowania jonosfery i troposfery będą zaniedbywalnie małe. Stąd jedynie błędy wywołane konfiguracją satelitów (w tym błędy z tytułu wielotorowości) oraz błędy wynikające z segmentu naziemnego będą w sposób systematyczny obarczały wyniki opracowania dostatecznie długich sesji obserwacyjnych GPS.

Na punktach ekscentrów 217, OR3 i 3230 stacji BOGO (rys. 4.4) znajdujących się na terenie Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznego w Borowej Górze przeprowadzono w 2000 roku 5-dniową kampanię pomiarową GPS. Uzyskane z kampanii obserwacje, łącznie z obserwacjami ze stacji permanentnej BOGO, zostały opracowane przy użyciu programu Pinnacle w sesjach 1 h z pokryciem 67%. W wyniku obliczeń uzyskano ciągi czasowe dla składowych trzech wektorów łączących punkt BOGO z jego

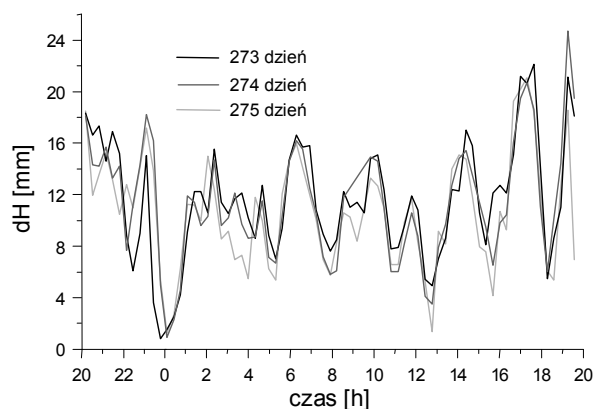
⁵ Analogia do wielokanałowego filtru o jednym kanale na wyjściu (*stacking filter*) (Buttkus, 2000).

ekscentrami oraz pozostałych trzech wektorów łączących wzajemnie ekscentry. Zgodnie z przewidywaniami otrzymano znacznie lepszą, aniżeli w przypadku długich wektorów, zgodność w powtarzalności dobowych bloków ciągów rozwiązań dla wszystkich składowych badanych wektorów. Przykładowo, powtarzalność rozwiązań dla składowej pionowej wektora BOGO-217 (107 m) w okresie trzech kolejnych dni (273, 274 i 275 DOY 2000) przedstawiono na rysunku 7.2.



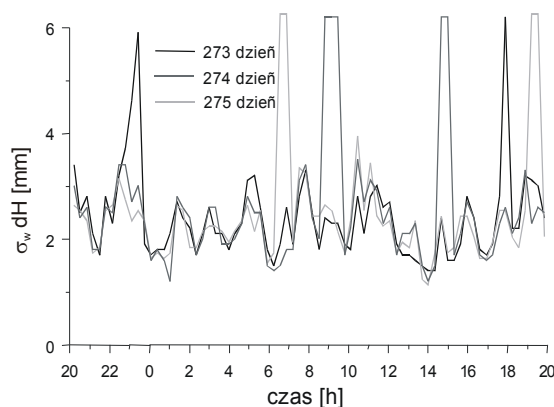
Rys. 7.2. Powtarzalność zmian składowej wysokościowej wektora BOGO-217 (sesje 1 h z przesunięciem 20-minutowym)

Przyjęcie godziny 20 za początek bloków dobowych podyktowane było dostępnością materiału obserwacyjnego. Powtarzalność rozwiązań dla tej samej składowej wektora BOGO-217, otrzymanego jako suma rozwiązań wektorów BOGO-3230 i 3230-217, ukazano na rysunku 7.3.



Rys. 7.3. Powtarzalność zmian składowej wysokościowej wektora BOGO-217, obliczonej jako suma składowych wysokościowych wektorów BOGO-3230 i 3230-217 (sesje 1 h z przesunięciem 20-minutowym)

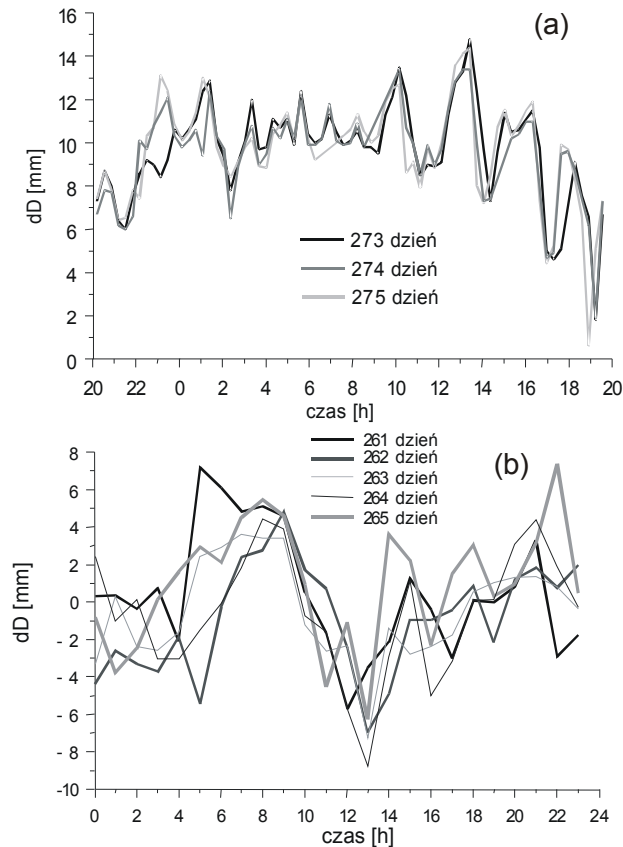
Dodatkowo rysunek 7.4 ilustruje powtarzalność, uzyskanych na wyjściu programu obliczeniowego, odchyleń standardowych σ_w wyznaczonej składowej wysokościowej wektora BOGO-217.



Rys. 7.4. Powtarzalność zmienności odchyleń standardowych wyznaczonej składowej wysokościowej wektora BOGO-217 (sesje 1 h z przesunięciem 20-minutowym)

Średnie dobowe przebiegi rozwiązań GPS dla długości wektora BOGO-0217 (107 m) uzyskane z opracowania 1 h sesji z 40-minutową nakładką z okresu 3 dni oraz dla długości wektora BOGO-JOZE (42 km) uzyskane z opracowania 3 h sesji z 2 h nakładką z okresu 5 dni przedstawiono na rysunku 7.5.

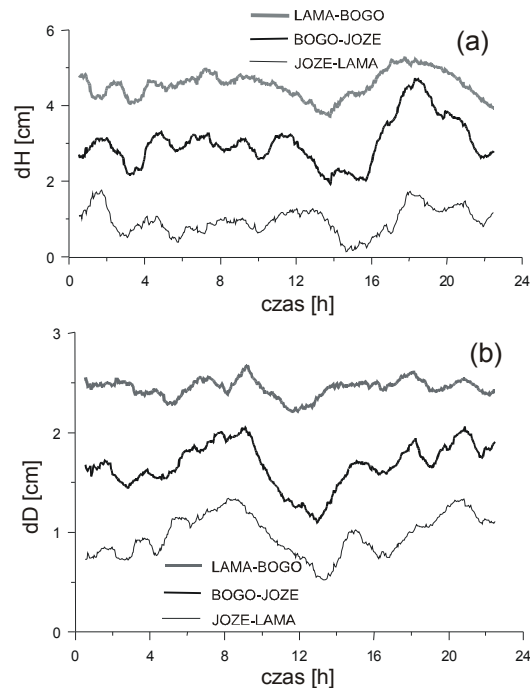
Zmienność rozwiązań składowych bardzo krótkich wektorów cechuje się niemal idealną powtarzalnością dobową. Charakteryzuje się ona również zgodnością zamknięcia tworzonych przez nie trójkątów. Nie jest to zaskakujące, gdyż przy obliczeniu krótkich wektorów wiele błędów systematycznych jest wyeliminowanych z rozwiązań GPS. Przebieg zmienności składowych krótkich wektorów (rys. 7.2 i 7.5) jest zasadniczo złożeniem procesów chaotycznych z pewnymi efektami systematycznymi. Z uwagi na krótkie sesje obserwacyjne stosowane do obliczania krótkich wektorów otrzymywane rozwiązania GPS nie są wolne od błędów z tytułu wielotorowości sygnału oraz zmian położenia środków fazowych anten, które mają charakter okresowy, o okresach od kilkunastu minut do kilku godzin. Zazwyczaj błędy spowodowane zmianami położenia środków fazowych anten nie przekraczają poziomu pojedynczych milimetrów, podczas gdy błędy wywołane wielotorowością sygnału są o rząd wielkości większe. Stąd za źródło przeważającej części błędów w rozwiązaniach GPS dla krótkich wektorów można uważać efekt wielotorowości sygnału. Ten błąd systematyczny o amplitudzie 15 mm może być wymodelowany i prognozowany z dokładnością 1 mm.



Rys. 7.5. Powtarzalność dobowych zmienności długości wektorów
BOGO-0217 (107 m) (a) i BOGO-JOZE (42 km) (b)

Uwzględniając dobową powtarzalność zmienności składowych wektorów, wyznaczono dla każdej składowej każdego z trzech wektorów BOGO-LAMA, LAMA-JOZE i JOZE-BOGO średni dobowy przebieg zmienności. W przypadku każdej składowej uzyskano daleko posuniętą zgodność w uśrednionych ciągach czasowych reprezentujących wszystkie trzy wektory. Na rysunku 7.6 przedstawiono przebiegi zmienności odpowiednio dla składowej wysokościowej i długości wektora.

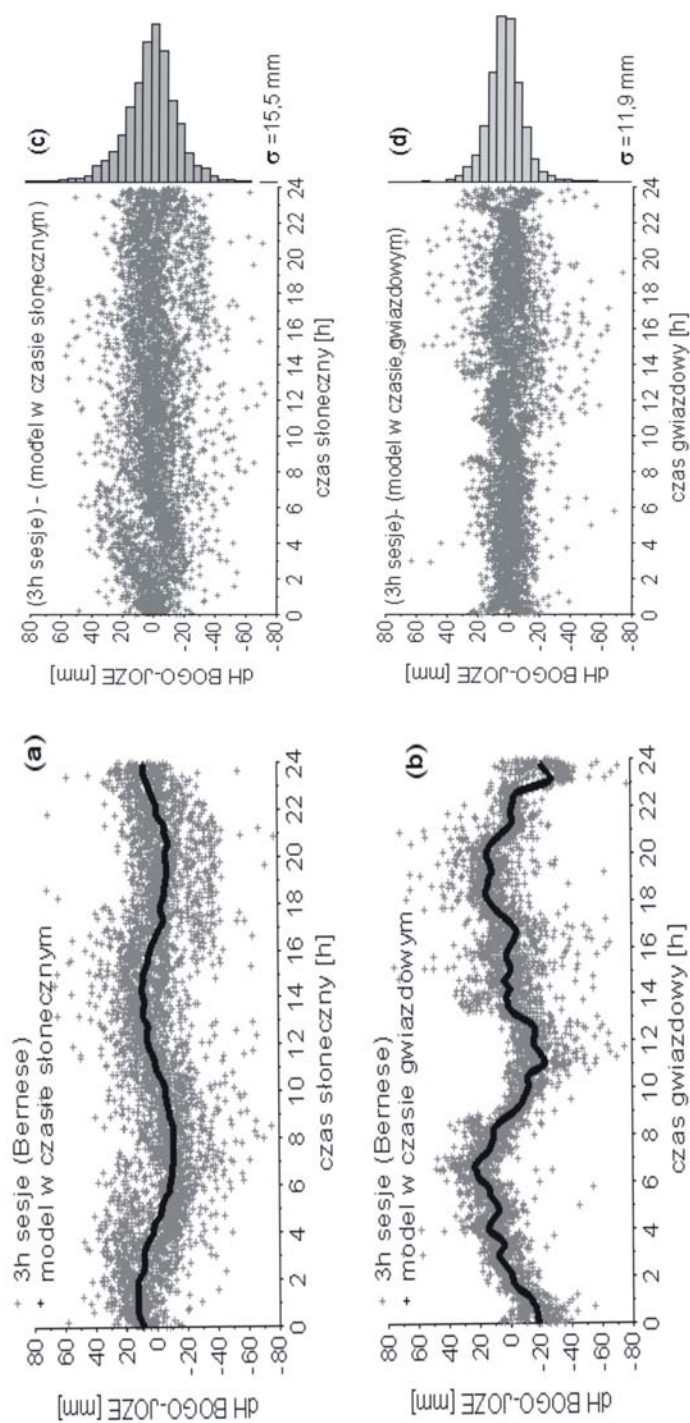
Dla dłuższych wektorów powtarzalność dobową rozwiązań jest bardzo wyraźna. Jest ona jednak obok efektu wielotorowości zakłócana innymi błędami systematycznymi, których wpływ rośnie wraz ze wzrastającą długością wektora oraz większymi szumami (Krynski i Zanimonskiy, 2001a).



Rys. 7.6. Uśrednione zmiany składowej wysokościowej wektorów (a) oraz długości wektorów (b)

Dla trzech badanych wektorów: BOGO-JOZE, JOZE-LAMA i LAMA-BOGO, tworzących wydłużony trójkąt, uzyskano bardzo zbliżone wzajemnie przebiegi zmienności. Największe podobieństwo przebiegów zmienności, przy jednoczesnej największej dyspersji rozwiązań, zachodzi dla wektorów BOGO-JOZE (42 km) i LAMA-JOZE (201 km), a więc wektorów zawierających wspólną stację JOZE. Przyczyny tego zjawiska można dopatrywać się w przeciętnie mniejszej liczbie satelitów zaobserwowanych na stacji JOZE, aniżeli na dwóch pozostałych stacjach trójkąta w okresie, z którego pochodzą wykorzystane w analizie obserwacje GPS. Redukcję liczby śledzonych na stacji satelitów obserwuje się w przypadku zasłonięcia horyzontu lub starzenia się anteny odbiornika GPS.

Wysoka jakość wyników obliczeń programem Bernese umożliwia rozdzielanie efektów okresowych pochodzących z różnych źródeł. Powtarzalność dobową zmienności rozwiązań GPS obserwuje się już w ciągach czasowych o długości kilku dni. Powtarzalność konstelacji satelitów GPS odpowiada pełnym dobom gwiazdowym, toteż wykrywanie systematycznych efektów okresowych związanych z zmiennością konstelacji satelitów wymaga odniesienia rozwiązań GPS do skali czasu gwiazdowego. Do wydzielenia tych efektów potrzebny jest wielomiesięczny ciąg czasowy rozwiązań GPS z uwagi na bardzo małą różnicę pomiędzy jednostkami skal czasu słonecznego i gwiazdowego.

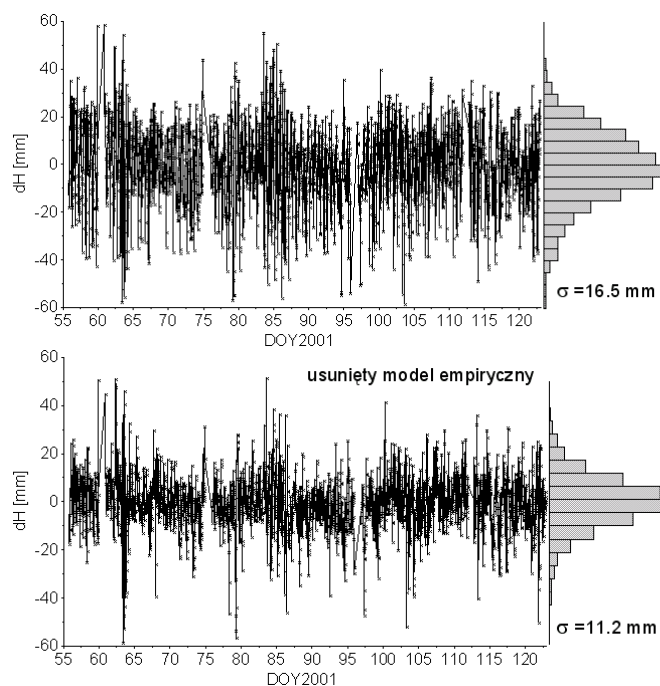


Rys. 7.7. Empiryczny model zmienności rozwiązań GPS dla składowej wysokościowej wektora

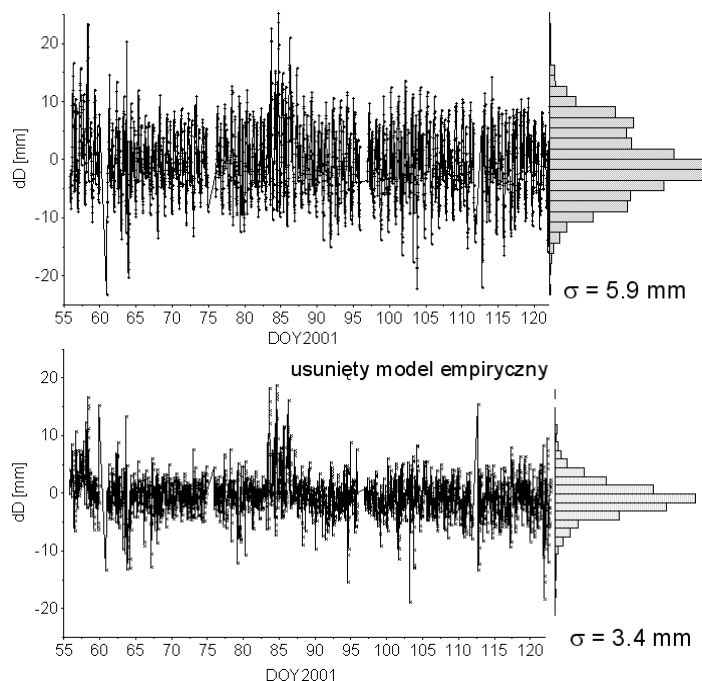
Badano średnie dobowe przebiegi rozwiązań GPS dla składowych wektorów łączących krajowe stacje EPN, uzyskanych z opracowania 3 h sesji z 2.5 h nakładką, z okresu 3 miesięcy 2001 roku i odniesionych do obu skal czasu: słonecznego i gwiazdowego. Na rysunkach 7.7a i 7.7b pokazano przykład średniego dobowego (w skali czasu słonecznego oraz w skali czasu gwiazdowego) przebiegu rozwiązań GPS dla składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE wraz z odpowiadającymi im modelami empirycznymi (gruba czarna linia).

Rysunki 7.7c i 7.7d przedstawiają odniesione odpowiednio do skali czasu słonecznego i gwiazdowego, poprawione o model empiryczny, przebiegi rozwiązań GPS. W obu modelach występuje wyraźny trend półdobowy. Model wygenerowany w skali czasu gwiazdowego jest o 20% lepiej wpasowany w ciąg rozwiązań GPS niż model obliczony w skali czasu słonecznego. W podobny sposób utworzony został model empiryczny dla przebiegu rozwiązań długości wektora BOGO-JOZE.

Efekt usunięcia wymodelowanej części sygnału z przebiegu składowej wysokościowej oraz długości wektora BOGO-JOZE (z 2-miesięcznego zbioru danych) wraz z odpowiednimi histogramami oraz oceną błędu średniego przedstawiony został, odpowiednio, na rysunkach 7.8 i 7.9.



Rys. 7.8. Efekt usunięcia wymodelowanej części sygnału z przebiegu składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE

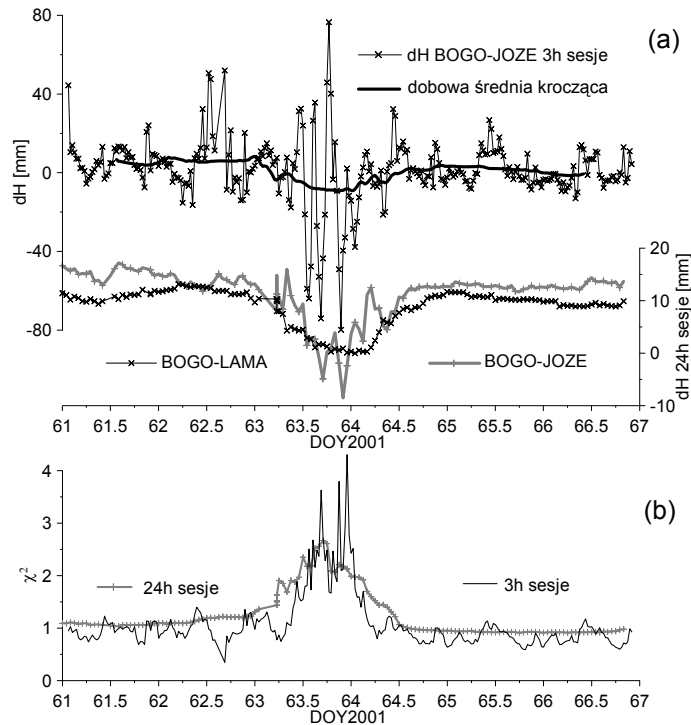


Rys. 7.9. Efekt usunięcia wymodelowanej części sygnału z przebiegu długości wektora BOGO-JOZE

Poprzez usunięcie, wymodelowanych za pomocą modeli empirycznych w skali czasu gwiazdowego, zmian składowych wektorów z rozwiązań GPS, otrzymanych z opracowania 3 h sesji, uzyskano zmniejszenie rozrzutów w ciągach czasowych o 35% w składowej wysokościowej i o 43% w długości wektora (Kryński i Zanimonskiy, 2002a). W celu potwierdzenia otrzymanych wyników niezbędna jest jednak analiza dłuższych ciągów czasowych.

Zastosowanie modeli empirycznych nie spowodowało jednak zmniejszenia rozrzutów w kilku przedziałach badanych ciągów czasowych, np. w otoczeniu 64 dnia 2001 roku, kiedy to miała miejsce przewidziana w prognozie geomagnetycznej burza jonosferyczna (rys. 5.3b).

Wygenerowano residualne ciągi czasowe poprzez usunięcie z ciągów czasowych rozwiązań GPS dla składowych wektorów łączących krajowe stacje EPN, uzyskanych z opracowania 3 h sesji z 2.5 h nakładką z okresu 3 miesięcy 2001 roku, wymodelowanych za pomocą odpowiednich modeli empirycznych, zmian składowych wektorów. Ciągi te porównano z ciągami otrzymanymi z rozwiązań GPS uzyskanymi w oparciu o 3 h sesje z 2.5 h nakładką i uśrednionymi przy użyciu dobowej średniej kroczącej o kroku równym 1 godzinie, 24 h sesje obserwacyjne z nakładką 23 h oraz z ciągami czasowymi parametru χ^2 , który reprezentuje wewnętrzną dokładność rozwiązania GPS. Przebiegi odpowiednich ciągów dla składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE przedstawiono na rysunku 7.10.



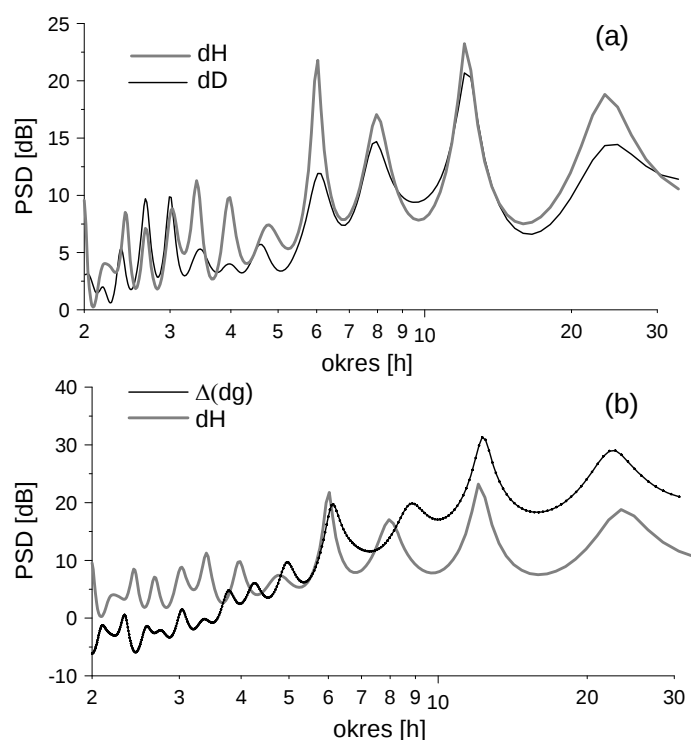
Rys. 7.10. Zmienność składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE (a) i wewnętrzna dokładność rozwiązań GPS (b)

Uśrednienie przy użyciu dobowej średniej kroczącej o kroku równym 1 h, w ciągach otrzymanych z rozwiązań GPS w oparciu o 3 h sesje z 2.5 h nakładką, powoduje wygładzenie ich przebiegu i nadanie im kształtu podobnego do przebiegu rozwiązań GPS uzyskanych w oparciu o 24 h sesje obserwacyjne z nakładką 23 h. Zarówno w oryginalnym ciągu rozwiązań GPS, jak i w ciągu uśrednionych przy użyciu średniej kroczącej rozwiązań GPS występuje nieregularne zakłócenie rozwiązań GPS dokładnie w okresie prognozowanej burzy jonosferycznej. Zakłócenie spowodowane burzą jonosferyczną podobnie oddziałuje na rozwiązania GPS składowych wszystkich wektorów w rejonie zaburzeń. Przebieg ciągu rozwiązań GPS dla składowej wysokościowej wektora BOGO-LAMA w okresie burzy jonosferycznej ilustruje charakter wywołanych tym zjawiskiem zaburzeń. Zakłócenie obserwacji GPS, tak wyraźne w rozwiązaniach GPS, pokrywa się z zakłóceniem przebiegu ciągu czasowego parametru χ^2 ⁶.

⁶ Użyty w pracy parametr χ^2 jest realizacją znormalizowanej poprzez funkcję stopni swobody, określonych przy rozwiązywaniu wektora, zmiennej losowej χ^2 . Parametr ten reprezentuje wewnętrzną dokładność rozwiązania GPS. Stanowi on miarę dobroci dopasowania danych i modeli.

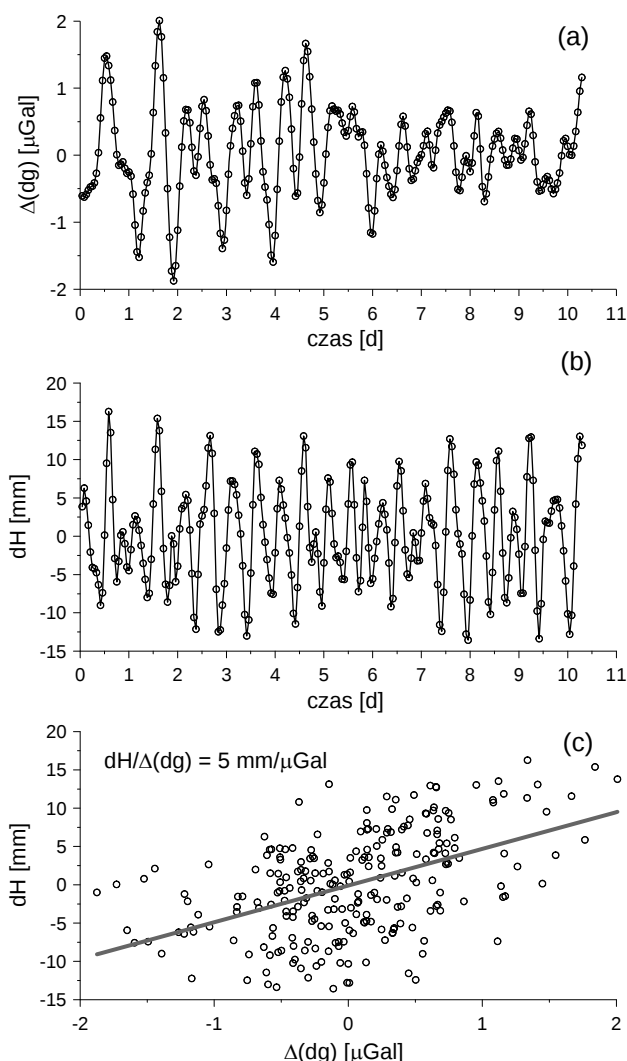
8. KORELACJA ZMIENNOŚCI SKŁADOWYCH WEKTORÓW ZE ZMIENNOŚCIĄ RÓŻNIC RESIDUÓW PRZYSPIESZENIA SIŁY CIĘŻKOŚCI

W dwóch obserwatoriach oddległych od siebie o 42 km: Borowa Góra i Józefosław, w których działają stacje permanentne GPS, za pomocą grawimetrów LCR-G rejestrowano przyspieszenie siły ciężkości w okresie 2 tygodni, we wrześniu 1999 roku. Dla tego okresu, przy użyciu programu Bernese v.4.2, wygenerowano ciągi czasowe rozwiązań GPS składowych wektora BOGO-JOZE, w oparciu o 4 h sesje obserwacyjne. Wszystkie składowe wektora wykazują zmienność o podobnym charakterze okresowości. Charakterystyka widmowa różnicy wysokości i odległości przedstawiona jest na rysunku 8.1a.



Rys. 8.1. Widma ciągów czasowych składowej wysokościowej dH i długości dD wektora obliczonego z obserwacji GPS (a) oraz jego porównanie z widmem różnic residuów $\Delta(dg)$ przyspieszenia siły ciężkości uzyskanych z obserwacji grawimetrami LCR-G (b) dla pary stacji Borowa Góra-Józefosław

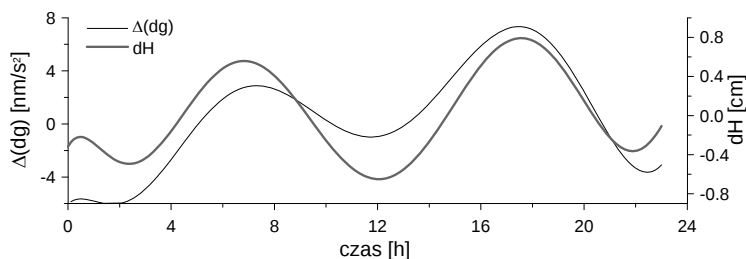
Widmo różnic wysokości jest zadziwiająco podobne do widma różnic residuów przyspieszenia siły ciężkości (rys. 8.1b). Zachodzi zatem podobieństwo w dziedzinie częstotliwości w zmienności składowej wysokościowej rozwiązań GPS oraz różnic residuów przyspieszenia siły ciężkości. W dziedzinie czasu te dwa sygnały wykazują znaczące różnice (rys. 8.2a,b) (Zanimonskiy i Krynski, 2000c).



Rys. 8.2. Różnice residuów przyspieszenia siły ciężkości $\Delta(dg)$ zaobserwowanych grawimetrami LCR-G na stacjach w Borowej Górze i w Józefosławiu (a), zmiany składowej wysokościowej wektora Borowa Góra-Józefosław dH z obserwacji GPS (b), zależność między wynikami GPS i obserwacjami grawimetrycznymi (c)

Mimo wysokiego poziomu szumu w uzyskanych z obserwacji GPS różnicach wysokości zauważa się, w dziedzinie częstotliwości, wyraźną korelację między rozwiązaniami GPS i różnicami residuów przyspieszenia siły ciężkości. Słaba korelacja między tymi sygnałami zachodzi w dziedzinie czasu (współczynnik korelacji 0.24). Współczynnik regresji wynosi $5 \text{ mm}/\mu\text{Gal}$, co pod względem rzędu wielkości pozostaje w zgodności z gradientem pionowym przyspieszenia siły ciężkości (Zanimonskiy i Krynski, 2000c).

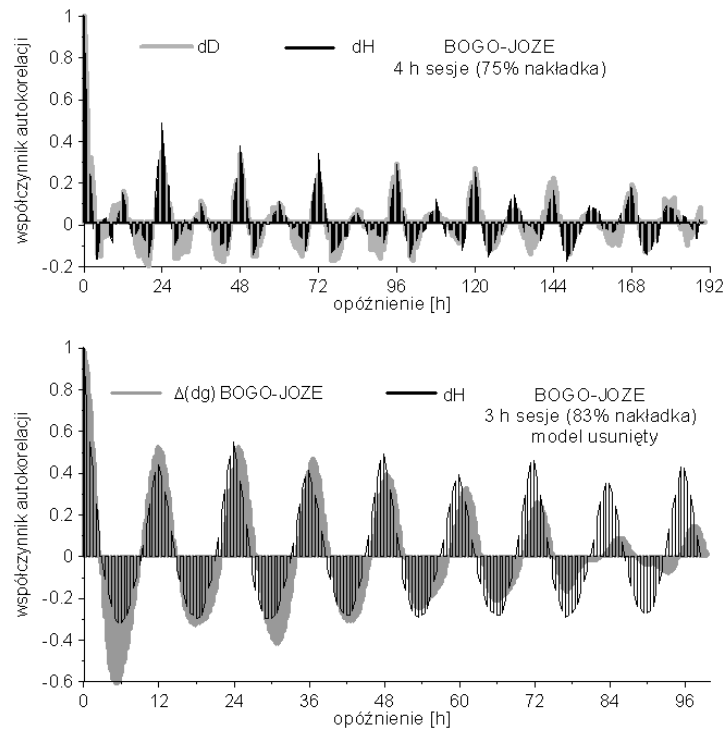
Wpasowanie średnich dobowych zmian różnic residuów przyspieszenia siły ciężkości do średnich dobowych zmian składowej wysokościowej wektora BOGO-JOZE przy użyciu prostego modelu liniowego przedstawiono na rysunku 8.3.



Rys. 8.3. Podobieństwo w zmienności składowej wysokościowej dH rozwiązań GPS i różnicy residuów przyspieszenia siły ciężkości $\Delta(dg)$ dla wektora BOGO-JOZE

Ważnym źródłem informacji jest przebieg funkcji autokorelacji badanych sygnałów (rys. 8.4). Przebiegi funkcji autokorelacji na rysunku 8.4 potwierdzają silną okresowość badanych sygnałów. Sygnały odnoszące się do rozwiązań GPS (na rys. 8.4, zarówno składowa wysokościowa, jak i długość wektora) charakteryzują się słabą korelacją. Są one jednocześnie obarczone silnym szumem. Wzrost opóźnienia między dwoma nakładającymi się sesjami obserwacyjnymi od 0 h (pełne nakładanie się sesji) do 1 h powoduje zmniejszenie współczynnika korelacji od 1 do poziomu 0.5.

Z charakteru zmienności funkcji autokorelacji wynika również, iż wydłużanie sesji obserwacyjnych może przyczynić się do nieznacznej poprawy w wyznaczeniu składowej wysokościowej, zaś praktycznie nie wpłynie na jakość wyznaczenia długości wektora (Zanimonskiy i Krynski, 2000a). Sygnały różnic residuów przyspieszenia siły ciężkości, w przeciwieństwie do sygnałów rozwiązań GPS, są bardzo regularne i charakteryzują się silną korelacją oraz niskim poziomem szumów. Sygnały te praktycznie są sygnałami ciągłymi, co nie zachodzi w przypadku sygnałów rozwiązań GPS.



Rys. 8.4. Funkcja autokorelacji dla danych BOGO-JOZE: składowa wysokościowa wektora z obserwacji GPS (Bernese), długość wektora z obserwacji GPS (Bernese), różnica residuów przyspieszenia siły ciężkości z obserwacji grawimetrami LCR-G

Otrzymane z obserwowanego sygnału zmiany residuów przyspieszenia siły ciężkości wykazują wyraźne cechy regularności. Zmiany te, otrzymane na różnych stacjach na podstawie materiału obserwacyjnego odnoszącego się do różnych epok, mają podobny charakter spektralny. Co więcej, w dziedzinie częstotliwości obserwuje się podobieństwo między zmianami residuów przyspieszenia siły ciężkości oraz zmianami składowych wektora wyznaczonych z obserwacji GPS. Uzyskane w niniejszej pracy wyniki znalazły potwierdzenie w niezależnej analizie ciągów czasowych obserwacji rozwiązań GPS wspólnie z ciągami czasowymi obserwacji grawimetrycznych, wykonanych przy użyciu nadprzewodzących grawimetrów SG na stacjach Hartebeesthoek i Sutherland w Republice Południowej Afryki (Neumeyer et al., 2002).

Aby badać zatem dobowe i subdobowe zmiany residuów przyspieszenia siły ciężkości, nie ma konieczności analizowania długich ciągów czasowych ciągłych obserwacji. Kilkutygodniowe ciągi danych o wysokiej jakości są wystarczające do tego typu analizy. Co więcej, dane tej klasy mogą być pozyskane przy użyciu odpowiednich grawimetrów polowych, np. LCR-G z elektroniczną rejestracją danych, zainstalowanych na stabilnym słupie w odpowiednich termodynamicznych warunkach.

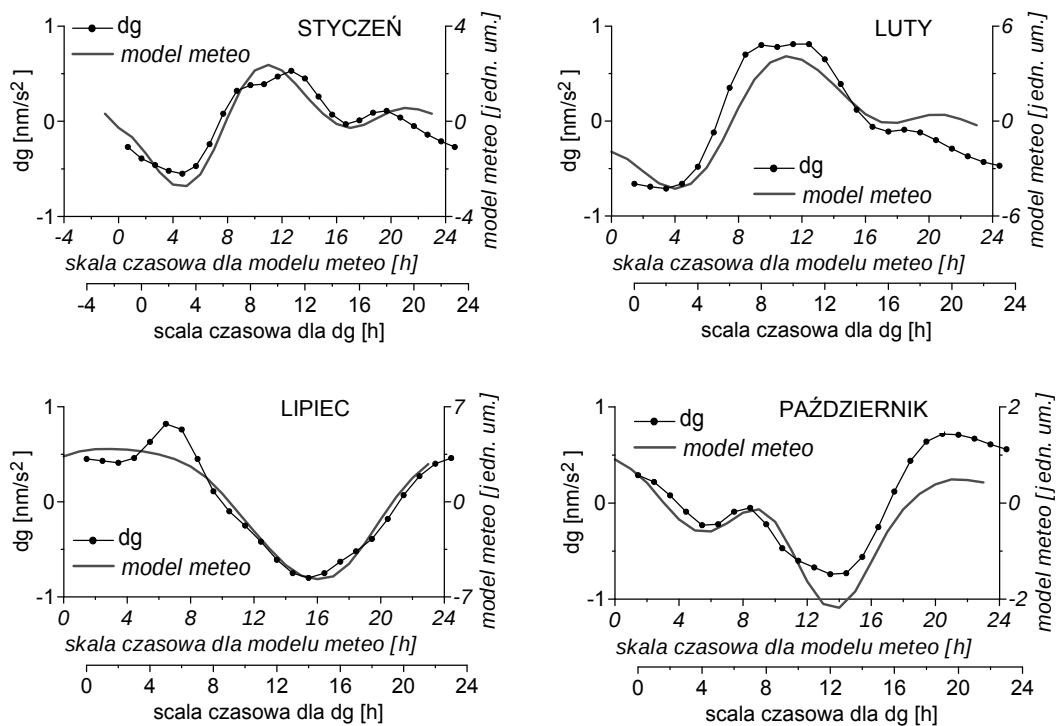
9. KORELACJA ZMIENNOŚCI RÓŻNIC RESIDUÓW PRZYSPIESZENIA SIŁY CIĘŻKOŚCI ZE ZMIENNOŚCIĄ PARAMETRÓW METEOROLOGICZNYCH

W zmienności ciągów czasowych residuów przyspieszenia siły ciężkości, tj. obserwacji grawimetrycznych zredukowanych o wpływ lokalnego ciśnienia atmosferycznego oraz o efekt pływowy, dominują regularne wyrazy okresowe o okresach 12 h i 24 h. Za przyczynę występowania tych wyrazów uważana jest falowa zmienność ciśnienia atmosferycznego, pozostająca w bezpośrednim związku z ruchem obrotowym Ziemi (Neumeyer i Diettfeld, 1997). Korelacja między przyspieszeniem siły ciężkości i ciśnieniem atmosferycznym jest wyrażona w postaci liniowej regresji o stałych współczynnikach w składowych odpowiadających okresom dłuższym od dobowych i o rezonansowo wzrastających współczynnikach w składowych dobowych i subdobowych. Występujące w tym modelu zjawiska rezonansowe nie znajdują przekonującej interpretacji fizycznej. Bardziej realistyczny model uzyskuje się, gdy obok ciśnienia atmosferycznego za dodatkowy, drugi niezależny parametr przyjmie się temperaturę. Model taki reprezentuje proces falowy w skorupie ziemskiej, który oddziałuje na wyniki pomiarów przyspieszenia siły ciężkości. Dotychczas w pomiarach przyspieszenia siły ciężkości temperaturę uwzględniano zazwyczaj jako jedno ze źródeł błędów instrumentalnych (El Wahabi et al., 1997). Konstrukcja grawimetrów nadprzewodzących (SG), przy spełnionych wymaganiach dotyczących instalacji grawimetru, zapewnia jednak dostateczną ich izolację od zmian temperatury otoczenia. Stąd temperatura może być użyta jako niezależny parametr modelu matematycznego dla sygnału residualnego przyspieszenia siły ciężkości.

Zgodność modelu, którego parametrami są ciśnienie atmosferyczne i temperatura, z sygnałem residualnego przyspieszenia siły ciężkości przedstawia rysunek 9.1.

Sygnał residualnego przyspieszenia siły ciężkości przedstawiony na rysunku 9.1 został wygenerowany z ciągu obserwacji przyspieszenia siły ciężkości, wykonanych w 1997 roku przy użyciu grawimetru nadprzewodzącego na stacji sieci Globalnego Projektu Geodynamicznego w Poczdamie poprzez wprowadzenie do wielkości obserwowanych poprawek z tytułu ciśnienia atmosferycznego i pływów. Z uwagi na brak dostępu do odpowiedniej jakości danych temperaturowych z 1997 roku, przy konstruowaniu modelu wykorzystano dane temperaturowe z 1999 roku. Dane te zostały przyjęte do dalszej analizy po uwzględnieniu faktu, że uśrednione w przedziale miesiąca dobowe przebiegi temperatury w następujących po sobie latach nie wykazują znaczących zmian. Dobowe przebiegi residualnego przyspieszenia siły ciężkości zostały obliczone jako średnie z miesiąca w celu zmniejszenia w nich wpływu Księżyca. Do ich modelowania przyjęto tzw.

aktywny model falowy typu $k(c\Delta p + \Delta T)$, który jest kombinacją liniową odchylenia $\Delta p(t+\Delta t)$ [hP] od średniego dziennego ciśnienia i odchylenia $\Delta T(t+\Delta t)$ [°C] od średniej dziennej temperatury. W procesie dopasowania, w dziedzinie czasu, modelu do przebiegu sygnału residuów przyspieszenia siły ciężkości obliczono wartości parametrów modelu, tj. współczynników k i c oraz przesunięcia skali czasu Δt . Tak skonstruowany model koncepcyjnie odpowiada nieparametrycznemu modelowi heurystycznemu (Welsch i Heunecke, 2001). Podane w tablicy 9.1 parametry k i Δt modelu, obliczone dla czterech różnych miesięcy (przy użyciu danych przedstawionych na rys. 9.1) są wzajemnie zgodne; różnice w ocenie parametru c są zaniedbywalnie małe. Średnie wartości tych parametrów wynoszą $c = 4.0^\circ\text{C}\cdot\text{hP}^{-1}$, $k = 0.15 \text{ nm s}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$, $\Delta t = 2.2 \text{ h}$.



Rys. 9.1. Sygnał residualnego przyspieszenia siły ciężkości dg z grawimetru SG w Poczdamie wraz z modelem opartym na danych meteorologicznych

Tablica 9.1. Obliczone wartości parametrów aktywnych modeli sygnału residualnego przyspieszenia siły ciężkości

Miesiąc	k [$\text{nms}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]	Δt [h]
styczeń	0.16	2.0
luty	0.14	2.4
lipiec	0.13	2.1
październik	0.39	2.2

Otrzymane przesunięcie skali czasu można interpretować jako efekt opóźnienia deformacji skorupy ziemskiej względem zmian temperatury i ciśnienia atmosferycznego (Krynski i Zanimonskiy, 2001c).

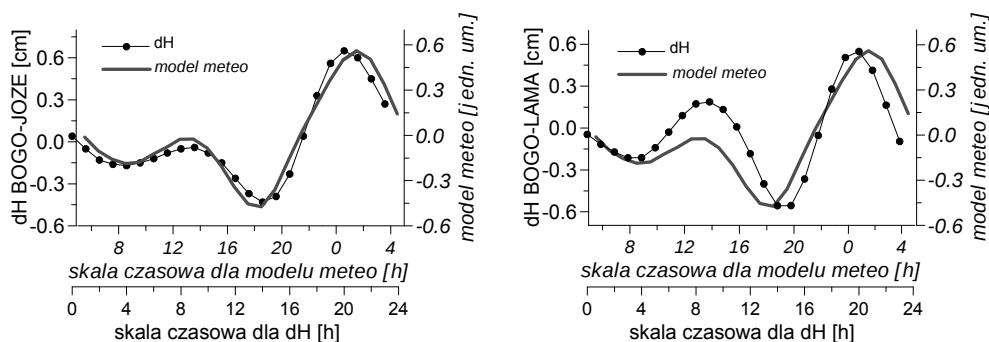
10. KORELACJA ZMIENNOŚCI SKŁADOWYCH WEKTORÓW ZE ZMIENNOŚCIĄ STANU ATMOSFERY

Jednym ze znanych źródeł błędów pozycji wyznaczonej przy użyciu techniki GPS jest błąd modelowania opóźnienia sygnału podczas jego przejścia przez atmosferę. W oprogramowaniach przeznaczonych do opracowywania obserwacji GPS stosowane są różne modele jonosfery i troposfery, od najprostszych do najbardziej współcześnie zaawansowanych. Wyniki eksperymentów (np. Gregorius i Blewitt, 1998) wskazują na istnienie zależności między pochodzącymi od atmosfery błędami w rozwiązaniach GPS a użytym oprogramowaniem oraz doбором parametryzacji (Krankowski et al., 2002). Wpływ atmosfery na rozwiązania GPS jest zazwyczaj określany przy założeniu stabilności wektora łączącego stacje GPS (stabilność w przedziale okresów charakterystycznych dla zmienności parametrów atmosfery). Im bardziej zaawansowany jest program (w sensie modelowania matematycznego obserwacji GPS) stosowany do opracowania danych GPS i im bardziej doświadczony jest operator programu (w sensie umiejętności właściwego doboru parametrów modeli oraz strategii obliczeń), tym mniejszy uzyskuje się rozrzut w wynikach obliczeń, szczególnie gdy w okresie, z którego pochodzą dane miało miejsce przesuwanie się frontu atmosferycznego (Gregorius i Blewitt, 1998) lub burza jonosferyczna (Baran et al., 2002).

10.1. Uwzględnienie parametrów meteorologicznych

Pionowe przemieszczenie stacji z tytułu nacisku spowodowanego ciśnieniem atmosferycznym może przekroczyć poziom jednego centymetra (Haefele i Kaniuth, 2001). W badaniach przedstawionych w niniejszej pracy obok ciśnienia atmosferycznego uwzględniano również wpływ temperatury. W zmienności parametrów meteorologicznych, podobnie jak w zmienności ciągów czasowych rozwiązań GPS, występują wyraźne składowe okresowe o dominujących okresach 12 h i 24 h. Badania zależności między zmiennością rozwiązań dla składowych wektorów a zmiennością parametrów meteorologicznych przeprowadzono na ciągach czasowych rozwiązań wektorów na podstawie obserwacji GPS wykonanych na stacjach Borowa Góra (BOGO), Józefosław (JOZE) i Lamkówko (LAMA). Wykorzystując obserwacje z okresu 21 dni (260–280 dni GPS 1999 r.), za pomocą programu Bernese v.4.2 uzyskano rozwiązania wektorów BOGO-JOZE (42 km) i BOGO-LAMA (159 km) w oparciu o 4 h sesje obserwacyjne z 75% pokryciem, tj. początek każdej następnej sesji jest przesunięty o 1 h w stosunku do początku poprzedniej. Ciąg czasowy danych meteorologicznych utworzono na podstawie zapisu ciśnienia i temperatury w Borowej Górze z krokiem 10 minut. Wynik modelowania zmienności składowej

wysokościowej wektorów, z zastosowaniem ciśnienia i temperatury jako niezależnych parametrów modelu, przedstawiono na rysunku 10.1.1.



Rys. 10.1.1. Dopasowanie modelu opartego na danych meteorologicznych do przebiegu zmienności rozwiązań składowej wysokościowej wektorów BOGO-JOZE i BOGO-LAMA

Do modelowania zmian składowych wektora przyjęto, użyty uprzednio do modelowania sygnału residuów przyspieszenia siły ciężkości, aktywny model falowy typu $k(c\Delta p + \Delta T)$, który jest kombinacją liniową odchylenia $\Delta p(t + \Delta t)$ [hPa] od średniego dziennego ciśnienia i odchylenia $\Delta T(t + \Delta t)$ [°C] od średniej dziennej temperatury. W procesie dopasowania, w dziedzinie czasu, modelu do przebiegu sygnału residuów przyspieszenia siły ciężkości obliczono wartości parametrów modelu, tj. współczynników k i c oraz przesunięcia skali czasu Δt . Podane w tablicy 10.1.1 parametry k i Δt modelu, obliczone dla przebiegów zmian składowej wysokościowej dwóch wektorów (przy użyciu danych przedstawionych na rys. 10.1.1) są wzajemnie zgodne. Różnice w ocenie parametru c są, podobnie jak w przypadku modelowania danych grawimetrycznych, zanedbywalnie małe. Co więcej, parametr ten przyjmuje taką samą wartość, tj. $c = 4.0^\circ\text{C} \cdot \text{hPa}^{-1}$. Wartości średnie parametrów k i Δt wynoszą $k = 0.9 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, $\Delta t = 4.5 \text{ h}$.

Tablica 10.1.1. Obliczone wartości parametrów aktywnych modeli zmienności składowej wysokościowej wektorów BOGO-JOZE i BOGO-LAMA

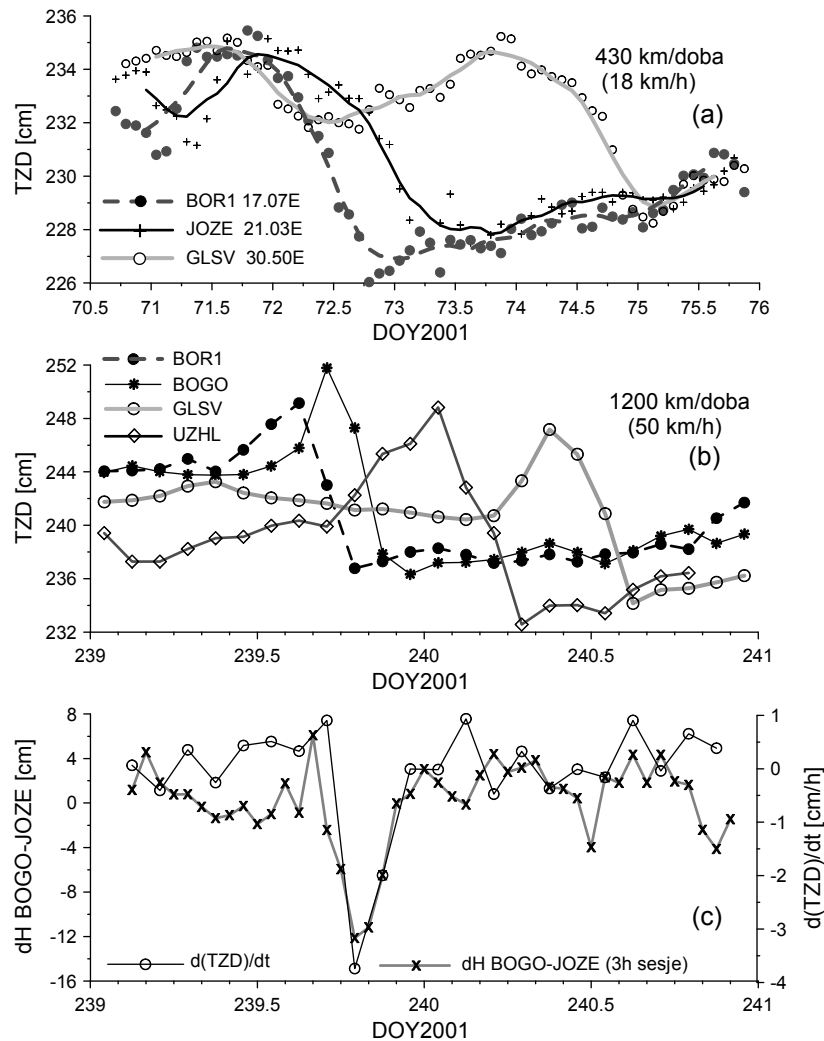
Wektor	k [mm·°C ⁻¹]	Δt [h]
BOGO-LAMA	0.8	4.5
BOGO-JOZE	1.0	4.5

Parametr przesunięcia skali czasu Δt w tablicy 10.1.1 znacząco różni się jednak od parametru Δt otrzymanego przy modelowaniu sygnału residuów przyspieszenia siły ciężkości. Przyczyny różnicy między parametrami można dopatrywać się w niejednorodności informacji zawartej w sygnałach obu typów, tj. sygnałach residuów przyspieszenia siły ciężkości i sygnałach rozwiązań GPS. Badane dobowe zmiany residuów przyspieszenia siły ciężkości mogą być interpretowane jako bezpośredni wynik pionowej deformacji skorupy ziemskiej, podczas gdy do przyczyn zmienności rozwiązań GPS – należy w pierwszej kolejności – zaliczyć wiele błędów systematycznych o dobowych i subdobowych okresach i o różnych fazach (Krynski i Zanimonskiy, 2001c).

10.2. Uwzględnienie refrakcji troposferycznej

Wpływ atmosfery na pomiary GPS może być efektywnie badany w oparciu o ciągi czasowe rozwiązań GPS, otrzymane z opracowania nakładających się sesji obserwacyjnych. Taki ciąg czasowy może być traktowany jako zapis procesu zmian składowych wektora z tytułu zmiennych warunków atmosferycznych. Przeprowadzone eksperymenty numeryczne dotyczyły badania reakcji układu pomiarowego na zakłócenia troposfery podczas przesuwającego się nad regionem frontu atmosferycznego, a także reakcji układu pomiarowego na burzę jonosferyczną.

Wyniki analizowane w pierwszym eksperymencie uzyskano z obliczeń przy użyciu oprogramowania Pinnacle, które dostarcza rozwiązań GPS znacznie silniej zniekształconych przez efekty atmosferyczne aniżeli rozwiązania z oprogramowania Bernese. Opracowano serie nakładających się sesji obserwacyjnych o długościach od 2 h do 26 h z przesunięciem 1 h (tzn. 2 h sesje z nakładką 50%, 24 h sesje z nakładką 96%) z okresu 14–29 sierpnia 2001 roku ze stacji BOGO i JOZE. Dla tego okresu przeanalizowano przebiegi całkowitego opóźnienia zenitalnego (TZD) dla stacji EPN Europy Środkowej i Wschodniej na podstawie danych dostępnych na stronach internetowych EUREF. 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 wielu stacji w strefie szerokości 50° 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. 10.2.1a i 10.2.1b) (Krynski et al., 2002c).



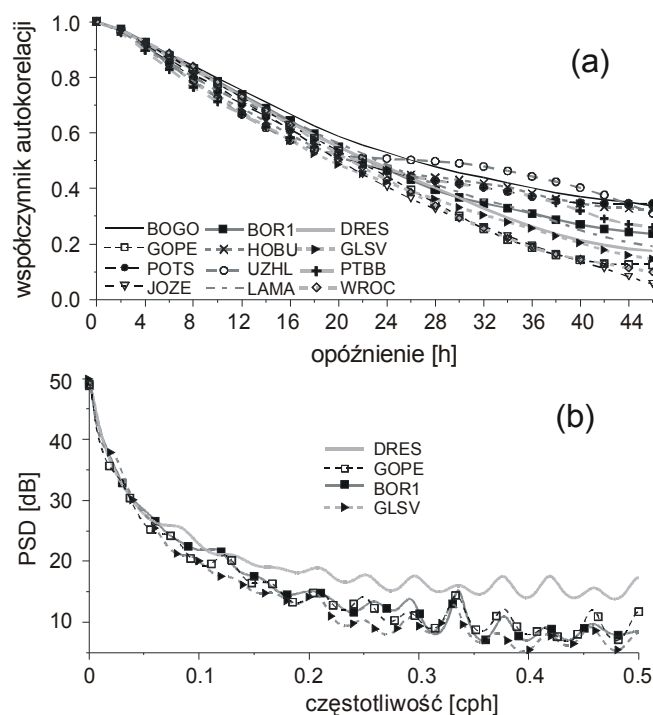
Rys. 10.2.1. Efekt frontów atmosferycznych przesuujących się z zachodu na wschód w strefie równoleżnikowej $\varphi = 50^\circ$

Przesuwający się front atmosferyczny w znaczący sposób (o blisko 15 cm) zniekształca ocenę różnicy wysokości między stacjami BOGO i JOZE, położonymi w odległości 42 km od siebie na tym samym prawie południku. Przebieg zmienności składowej wysokościowej wektora, wyznaczonej z opracowania 3 h sesji, praktycznie pokrywa się z przebiegiem prędkości zmian TZD w czasie. Niestety, rozdzielczość czasowa dostępnych danych TZD, wynosząca dla badanego okresu zaledwie 2 h (rozdzielczość czasowa rozwiązań GPS wynosi 1 h), jest niewystarczająca do poprawnego opisu tak szybkiego procesu, jakim jest przesuwanie się frontu

atmosferycznego (TZD od 2002 roku są dostępne z rozdzielczością czasową 1 h).

W ciągu czasowym rozwiązań GPS tych samych wektorów, uzyskanych przy użyciu programu Bernese, nie występują znaczące zakłócenia podczas przechodzenia frontu atmosferycznego. Istotnie, stosowanie różnych strategii obliczeń oraz używanie różnych modeli troposfery prowadzi do rozwiązań GPS w różny sposób zakłóconych zarówno błędami przypadkowymi, jak i systematycznymi (Figurski et al., 2000). Podobne wnioski dotyczą wyboru strategii obliczeń i modelowania efektów jonosferycznych (Bosy et al., 2002).

Prace nad modelowaniem wpływu refrakcji troposferycznej na wyniki rozwiązań GPS powinny być poprzedzone badaniem zmienności i możliwości prognozowania TZD w czasie i w przestrzeni. Badania takie przeprowadzono na podstawie analizy funkcji korelacji TZD, korzystając z ciągów czasowych TZD dla stacji permanentnych GPS Europy Środkowej i Wschodniej, z okresu 14 kwietnia – 16 czerwca 2002 roku, dostępnych na stronach internetowych EUREF. Obliczone funkcje korelacji oraz widma TZD przedstawiono na rysunku 10.2.2.



Rys. 10.2.2. Zmienność współczynnika korelacji TZD w dziedzinie czasu (a) oraz widma zmian TZD (b) dla wybranych stacji EPN

Błędy średnie wyznaczonych współczynników korelacji wzrastają niemal liniowo od 0 do 0.2 w przedziale przesunięcia czasowego od 0 do 24 h.

Funkcja autokorelacji TZD odniesionego do badanych stacji ma niemal identyczny przebieg dla przesunięć czasowych w granicach 24 h. Dla większych opóźnień czasowych rozrzut funkcji autokorelacji dla poszczególnych stacji obszaru Europy Środkowej staje się znaczący. Przyczyna tego zjawiska może leżeć w położeniu geograficznym stacji. Powodu zaobserwowanego rozrzutu można także dopatrywać się w ewentualnych uwarunkowaniach technicznych, jako że np. dla przypadku stacji BOGO i JOZE, oddalonych od siebie zaledwie o 42 km, względnie duża rozbieżność w przebiegach funkcji korelacji nie daje się wytłumaczyć w kategoriach położenia geograficznego. Analiza zaobserwowanej rozbieżności wykracza poza zakres przeprowadzonych badań.

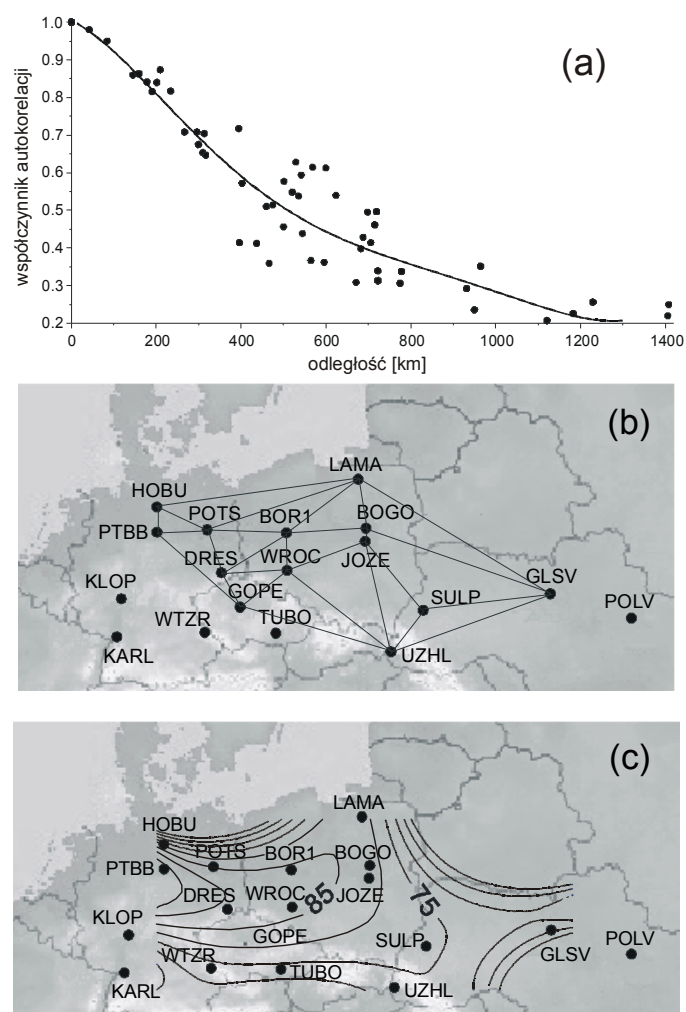
Dużym podobieństwem charakteryzują się także widma TZD dla badanych stacji. Regularne fale obserwowane na wyższych częstotliwościach widm TZD wynikają z dyskretnej reprezentacji funkcji TZD i są związane z krokiem jej próbkowania. Ze względu na prostotę modelu troposfery używanego do obliczania wartości TZD w procesie opracowywania obserwacji GPS, wartości te odpowiadają średnim TZD w przedziale próbkowania i są odniesione do średnich epok wspomnianych przedziałów. Stąd wynika pozorna gładkość i regularność przebiegów ciągów czasowych TZD.

Zmienność w ciągach czasowych TZD badana była także w dziedzinie przestrzeni (*space domain*). Współczynnik korelacji w dziedzinie przestrzeni, obliczony dla par stacji EPN zaznaczonych na rysunku 10.2.3b, w funkcji odległości między stacjami, jest przedstawiony na wykresie (rys. 10.2.3a). Rozkład tego współczynnika korelacji pokazano w postaci izolinii na mapie ze stacjami EPN (rys. 10.2.3c).

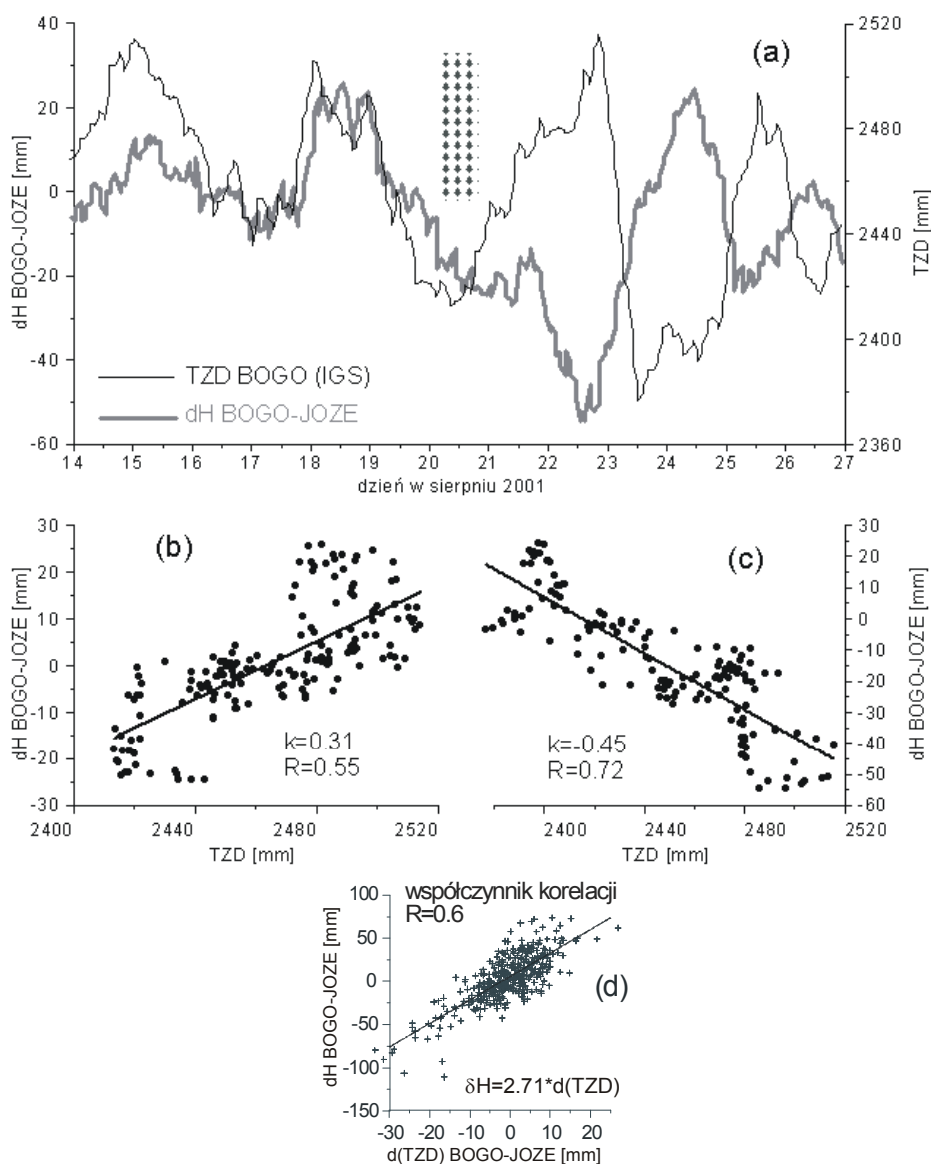
Odległości między sąsiednimi stacjami permanentnymi w Polsce nie przekraczają 300 km, podczas gdy na Ukrainie są one znacznie większe. Z opracowanej mapy izolinii rozkładu współczynnika korelacji TZD wynika, że w przeważającej części obszaru Polski współczynnik ten nie spada poniżej poziomu 80%, co świadczy o tym, że przy istniejącym rozkładzie stacji permanentnych GPS w Polsce możliwa jest efektywna interpolacja TZD w dowolnym punkcie na terenie kraju z wyjątkiem wybrzeża i rejonów górskich na południu Polski, w których – z uwagi na specyfikę zmienności stanu troposfery nad obszarami morskimi i góorskimi – stosowanie standardowych algorytmów do obliczania TZD jest niewystarczające.

Powszechnie wyrażany jest pogląd, iż błąd wyznaczenia wysokości pozostaje w prostej relacji z różnicowym błędem w TZD (Figurski, 2001; Cucurull et al., 2002). Według Cucurulla „Błąd 1 cm w różnicy TZD odpowiada błędowi 2.5 cm w wysokości”. Rezultaty przeprowadzonej analizy wskazują, iż w ciągu kilku godzin korelacja zmienności w czasie TZD

i różnicy wysokości może zamienić się na antykorelację. Wyniki ilustrujące wystąpienie zmiany z korelacji TZD i różnicy wysokości do antykorelacji, jaką zaobserwowano po opadzie deszczu, przedstawiono na rysunku 10.2.4.



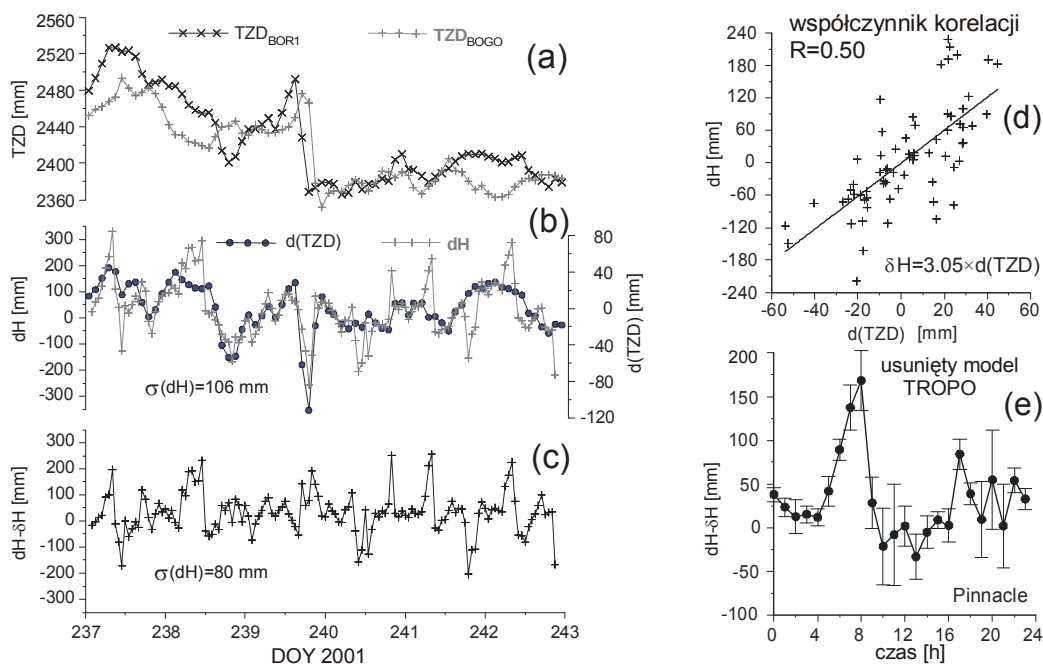
Rys. 10.2.3. Współczynnik autokorelacji TZD w dziedzinie przestrzennej dla obszaru Europy Środkowej (a) wraz z mapą badanych wektorów (b) oraz z mapą interpolowanych warstwic współczynnika korelacji (c)



Rys. 10.2.4. Zmienność korelacji TZD z dH na antykorelację (b) i (c) po opadzie deszczu w sierpniu 2001 oraz korelacja różnicy TZD z dH (d)

Zaobserwowana korelacja dH z TZD nad stacjami na końcach odpowiadającego wektora zależy od warunków pogodowych. Jakościowa analiza tej korelacji jest niezbędna do modelowania procesów zachodzących w troposferze (np. w oparciu o analizowanie korelacji między średnią

wartością TZD i różnicą TZD), a także dla zrozumienia charakterystyk samego systemu pomiarowego. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów numerycznych nie upoważniają jednak do zalecania poprawiania rozwiązań GPS na podstawie wyznaczeń współczynników korelacji między TZD i dH . Uzasadnione jest natomiast poprawianie rozwiązań GPS na podstawie modelu wykorzystującego korelację między różnicami TZD i dH , której współczynnik regresji przyjmuje wartości około 3 (rys. 10.2.4 i 10.2.5). Dla badanych przypadków wektorów współczynniki korelacji wahają się od 0.5 do 0.8. Określona na przykładzie wektora BOGO-JOZE zależność pomiędzy TZD i dH wyraża się poprzez regresję liniową o współczynnikach 0.31 i -0.45 z odpowiednimi współczynnikami korelacji 0.55 i 0.72 (rys. 10.2.4).



Rys. 10.2.5. Ciągi 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)

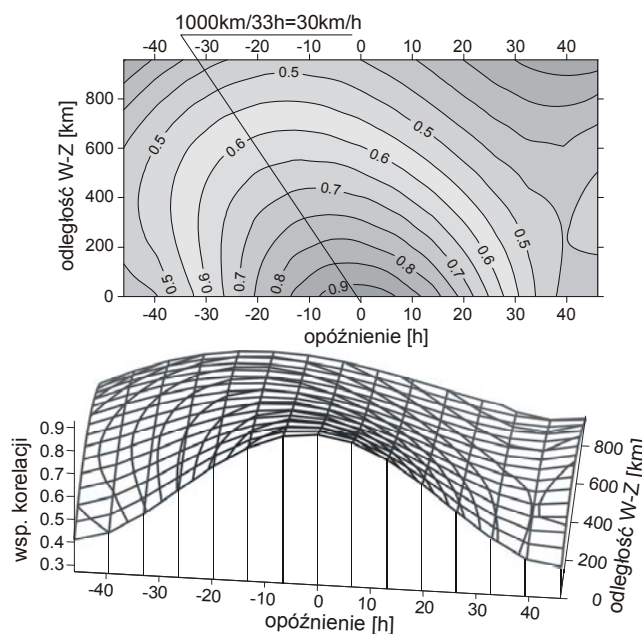
Podobne eksperymenty numeryczne przeprowadzono dla innych par stacji sieci EPN. Ilustrację wyników przedstawiono na przykładzie wektora BOGO-BOR1 o długości około 300 km. Ciągi czasowe TZD dla tych stacji mają wzajemnie podobne przebiegi (rys. 10.2.5a). Badano korelacje między przebiegiem różnic TZD dla tych stacji (rys. 10.2.5b) i przebiegiem

zmienności składowej wysokościowej wektora, obliczonych przy użyciu programu Pinnacle na podstawie 3 h sesji obserwacji GPS. Uzyskane wyniki (rys. 10.2.5d) wskazują na wyraźną zależność zmian w obliczonej różnicy wysokości dH pomiędzy stacjami od odpowiednich zmian w różnicach TZD dla tych stacji. Zależność tę można wyrazić za pomocą prostej funkcji liniowej: $\delta H = k \times d(TZD)$, gdzie k jest współczynnikiem regresji. Residua zmian ($dH - \delta H$) w składowej wysokościowej wektora, po wprowadzeniu poprawki δH z modelu (po uprzednim obliczeniu współczynnika regresji k), przedstawiono na rysunku 10.2.5c. Wprowadzenie poprawek obliczonych na podstawie otrzymanego modelu do rozwiązań GPS powoduje zmniejszenie o 20% błędów średnich tych rozwiązań. Podobne wyniki uzyskano dla innych badanych wektorów (Krynski et al., 2002b). Zaobserwowane zmienności w ciągu czasowym residuów składowej wysokościowej wektora odzwierciedlają reakcję rozwiązań GPS na niemodelowane efekty jonosferyczne. Składowa wysokościowa wektora, obliczana jako średnia z odpowiednich rozwiązań GPS z obserwacji pokrywających dłuższy interwał czasu, jest wolna od zakłóceń spowodowanych efektami troposferycznymi. Wynika to z przypadkowego charakteru procesów meteorologicznych. Średnie dobowe przebiegi rozwiązań GPS, po uwzględnieniu poprawki troposferycznej δH w składowych wysokościowych badanego wektora, przedstawiono na rysunku 10.2.5e.

Analizowano ciąg czasowy rozwiązań GPS dla wektora BOGO-BOR1, otrzymany z opracowania 2 h sesji w okresie 12–29 sierpnia 2001 roku oraz odpowiadający mu ciąg czasowy TZD. W dniach 14–21 sierpnia 2001 roku wzrostowi średniej z wartości TZD na obu końcach wektora o 1 mm odpowiada wzrost dH o 0.36 mm (współczynnik korelacji 0.5), natomiast w następującym po nim okresie, w dniach 22–29 sierpnia, wzrostowi średniej z wartości TZD na obu końcach tego wektora o 1 mm odpowiadało zmniejszenie dH o 0.47 mm (współczynnik korelacji 0.7) (Krynski et al., 2002b).

Doświadczenia zdobyte podczas badań związanych z modelowaniem zakłóceń w rozwiązaniach GPS, spowodowanych refrakcją troposferyczną, potwierdziły możliwości badania regionalnych struktur zmian atmosferycznych przy użyciu obserwacji GPS. Na podstawie ciągów czasowych TZD dla badanych stacji Europy Centralnej obliczono dwuwymiarowy współczynnik korelacji⁷ (czas i kierunek wschód-zachód przesuwania się frontu atmosferycznego) w pasie równoleżnika 50°. Mapę izolinii współczynnika korelacji wraz z jej obrazem trójwymiarowym przedstawia rysunek 10.2.6.

⁷ Procesy, z którymi związane są sygnały mogące zmieniać swoje wartości w czasie i w przestrzeni (np. szumy akustyczne, procesy w atmosferze) nazywa się procesami wielowymiarowymi (Ozimek, 1985). Stąd parametry tych procesów należą do przestrzeni o wymiarach odpowiadających wymiarom procesów.

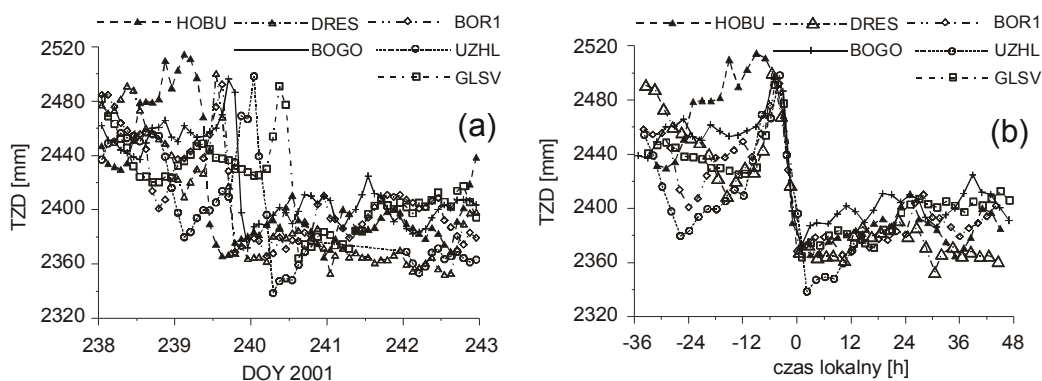


Rys. 10.2.6. Współczynnik korelacji w czasie i w odległości w kierunku równoleżnikowym pomiędzy stacjami EPN w pasie równoleżnika 50°

Im większa odległość między stacjami, tym większe jest opóźnienie związane z przesuwaniem się frontu atmosferycznego z zachodu na wschód, którego prędkość przemieszczania się wynosi około 30 km/h. Cyrkulacja mas powietrza z zachodu na wschód w postaci frontu atmosferycznego jest typowym zjawiskiem meteorologicznym w Europie Środkowej.

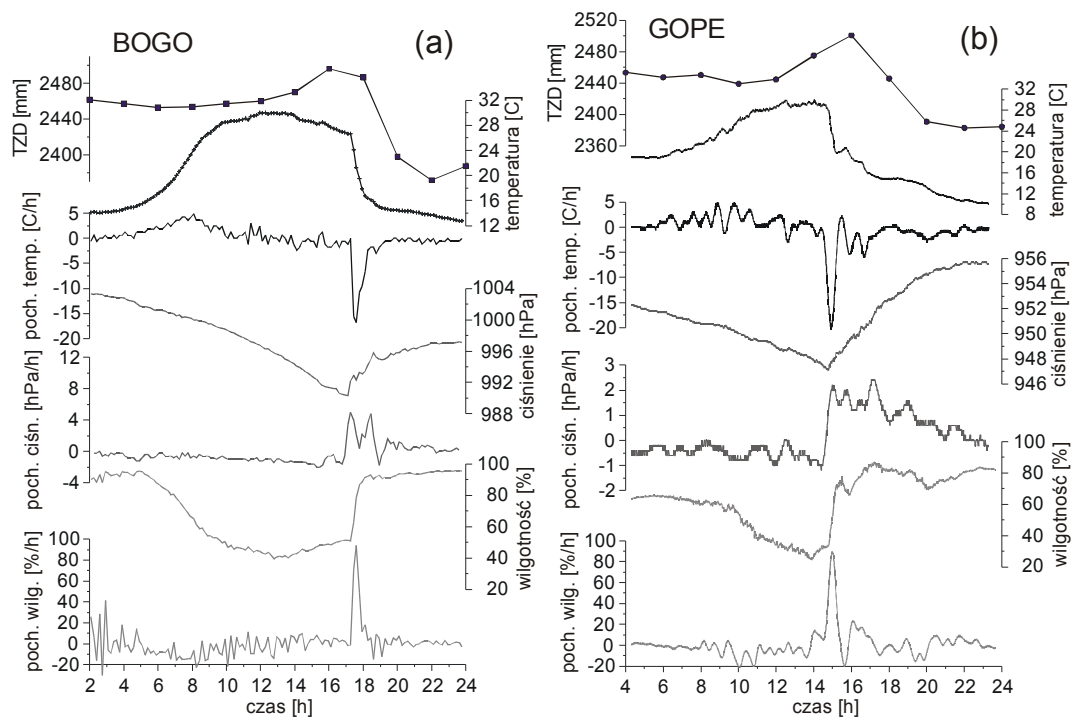
Jednym z celów prowadzonych badań była analiza możliwości poprawiania rozwiązań GPS/GLONASS o efekty dynamiki procesów troposferycznych. Badania w tym zakresie wymagają obszernej analizy dużych zbiorów danych. Ciągi czasowe TZD, dostępne obecnie z rozdzielczością czasową 1 h na stronach internetowych, stanowią materiał do badania krótkookresowych zmian stanu troposfery. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono wiele eksperymentów numerycznych pod kątem badania regularności przemieszczania się frontów atmosferycznych. Wyszczególniono najbardziej typowe charakterystyki tych przemieszczeń. Przykładowo, na rysunku 10.2.7 pokazano 5-dniowe ciągi czasowe TZD dla 6 stacji w badanym obszarze dla okresu odpowiadającego przesuwaniu się frontu atmosferycznego nad Europą Środkową z zachodu na wschód. Zmienność TZD jest podobna dla wszystkich stacji z dokładnością do wzajemnego przesunięcia w czasie (opóźnienia).

Opóźnienie to odpowiada składowej wschód-zachód wektora wzajemnego położenia stacji. Odniesienie ciągów czasowych TZD dla poszczególnych stacji do ich czasu lokalnego można uzyskać poprzez usunięcie opóźnienia w czasie, na drodze wzajemnego dopasowania krzywych przedstawiających przebiegi zmienności TZD (rys. 10.2.7b). Ciągi TZD, odniesione do czasu lokalnego, przedstawiają natężenie frontu atmosferycznego podczas jego przesuwania się nad badanymi stacjami permanentnymi GPS.



Rys. 10.2.7. Ciągi czasowe TZD dla 6 stacji w badanym obszarze w okresie przemieszczania się z zachodu na wschód frontu atmosferycznego nad Europą Środkową w czasie uniwersalnym (a) oraz w czasie lokalnym (b)

Niektóre stacje permanentne GPS, obok rejestracji danych GPS, prowadzą ciągłą rejestrację parametrów meteorologicznych. Ciągi czasowe temperatury, ciśnienia i wilgotności dla tych stacji są dostępne na stronach internetowych. Na rysunku 10.2.8 przedstawiono przykładowo przebiegi zmienności parametrów meteorologicznych, a także ich pochodnych oraz TZD dla stacji BOGO i GOPE, w dniu 27 sierpnia 2001 roku, w którym nad Europą Centralną przemieszczał się front atmosferyczny (rys. 10.2.7). Widoczna jest wyraźna zależność między zmiennością parametrów meteorologicznych oraz TZD. Ze względu jednak na małą rozdzielczość czasową dostępnych ciągów TZD (2 h w 2001 r.), współczynniki korelacji nie dają się wyznaczyć z zadowalającą dokładnością. Badanie korelacji między tymi parametrami możliwe jest w oparciu o bardziej aktualne dane, jako że od 2002 roku ciągi TZD wyznaczone są z rozdzielczością czasową 1 h. Zmienność zarówno parametrów meteorologicznych, jak i TZD dla pozostałych stacji badanego regionu jest podobna do odpowiednich zmienności na stacjach BOGO i GOPE.



Rys. 10.2.8. Dynamika zmian parametrów meteorologicznych i TZD podczas przechodzenia frontu atmosferycznego nad stacjami BOGO (a) i GOPE (b) 27 sierpnia 2001 roku

Tak wyraźny, jak na rysunku 10.2.8, wzajemny związek między parametrami meteorologicznymi i TZD nie zawsze daje się zauważyć dla wszystkich stacji permanentnych GPS badanego regionu. Gwałtowna zmiana przebiegu TZD w czasie wskazuje na pojawienie się znacznego zakłócenia atmosferycznego. Epoka formowania się frontu atmosferycznego przesuującego się z zachodu na wschód odpowiada epoce wystąpienia gwałtownej zmiany TZD na najbardziej wysuniętej na zachód stacji badanego obszaru. Na podstawie analizy ciągów czasowych TZD dla stacji EPN z obszaru Europy Środkowej wyznaczono opóźnienia czterech frontów atmosferycznych (tabl. 10.2.1).

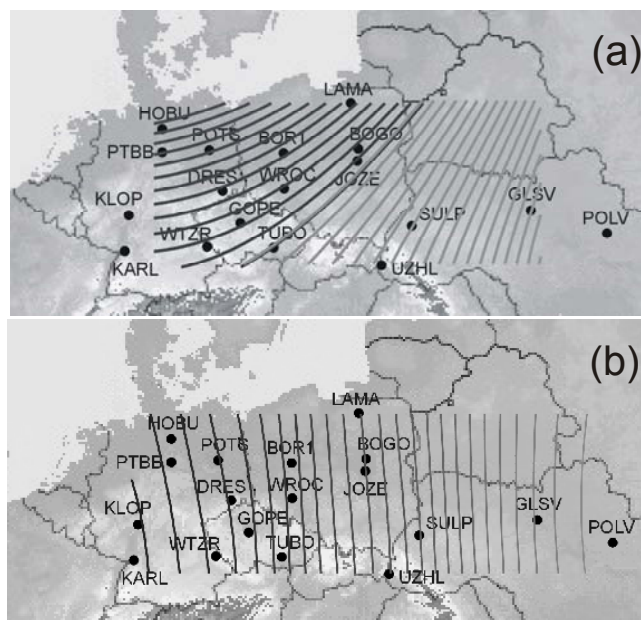
Regularnie, w odstępach przeciętnie miesiąca, masy atmosferyczne tworzące chłodny front o zwartej strukturze, tzw. solitony, przesuują się z zachodu na wschód na przestrzeni około 2 tysięcy km praktycznie w niezmiennym kształcie. Zjawisko solitonów troposferycznych znane jest meteorologom i czynione są próby zmierzające w kierunku jego opisu i modelowania. Można oczekiwać, iż badania wykorzystujące materiał obserwacyjny dostarczany przez sieci stacji permanentnych GPS przyczynią się do pogłębienia wiedzy na temat tego interesującego zjawiska meteorologicznego.

Tablica 10.2.1. Opóźnienia wybranych frontów atmosferycznych na badanych stacjach permanentnych GPS Europy Środkowej

Stacja	Długość [stopnie]	Szerokość [stopnie]	27.08.2001 opóźnienie [h]	21.01.2002 opóźnienie [h]	28.01.2002 opóźnienie [h]	8.02.2002 opóźnienie [h]
KARL	8.4	49.0		0.0	2.0	
KLOP	8.7	50.2		1.0	1.0	0.9
PTBB	10.4	52.3	1.7	3.8	1.0	0.9
HOBU	10.5	53.0	0.0	6.2	0.0	0.0
WTZR	12.9	49.1		6.2	4.8	3.9
POTS	13.1	52.4	2.6	9.1	2.1	1.8
DRES	13.7	51.0	7.7	7.7	4.0	1.9
GOPE	14.8	49.9	8.9	7.2	5.0	4.0
TUBO	16.6	49.2		13.0	6.0	5.9
BOR1	17.1	52.1	7.0	14.9	4.0	3.9
WROC	17.1	51.1	7.4	14.4	6.0	4.9
LAMA	20.7	53.9	5.8	24.5	5.0	8.2
BOGO	21.0	52.5	10.1	24.0	7.0	8.2
JOZE	21.0	52.1	9.6	22.6	7.0	
UZHL	22.3	48.6	16.8	25.9		8.2
SULP	24.0	49.8		26.4		
GLSV	30.5	50.4	25.9	47.5		
POLV	34.5	49.6		52.8		

Na rysunkach 10.2.9a i 10.2.9b przedstawiono mapy dynamiki frontów atmosferycznych przesuwających się nad Europą Środkową odpowiednio w dniach 27–29 sierpnia 2001 roku i 21–22 stycznia 2002 roku z rozdzielczością czasową 2 h. Linia zmiany odcienia izolinii odpowiada położeniu czoła frontu w 24 h po jego powstaniu w rejonie stacji HOBU.

Reakcja systemu pomiarowego na przesuwający się front atmosferyczny wydaje się w dużej mierze przewidywalna. Różnice wysokości między stacjami, otrzymane z rozwiązań GPS, są skorelowane z gradientem TZD oraz z jego zmianą w czasie. Ma to istotne znaczenie dla planowania pomiarów GPS oraz ewentualnego poprawiania wyników opracowania programami komercyjnymi typu Pinnacle obserwacji GPS, przy wykorzystaniu empirycznych modeli zakłóceń spowodowanych przesuwającym się frontem atmosferycznym. Rozwiązania GPS, uzyskane w oparciu o strategie obliczeniowe oferowane przez oprogramowanie Bernese, są wygładzone i nieobarczone wpływem frontów atmosferycznych (Krynski et al., 2002b).



Rys. 10.2.9. Mapa przesuwania się frontów atmosferycznych z okresów 27–29 sierpnia 2001 roku (a) i 21–22 stycznia 2002 roku (b) na tle stacji permanentnych GPS

Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, iż dane z sieci stacji permanentnych GPS mogą służyć do badania cyrkulacji frontów atmosferycznych w czasie i w przestrzeni (nie w wysokości). Skuteczne monitorowanie frontów atmosferycznych techniką GPS na obszarze Europy Środkowej i Wschodniej jest ograniczone z uwagi na niedostateczną liczbę stacji permanentnych GPS na Ukrainie. Istniejące w strefie równoleżnika 50° stacje permanentne GPS, z uwzględnieniem stacji w Charkowie, której uruchomienie jest planowane na najbliższe miesiące, dostarczą jednak danych umożliwiających monitorowanie zaledwie centralnych części frontów. Dodatkowa informacja o procesach zachodzących na brzegach frontu może być uzyskiwana z sieci stacji meteorologicznych działających w regionie. Dla „kalibracji” danych pogodowych niezbędna jest zatem analiza rozwiązań GPS wraz z danymi troposferycznymi oraz pogodowymi na początku posuwającego się na wschód frontu atmosferycznego, tj. w Europie Zachodniej i Centralnej (Krynski et al., 2002c; Reigber et al., 2002).

10.3. Uwzględnienie stanu jonosfery

W większości współczesnych prac z zakresu GPS poświęconych jonosferze (np. Baran et al., 2002) przebijają dwa zasadnicze kierunki badawcze. Pierwszy dotyczy zagadnienia modelowania jonosfery i wyznaczania parametrów modeli w skalach globalnej i regionalnej (WAAS,

LAAS), niezbędnych do wyznaczania w czasie rzeczywistym pozycji z obserwacji GPS, w szczególności przy zastosowaniu odbiorników jedno-częstotliwościowych. Drugi kierunek to badanie jonosfery w pojęciu czysto fizycznym. Zdaniem autorów niniejszego opracowania na uwagę zasługuje jeszcze inny, ważny i interesujący kierunek badań, a mianowicie zagadnienia jonosfery w wyznaczaniu pozycji z najwyższą dokładnością. Problem ten można podzielić na dwie części, część „dyskretną” i część „continuum”. Część dyskretna dotyczy problemów rozwiązania nieoznaczoności, nieciągłości w rejestracji cykli oraz zmian w konfiguracji satelitów w trakcie obserwacji. Efekty prac matematyków i programistów w tym zakresie znajdują odbicie w licznych publikacjach oraz w ciągłym udoskonalaniu pakietów programów przeznaczonych do opracowania obserwacji GPS zarówno dla celów komercyjnych, jak i naukowych (Krynski et al., 2002c).

Operator programów przeznaczonych do opracowania obserwacji GPS, głównie komercyjnych, zazwyczaj nie ma możliwości interwencji w algorytmy, może jedynie decydować o wyborze parametrów oraz strategii obliczeniowych, w tym w zakresie uwzględniania efektów jonosferycznych. Jednym z zasadniczych zadań, jakie postawili przed sobą autorzy niniejszego opracowania było maksymalne wykorzystanie możliwości programów obliczeniowych pod kątem stłumienia błędów dyskretnych w celu oceny błędów typu continuum. Problem continuum odnosi się do błędów wynikających z nieliniowości algorytmów obliczeniowych oraz efektów drugiego rzędu propagacji sygnału w jonosferze. Nieliniowość algorytmów wykorzystywanych do opracowywania danych w satelitarnych technikach pozycjonowania jest szeroko dyskutowana w literaturze (np. Tiberius, 1998). Dodanie nowych aspektów do dyskusji jest trudne, ale nie jest niemożliwe. Mianowicie słaba nieliniowość powoduje dobrze znany efekt detekcji, tj. konwersji zmienności parametrów procesu lub sygnałów wejściowych o charakterze losowym na błędy systematyczne w wynikach. Do określania właściwości metrologicznych systemu pomiarowego niezbędna jest ocena jakościowa i ilościowa takiej konwersji błędu przypadkowego w błąd systematyczny. Zwiększenie błędów przypadkowych obserwacji GPS, jakie ma miejsce podczas burzy jonosferycznej (Baran et al., 2002), może być wykorzystane jako sygnał do badania hipotezy detekcji.

Można pokazać, że błędy modelu jonosfery w postaci warstwy pojedynczej (SLM) są przyczyną nieliniowości w wyznaczaniu pseudo-odległości (Brunner i Gu, 1991) oraz całkowitej zawartości elektronów (TEC). Nieliniowość ta, w dalszej kolejności, zniekształca inne parametry, np. TZD (Krynski et al., 2002a) oraz składowe wektora. Mająca miejsce na przełomie wieków XX i XXI wysoka aktywność słoneczna stworzyła sprzyjające warunki do testowania hipotez odnoszących się do błędów typu continuum.

W kolejnym eksperymencie numerycznym opracowano, za pomocą oprogramowania Bernese, obserwacje GPS z czterech krajowych stacji EPN: BOR1, BOGO, JOZE i LAMA oraz jednej stacji ukraińskiej UZHL z okresu

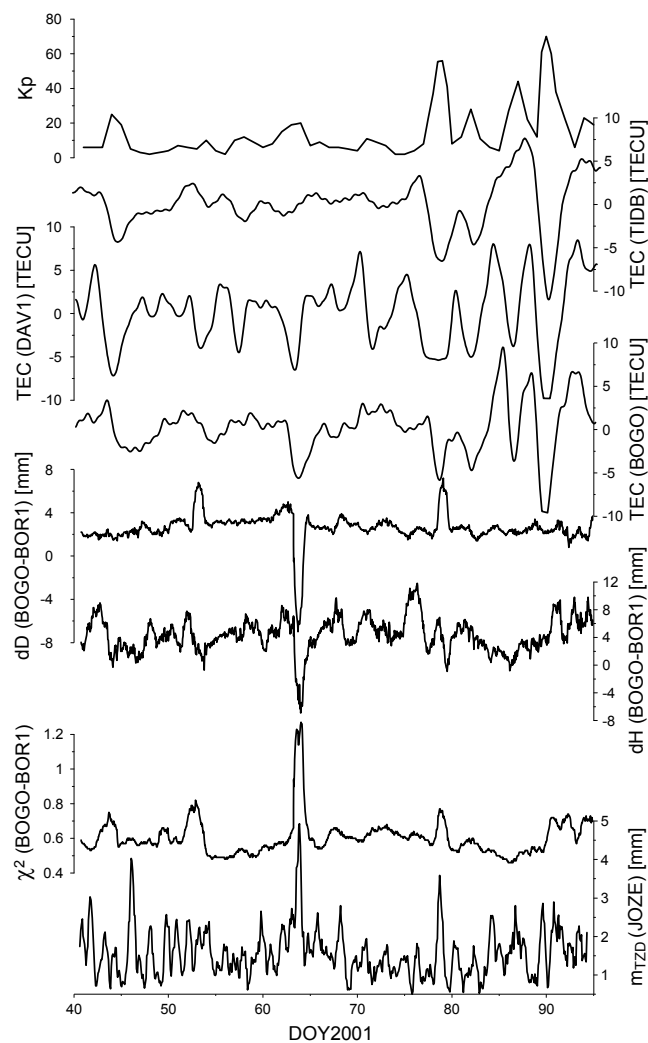
3 miesiące od lutego do maja 2001. Przebiegi zmienności rozwiązań GPS dla składowej wysokościowej oraz długości wektora BOGO-JOZE, otrzymane z opracowania 24 h sesji obserwacyjnych bez nakładki (standard dla precyzyjnego monitorowania pozycji stacji, wyznaczania parametrów ruchu obrotowego Ziemi i parametrów atmosfery) oraz z nakładką, z przesunięciem 1 h przedstawiono odpowiednio na rysunkach 5.3a i 5.3b (patrz rozdz. 5 pt. „Metodyka tworzenia ciągów zmian współrzędnych wektorów pod kątem możliwości rejestracji efektów krótkookresowych z uwzględnieniem korelacji między obserwacjami GPS”).

Z przebiegów zmienności rozwiązań GPS dla składowej wysokościowej oraz długości wektora BOGO-JOZE, otrzymanych z opracowania 24 h sesji obserwacyjnych bez nakładki (rys. 5.3a) oraz z nakładką (rys. 5.3b), z przesunięciem 1 h wynika, że ciąg o zwiększonej rozdzielczości czasowej uwypukla zakłócenia z tytułu niemodelowanych efektów w rozwiązaniach GPS znacznie wyraźniej niż ciąg rozwiązań bez nakładki. Względnie duże zakłócenie, jakie nastąpiło w okolicach 64 DOY2001 (rys. 5.3b), pokazane w powiększeniu na dolnym wykresie tego rysunku jest praktycznie niezauważalne w ciągu rozwiązań bez nakładki (rys. 5.3a). Zaobserwowane w okolicach 64 DOY2001 zakłócenie w rozwiązaniach GPS można traktować jako zjawisko losowe. Zbiega się ono z burzą jonosferyczną przewidzianą w prognozie zakłóceń geomagnetycznych IPS. Wpływ burzy jonosferycznej na obserwacje GPS nie został najwyraźniej usunięty przez model jonosfery w postaci warstwy pojedynczej podczas opracowania danych programem Bernese. Zwiększenie rozdzielczości czasowej rozwiązań GPS umożliwia zatem rozdzielenie efektów losowych od efektów o charakterze regularnym (Krynski et al., 2002c).

W celu dalszego badania efektów krótkookresowych w rozwiązaniach GPS, a w szczególności wpływu zaobserwowanej burzy jonosferycznej na rozwiązania, wykonano szereg obliczeń. Wyznaczono składowe wektorów łączących stacje EPN w oparciu o 3 h nakładające się sesje obserwacyjne z przesunięciem 0.5 h i porównano je z wynikami uzyskanymi z opracowania 24 h nakładających się sesji z przesunięciem 1 h (rys. 7.10). Dla badanego okresu oraz stacji permanentnych EPN wybrano i zestawiono ciągi czasowe parametrów TZD oraz TEC. Obok zmienności rozwiązań GPS badano również przebieg odpowiednich wartości parametru χ^2 , który jest miarą dokładności wewnętrznej opracowania danych GPS. Przebieg średniej kroczącej utworzonej ze średnich dobowych rozwiązań opartych na 3 h sesjach jest, zgodnie z oczekiwaniami, bardziej wygładzony aniżeli przebieg oryginalnych rozwiązań opartych na 3 h sesjach i jednocześnie bardzo zbliżony do przebiegu rozwiązań uzyskanych w oparciu o sesje 24 h. Efekt nieregularnych zakłóceń w otoczeniu 64 DOY2001 jest wyraźnie zauważalny w obu ciągach czasowych. Obraz zmienności ciągów czasowych uzyskanych w oparciu o 24 h sesje, przedstawiony w postaci graficznej w dolnej części rysunku 7.10a charakteryzuje oddziaływanie zakłóceń jonosferycznych na

rozwiązania GPS wszystkich wektorów w rejonie. Przebieg zmienności parametru χ^2 (rys. 7.10b) pozostaje w zgodności z przebiegami zmienności rozwiązań GPS.

Ciągi czasowe rozwiązań GPS dla składowej wysokościowej i długości wektora BOGO-BOR1, odpowiadające tym rozwiązaniom parametru χ^2 , indeksu Kp , który jest miarą aktywności słonecznej, odfiltrowanych wielkości TEC oraz błędów średnich TZD dla okresu 2 miesięcy od lutego do kwietnia 2001 roku przedstawiono na rysunku 10.3.1.



Rys. 10.3.1. Zmienność składowej wysokościowej, długości wektora oraz χ^2 na tle zmienności aktywności słonecznej i parametrów atmosfery

Wartości TEC przedstawione na rysunku 10.3.1 zostały przefiltrowane z danych IGS przy użyciu szerokopasmowego filtru w celu wygładzenia ich zmienności dobowej i wyeliminowania efektów sezonowych (z oryginalnych danych usunięto efekt okresowości dobowej).

Wiadomym jest, że zmiany aktywności słonecznej generują zmiany stanu jonosfery. Efekty burz jonosferycznych mogą przybierać znaki zarówno dodatnie, jak i ujemne, co jest potwierdzone odpowiednio korelacją lub antykorelacją indeksu K_p z TEC. W wielu interwałach czasowych badanych ciągów (rys. 10.3.1) ma miejsce antykorelacja K_p z TEC. Stan jonosfery w rejonach polarnych szczególnie silnie uzależniony jest od zmian aktywności słonecznej. Zmienność stanu jonosfery nad stacją DAV1 (Antarktyda) jest znacznie bardziej przewidywalna w oparciu o znajomość stanu aktywności słonecznej aniżeli nad stacjami BOGO lub BOR1. Co więcej, zakłócenia stanu jonosfery w rejonach polarnych są dużo wyraźniejsze niż wynikałoby to ze zmienności indeksu K_p . Zmienność TEC nad Australią (TIDB) i Europą (BOGO) jest nieco inna, choć zasadniczo odpowiada zmienności indeksu K_p (Krynski et al., 2002c).

Najniższy wykres na rysunku 10.3.1 ilustruje ocenę jakości wyznaczenia parametrów troposfery. Wzrost błędu opóźnienia troposferycznego towarzyszy niektórym zakłóceniom jonosfery. Z drugiej strony, w wyznaczonych wielkościach TZD nie obserwuje się reakcji na zakłócenia jonosfery z powodu silnej zmienności stanu troposfery.

Przeprowadzone eksperymenty numeryczne wskazują, że nie wszystkie zakłócenia jonosferyczne znajdują odbicie w składowych wektorów otrzymanych z opracowania danych GPS przy użyciu najbardziej zaawansowanej strategii obliczeniowej (Krynski et al., 2002b). Wzrost parametru χ^2 , jaki towarzyszy zwiększeniu rozrzutów rozwiązań GPS, można interpretować jako wynik słabej nieliniowości systemu pomiarowego, łącznie z algorytmem obliczeniowym. Jeśli błędy przypadkowe wywołane np. błędami rozwiązania nieoznaczoności (Mervart, 1995) znacząco rosną podczas burzy jonosferycznej, wówczas rozwiązania GPS, z uwagi na słabą nieliniowość, obciążone zostają błędami systematycznymi. Błędy systematyczne w długościach wektora i składowej wysokościowej wektora obliczonych w oparciu o 24 h sesje obserwacji GPS kształtują się na poziomie kilku milimetrów. Takie błędy systematyczne nie obciążają rozwiązań GPS, kiedy zakłóceniom jonosfery nie towarzyszy wzrost błędów przypadkowych. Tygodniowe rozwiązania GPS z okresów występowania zakłóceń jonosferycznych obciążone są błędem systematycznym na poziomie 1 mm. W ciągu czasowym rozwiązań GPS otrzymanym za pomocą oprogramowania Pinnacle nieliniowości są niezauważalne z uwagi na względnie duże błędy modelowania obserwacji GPS.

11. PODSUMOWANIE

Celem niniejszej pracy była gruntowna analiza jakościowa i ilościowa krótkookresowych zmienności rozwiązań składowych wektorów wyznaczanych z obserwacji GPS. Wykorzystano w niej ciągi czasowe rozwiązań GPS uzyskanych przy użyciu programu Bernese przeznaczanego do precyzyjnego opracowywania obserwacji GPS oraz komercyjnych programów GPPS i Pinnacle. Badane ciągi czasowe zostały wygenerowane przy zastosowaniu opracowanej w tym celu strategii optymalnej w aspekcie zarówno rozdzielczości czasowej, jak i dokładności rozwiązań. Wykazano, iż krótkookresowe zmienności rozwiązań GPS są złożeniem składowych o charakterze losowym, okresowym systematycznym oraz o charakterze chaotycznym. Zwrócono uwagę, że z powodu nieliniowości systemu przypadkowe błędy obserwacyjne generują błędy systematyczne w rozwiązaniach GPS. Strategia opracowana w ramach niniejszej pracy polegała na dobraniu odpowiedniej długości sesji obserwacyjnej gwarantującej wymaganą dokładność rozwiązania wektora oraz na zapewnieniu odpowiedniej gęstości ciągu czasowego rozwiązań poprzez ewentualne opracowywanie częściowo nakładających się sesji obserwacyjnych. Użycie ciągów czasowych rozwiązań GPS opartych na nakładających się sesjach obserwacyjnych umożliwia skuteczną detekcję efektów chaotycznych oraz oddzielenie ich od efektów o charakterze systematycznym.

Analizowano przyczyny zmienności rozwiązań GPS, biorąc pod uwagę błędy modelowania obserwacji GPS, zmienności w konfiguracji obserwowanych satelitów oraz niedoskonałości procesu opracowania obserwacji GPS, wynikające z powszechnie używanych algorytmów obliczeniowych. Dzięki opracowanej metodyce tworzenia ciągów zmian współrzędnych wektorów możliwa była identyfikacja, rozdzielenie i w dalszej kolejności modelowanie efektów krótkookresowych. Istotną rolę w rozdzielaniu i tworzeniu modeli empirycznych krótkookresowych zmienności rozwiązań składowych wektorów odgrywają dane opisujące stan atmosfery oraz obserwacje grawimetryczne. Ciągi czasowe takich danych jak naziemne obserwacje parametrów meteorologicznych, całkowite opóźnienie zenitalne (TZD), całkowita zawartość elektronów w jonosferze (TEC), współczynnik aktywności słonecznej oraz residualne przyspieszenie siły ciężkości użyto do określenia parametrów empirycznych modeli krótkookresowych zmienności rozwiązań składowych wektorów. Zastosowanie empirycznego modelu o parametrach określonych w odniesieniu do skali czasu gwiazdowego umożliwia zmniejszenie o ponad 20% rozrzutów w ciągu różnic wysokości wyznaczonych z obserwacji GPS.

Szczególną uwagę poświęcono analizie zmienności residuów przyspieszenia siły ciężkości, którego zmiany na punkcie mają związek ze zmianami składowej pionowej położenia punktu. W tym celu na stacjach

w Borowej Górze i w Lamkówku dokonano adaptacji stanowisk do ciągłej obserwacji grawimetrycznej oraz uruchomiono zautomatyzowaną rejestrację przyspieszenia siły ciężkości grawimetrem LCR-G wraz z automatyczną rejestracją danych meteorologicznych. Ciągi czasowe residuów przyspieszenia siły ciężkości, utworzone w oparciu o zgromadzone i wstępnie opracowane obserwacje z tych stacji analizowano jednocześnie z ciągami czasowymi opracowanymi na podstawie danych grawimetrycznych z kilku europejskich stacji pływowych sieci GPP. Przeprowadzona analiza korelacji wykazała, iż część sygnału zmienności w składowych wektora wyznaczanego w oparciu o obserwacje GPS ma wspólne źródło ze zmiennością residuów przyspieszenia siły ciężkości oraz że wielkość i charakter tych zmienności mają cechy lokalne. Uzyskana dla pary stacji Borowa Góra i Józefosław korelacja między sygnałem grawimetrycznym oraz sygnałem składowej wysokościowej otrzymanym z obserwacji GPS pozostaje w zgodności z gradientem pionowym przyspieszenia siły ciężkości.

Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji rozdzielczości czasowej ciągów rozwiązań GPS w aspekcie detekcji konkretnych systematycznych błędów okresowych było jednym z zasadniczych zadań badawczych niniejszej pracy. Opracowana strategia, obok pełnienia funkcji skutecznego narzędzia badawczego, może służyć do poprawiania, w czasie prawie rzeczywistym, 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,
- doskonalenia modeli matematycznych obserwacji GPS,
- tworzenia empirycznych modeli do poprawiania wyników rozwiązań GPS,
- projektowania pomiarów GPS,
- formułowania strategii opracowywania pomiarów GPS.

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 ciągów obserwacji przyspieszenia siły ciężkości może zatem stać się narzędziem do doskonalenia modeli pływowych. Ciągi takie wraz z ciągami rozwiązań GPS mogą znaleźć zastosowanie do modelowania lokalnych zjawisk geodynamicznych.

Podziękowanie

Niniejszą pracę wykonano w ramach grantu zamawianego KBN PBZ-KBN-081/T12/2002 oraz badań statutowych Instytutu Geodezji i Kartografii. Wykorzystano w niej wyniki badań i materiały zebrane w ramach realizacji indywidualnych projektów badawczych Komitetu Badań Naukowych (granty No 9T12E01918 i 8T12E04520).

Autorzy wyrażają podziękowanie pracownikom Zakładu Geodezji i Geodynamiki IGIK mgr inż. Helenie Bieniewskiej, mgr inż. Magdalenie Mańk oraz Łukaszowi Żakowi za wykonanie programami GPPS i Pinnacle obliczeń obserwacji GPS oraz dr inż. Pawłowi Wielgoszowi z Instytutu Geodezji Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego za wykonanie obliczeń obserwacji GPS programem Bernese. Wyniki tych obliczeń posłużyły do wygenerowania analizowanych w pracy ciągów czasowych rozwiązań GPS.

W części pracy dotyczącej analizy krótkookresowych zmienności w ciągach residuów obserwacji grawimetrycznych wykorzystano między innymi dane obserwacyjne ze stacji Black Forest, Józefosław, Kijów i Metsahovi, udostępnione autorom odpowiednio przez Uniwersytet w Karlsruhe, Instytut Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej, Instytut Geofizyki w Kijowie oraz Instytut Geodezyjny w Helsinkach. Autorzy wyrażają podziękowanie wymienionym instytucjom za udostępnienie do badań materiału obserwacyjnego.

Szczególne wyrazy podziękowania autorzy monografii kierują pod adresem prof. Lubomira Włodzimierza Barana za wykonanie wnikliwej recenzji i za wysiłek włożony w opracowanie krytycznych uwag. Uwagi zawarte w recenzji prof. Lubomira W. Barana zostały wykorzystane przy opracowaniu licznych poprawek i uzupełnień do niniejszej pracy.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Baran L.W., 1996, *Participation of the Lamkowko Satellite Observatory in National and International Programmes of Geodynamic Research*, Artificial Satellites, Planetary Geodesy, No 28, Vol. 31, No 3, Warsaw, pp. 113–122.
- [2] Baran W., Shagimuratov I.I., 1998, *The use of GPS for Monitoring of the Ionospheric Disturbances*, IAG Symp. Vol. 118, Brunner (ed.), Advances in Positioning and Reference Frames, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 252–256.
- [3] Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitzina N.J., 1997, *The Use of GPS for Ionospheric Studies*, Artificial Satellites, Journal of Geodesy, Vol. 32, No 1, Warsaw, pp. 49–60.
- [4] Baran L.W., Rotkiewicz M., Shagimuratov I.I., Wielgosz P., 2002, *Ionospheric effects during a geomagnetic storm*, International Association of Geodesy Symposia, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Vol. 125, pp. 291–296.
- [5] Bogusz J., Kruczyk M., Figurski M., Liwosz T., Pfeil M., Rogowski J.B., 2000, *Modelling of the Influence of Geophysical and Atmospheric Effects in Position and Gravity Changes*, ION GPS 2000, 19–22 September 2000, Salt Lake City, UT.
- [6] Bosy J., Figurski M., Wielgosz P., 2002, *The strategy of GPS data processing in precise local networks during rising solar activity*, GPS Solutions (in print).
- [7] Brunner F.K., Gu M., 1991, *An Improved Model for Dual Frequency Ionospheric Correction of GPS Observations*, Manuscripta Geodaetica, 16, pp. 205–214.
- [8] Bruyninx C., 1999, *Status and Prospects of the Permanent EUREF Network*, Proceeding of the Symposium of the IAC Subcommission for Europe (EUREF), Prague, June 2-5, 1999, Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerische Akademie der Wissenschaften, München, Heft No 60, pp. 42–46.
- [9] Bruyninx C. 2001, *Overview of the EUREF Permanent Network and the Network Coordination Activities*, EUREF Publication, Eds. J. Torres and H. Hornik, Bayerische Akademie der Wissenschaften, München, Germany, No 9, pp. 24–30.
- [10] Buttkus B., 2000, *Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- [11] Chojnicki T., 1997, *Analiza pływowych obserwacji grawimetrycznych wykonanych grawimetrem BN-17 (Askania Gs-11 nr 110) w Obserwatorium IGiK w Borowej Górze w okresie grudzień 1966 – grudzień 1997*, Raport dla IGiK.

- [12] Chojnicki T., 1998, *Analysis of gravity data from BN-17 (Askania Gs-11) gravimeter recorded at Borowa Gora Geodetic-Geophysical Observatory during April 1995 – July 1997*, Special Report CBK/K/95-97.
- [13] Cisak J., Kryński J., Witkowski T., 1999, *Hourly Data Upload at BOGO Permanent GPS Station and Preliminary Attempt Toward Estimate of Quality of Collected Data*, Proc. of the 5th Int. Seminar on "GPS in Central Europe", 5–7 May, 1999, Penc, Hungary, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, No 5(46), pp. 115–126.
- [14] Crossley D., Hinderer J., Casula G., Francis O., Hsu H.T., Imanishi Y., Jentzsch G., Kaarianen J., Meriam J., Meurers B., Neumeyer J., Richter B., Shibuya K., Sato T., van Dam T., 1999, *Network of Superconducting Gravimeters Benefits a Number of Disciplines*, EOS Transactions AGU, Vol. 80, No 11, March 16.
- [15] Cucurul L., Sedo P., Behrend D., Cardellach E., Rius A., 2002 *Integrating NWP products into the analysis of GPS observables*, Physics and Chemistry of the Earth, 27, pp. 377–383.
- [16] Delmelle P., Baxter P., Beaulieu A., Burton M., Francis P., Garcia-Alvarez J., Horrocks L., Navarro M., Oppenheimer C., Rothery D., Rymer H., St. Ammand K., Stix J., Strauch W., Williams-Jone G., 1999, *Origin, Effects of Masaya Volcano's Continued Unrest Probed in Nicaragua*, EOS Transactions, AGU, Vol. 80, No 48, November 30, 1999.
- [17] Figurski M., Wielgosz P., Bosy J., 2000, *Reduction of ionospheric refraction in local geodynamic networks*, Reports on Geodesy, No 8 (54), pp. 75–79.
- [18] Figurski M., 2001, *Określenie wybranych parametrów atmosfery na podstawie permanentnych obserwacji GPS i ich wpływ na dokładność opracowań pomiarów satelitarnych*, BEL Studio, Warszawa.
- [19] Gandolfi S., Gusella L., Perfetti N., Dubbini M. 2003, *Accuracy and precision vs software and different conditions using Italian GPS fiducial network (IGFN) data*, Presented at 7th Bilateral Geodetic Meeting Italy–Poland, Bressanone, Italy, 22–23 May 2003, Reports on Geodesy, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, Warsaw University of Technology, No 2 (65), pp. 65–71.
- [20] Gregorius T., Blewitt G., 1998, *The effect of weather fronts on GPS measurements*, GPS World, May, pp. 52-60.
- [21] Guyer R.A., Johnson P.A., 1999, *Non-linear Mesoscopic Elasticity: Evidence for a New Class of Materials*, Physics Today, Vol. 52, No 4.
- [22] Haeefe P., Kaniuth K., 2001, *Analysis of Time Series of GPS Height Estimates with Regard to Atmospheric Pressure Loading*, IAG International Symposium on Vertical Reference Systems, 21–23 February 2001, Cartagena, Colombia, International Association of Geodesy Symposia, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, eds.

- H. Drewes, A. Dodson, L.P.S. Fortes, L. Sánchez, P. Sandoval, Vol. 124, pp. 97-100.
- [23] Harris F.J., 1978, *On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform*, Proc. IEEE, Vol. 66, January 1978, pp. 51-83.
- [24] Hinderer J., 1997, *Relative Gravimetry and the Study of the Earth's Structure and Dynamics*, Gravity, Geoid and Marine Geodesy (eds. Segawa, J., Fujimoto, H., Okubo, S.) IAG Symposia, Vol. 117, International Symposium Tokyo, Japan, September 30 – October 5, 1996.
- [25] Hofmann-Wellenhof B., Remondi B.W., 1985, *Determination of the trajectory of a Moving Platform Using GPS Carrier Phase*, Proceedings of Joint Meeting of Study Groups 5B and 5C of FIG on Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys, 1-3 July 1985, Universitärer Studiengang Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 20-2, München, October 1985, pp. 443-462.
- [26] Hugentobler U., Schaer S., Fridez P., 2001, *Bernese GPS Software Version 4.2*, Astronomical Institute, University of Berne.
- [27] Krankowski A., Baran L.W., Shagimuratov I.I., Cisak J., 2002, *Influence of Ionosphere in Antarctic Region on GPS Positioning Precision*, Collection of Papers and Viewgraphs of IGS/IAACs Ionosphere Workshop, ESOC Darmstadt, Germany, January 17-18, 2002.
- [28] Krynski J., Cisak J., 2000, *Preliminary Analysis of the GPS Derived Vector Borowa Gora – Józefoslaw*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Warsaw, Poland, Vol. XLVII, No 100, pp. 35-50.
- [29] Krynski J., Zanimonskiy Y., Wielgosz P., 2000, *Short Time Series Analysis of Precise GPS Positioning*, Presented at the XXV General Assembly of European Geophysical Society, Nice, France, 25-29 April 2000.
- [30] Kryński J., Zanimonskiy Y., 2000, *Regularne zmiany przyspieszenia siły ciężkości na podstawie analizy krótkich szeregów obserwacyjnych*, Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu Nr 394, Geodezja i Urządzenia Rolne XVII, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Wrocław, Poland, pp. 253-263.
- [31] Krynski J., Zanimonskiy Y., Wielgosz P., 2001, *Potentiality of GPS as a Tool for Short Term Geodynamics*, Presented at the XXVI General Assembly of European Geophysical Society 2001, Nice, France, 24-31 March 2001.
- [32] Kryński J., Zanimonskiy Y., 2001a, *Zmienność rozwiązań wektorów wyznaczanych z kilkugodzinnych sesji obserwacyjnych GPS*, Zeszyty Naukowe, Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych, Dęblin, 2001,

- Dodatek nr 2/2001, Materiały z konferencji naukowej "Satelitarne metody wyznaczania pozycji we współczesnej geodezji i nawigacji", Dęblin, 22–23 maja 2001, pp. 52–62.
- [33] Krynski J., Zanimonskiy Y., 2001b, *Contribution of Data from Polar Regions to the Investigation of Short Term Geodynamics. First Results and Perspectives*, SCAR Report, Publication of the Scientific Committee on Antarctic Research, Scott Polar Research Institute, Cambridge, UK.
- [34] Krynski J., Zanimonskiy Y., 2001c, *Common Features of Time Series of Superfluous Gravity, GPS Derived Positions and Meteo Data within Diurnal Interval*, Proceedings of the IAG 2001 Scientific Assembly, Vistas for Geodesy in the New Millennium, 2–7 September 2001, Budapest, Hungary.
- [35] Kryński J., Zanimonskiy Y., 2001d, *Obserwowane lokalne okresowe zmiany położenia stacji geodezyjnych*, Seminarium Naukowe Sekcji Dynamiki Ziemi Komitetu Geodezji PAN, 26–27 listopada, 2001, Warszawa, Poland.
- [36] Krynski J., Zanimonskiy Y.M., 2002a, *Quality Structure of Time Series of GPS Solutions*, Proceedings of the 14th General Meeting of the Nordic Geodetic Commission, Espoo, Finland, 1–5 October 2002, pp. 259–264.
- [37] Krynski J., Zanimonskiy Y.M., 2002b, *Detection of Large-Scale Troposphere Solitons Using Data from Continuous GPS Arrays*, EOS Trans. AGU, 83(47), Fall Meet. Suppl., Abstract G21A-0960, 2002.
- [38] Krynski J., Zanimonskiy Y., Wielgosz P., 2002a, *Modelling biases in GPS Positioning Based on Short Observing Sessions*, Presented at the XXVII General Assembly of European Geophysical Society, Nice, France, 21–26 April 2002.
- [39] Krynski J., Cisak J., Zanimonskiy Y.M., Wielgosz P., 2002b, *Variations of GPS Solutions for Positions of Permanent Stations – Reality or Artifact*, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Ponta Delgada, Portugal, 5–7 June 2002, EUREF Publication No 12, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 29, Frankfurt am Main, pp. 320–325.
- [40] Kryński J., Zanimonskiy Y.M., Cisak J., Wielgosz P., 2002c, *O zależnościach pomiędzy stanem atmosfery a wynikami opracowań obserwacji GPS*, Materiały (CD) z Seminarium Sekcji Sieci Geodezyjnych Komitetu Geodezji PAN oraz Komisji Geodezji Satelitarnej Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN "Satelitarne Metody Wyznaczania Pozycji we Współczesnej Geodezji i Nawigacji", 16–17 September 2002, Warszawa-Józefosław, Poland.
- [41] Krynski J., Zanimonskiy Y.M., 2003a, *Investigation of Regional Troposphere Processes Using EPN Data*, Symposium of the IAG

- Subcommission for Europe (EUREF) held in Toledo, Spain, 4–7 June 2003, EUREF Publication, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main (in press).
- [42] Krynski J., Zanimonskiy Y.M., 2003b, *Towards More Reliable Estimation of GPS Positioning Accuracy*, Proceedings of the XXIII General Assembly of IUGG, June 30 – July 11, 2003, Sapporo, Japan (in press).
- [43] van der Marel H., Pesec P., 1999, *Exploitation of ground based GPS for climate and numerical weather prediction applications*, Proceeding of the Symposium of the IAC Subcommission for Europe (EUREF), Prague, 2–5 June 1999, Veröffentlichungen der Bayerischen Kommission für die Internationale Erdmessung der Bayerische Akademie der Wissenschaften, München, Heft No 60, pp. 51–53.
- [44] Melchior P.J., 1983, *The tides of the Planet Earth*, 2nd Ed. Pergamon Press, Oxford.
- [45] Mervart L., 1995, *Ambiguity Resolution Techniques in Geodetic and Geodynamic Applications of the Global Positioning System*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Schweizerische Geodätische Kommission, PhD thesis, Vol. 53.
- [46] Moritz H., 1980, *Advanced Physical Geodesy*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- [47] Neumeyer J., Dittfeld H.J., 1997, *Results of Three Year Observation with Superconducting Gravimeter at the GeoForschungsZentrum Potsdam*, Journal of Geodesy, Vol. 71, pp. 97–102.
- [48] Neumeyer J., Barthelmes F., Combrinck L., Dierks O., Fourie P., 2002, *Analysis Results from the SG Registration with the Dual Sphere Superconducting Gravimeter at SAGOS (South Africa)*, Marees Terrestres Bulletin d'Informations, International Center for Earth Tides, BIM 135, 15 Juillet 2002, pp. 10607–10616.
- [49] Nuttall A.H., Carter G.G., 1982, *Spectral Estimation Using Combined Time and Lag Weighting*, Proc. IEEE, Vol. 70, September, pp. 1115–1125.
- [50] Ollikainen M., 1997, *Determination of Orthometric Heights Using GPS Levelling*, Publications of the Finnish Geodetic Institute No 123, Helsinki, 1997.
- [51] Ozimek E., 1985, *Podstawy teoretyczne analizy widmowej sygnałów*, Warszawa: PWN.
- [52] Pesec P., 1999, *A Possible New Role of Permanent Satellite GPS Stations in Central Europe*, Proc. of the EGS XXIII General Assembly, the Hague, the Netherlands, April 21–23.
- [53] Poutanen M., Koivula H., Ollikainen M., 2001, *On the Periodicity of GPS Time Series*, Proceedings of IAG 2001 Scientific Assembly, 2–7 September 2001, Budapest, Hungary.
- [54] Reigber C., Gendt G., Dick G., Tomassini M., 2002, *Water Vapour*

- Monitoring for Weather Forecasts*, GPS World, Vol. 13, No 1, pp. 18.
- [55] Schaer S., 1999, *Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System*, PhD Thesis, Astronomical Institute, University of Berne.
- [56] Teunissen P.J.G., 2002, *The Parameter Distributions of the Integer GPS Model*, Journal of Geodesy (2002), Vol. 76, No 1, pp. 41–48.
- [57] Tiberius C., 1998, *Recursive data processing for kinematic GPS surveying*, Publications on Geodesy 45, Delft, July 1998.
- [58] El Wahabi A., Ducarme B., van Ruymbeke M., d'Oreye N., Somerhausen A., 1997, *Continuous Gravity Observations at Mount Etna (Sicily) and Correlations Between Temperature and Gravimetric Records*, Proceedings of the Workshop: Short Term Thermal and Hydrological Signatures Related to Tectonic Activities, November 15–17, 1995, Walgferdange (Grand Duchy of Luxemburg), Ed. M. van Ruymbuke, Luxemburg, Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 14, pp. 105–120.
- [59] Webley P.W., Bingley R.M., Dodson A.H., Wadge G., Waugh S.J., James I.N., 2002, *Atmospheric water vapour correction to InSAR surface motion measurements on mountains: results from a dense GPS network on Mount Etna*, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 27, No 4–5, 2002, pp. 363–370.
- [60] Welsch W.M., Heunecke O., 2001, *Models and Terminology for the Analysis of Geodetic Monitoring Observations*, Official Report of the Ad-Hoc Committee of FIG Working Group 6.1, Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, USA, 19–22 March 2001, pp. 390–412.
- [61] Wenzel H.G., 1996, *The Nanogal Software: Earthtide DataProcessing Package ETERNA 3.3*, Marees Terrestres Bulletin d'Informations, International Center for Earth Tides, BIM 124, pp. 9425–9439.
- [62] Wöppelmann G., Boucher C., Bruyninx C., Woodworth P., 1999, *Continuous GPS positioning of tide gauges*, Progress report on the survey, 29 December 1999.
- [63] Xu G., Knudsen P., 1999, *Earth Tide Effects on Static/Kinematic GPS Positioning in Denmark and Greenland*, Proc. of the EGS XXIII General Assembly, the Hague, the Netherlands, 21–23 April 1999.
- [64] Zanimonskiy Y., Krynski J., Sas-Uhrynowski A., Cisak J., 1999, *Estimation of Calibration Accuracy of the Portable Ballistic Gravimeter* (in Russian), Proceedings of the 2nd International Scientific-Technical Conference "Metrology – 99", Kharkov Institute of Metrology, Kharkov, Ukraine, 5–7 September 1999.
- [65] Zanimonskiy Y., Krynski J., 2000a, *Regular Gravity Variations in Short Time Series*, Presented at XXV General Assembly of European Geophysical Society, Millenium Conference on Earth, Planetary and Solar System Sciences, Nice, France, 25–29 April 2000.

-
- [66] Zanimonskiy Y., Krynski J., 2000b, *Towards High Frequency Geodynamics*, Presented at XXV General Assembly of European Geophysical Society, Millenium Conference on Earth, Planetary and Solar System Sciences, Nice, France, 25-29 April 2000.
- [67] Zanimonskiy Y., Krynski J., 2000c, *Towards Short Term Geodynamics*, Proceedings of the 6th Geodetic Millenium Meeting Poland-Italy, University of Mining and Metallurgy, Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering, Krakow, Poland, 29 June – 1 July 2000, Special Issue of the Reports on Geodesy, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, Warsaw University of Technology, No 8(54), pp. 47–54.

ANALYSIS OF VARIATIONS IN THE SERIES OF GPS SOLUTIONS AND SERIES OF GRAVITY OBSERVATIONS

S u m m a r y

The paper presents an original attempt of extension of investigations carried on by research teams on variability of GPS solutions for additional cognitive factors and leads to conclusions of substantial practical use. Quantitative and qualitative analysis of short-period variations of GPS-derived vector components as well as research on their mathematical modelling were the main objectives of the project. Modelling of short-period variations of vector components requires an extensive analysis of GPS solutions based on short observing sessions, taking into account correlation with variations of gravity residuals as well as with diurnal and seasonal variability of ionosphere and troposphere. Widely accessible GPS data from EPN stations: Borowa Gora, Borowiec, Jozefoslaw, Lamkowko, Bad Homburg, Dresden, Kiev, Potsdam and Uzhgorad were used in the project. Time series of GPS-derived components of vectors between the permanent GPS stations were analysed. The vectors were computed with the Bernese software as well as with commercial Pinnacle software, using short observing sessions over the intervals varying from two weeks up to half a year. Time series of gravity residuals investigated were obtained from gravity data recorded at Borowa Gora, Jozefoslaw and Lamkowko with computer-controlled LCR-G gravimeters. Meteorological data were also recorded automatically at those stations together with gravity data. Time series of gravity data recorded at tidal stations: Bad Homburg Castle, Black Forest Observatory, Brussels, Membach, Metsahovi, Potsdam, Strasbourg and Wettzell, of the Global Geodynamics Project as well as data from wide-band STS-1 seismometer at Kiev were also analysed to better interpret the variations of gravity residuals especially in terms of their local features. Periodic variations in time series, with periods from a few hours to 24h were, in particular, the subjects of investigations.

In the first step the general characteristics of short-periodic variations in time series of GPS-derived vector components and gravity residuals were investigated. Then the strategy of optimisation of temporal resolution of time series of GPS solutions for detection of periodic biases was developed. It consisted in determination of the optimal length of observing session to ensure a required accuracy for GPS solution as well as in eventual overlapping of observing sessions to provide a sufficient temporal resolution

of the time series. Spectral analysis was applied to the time series of GPS solutions of chosen vectors generated with the Bernese software with use of the strategy elaborated. Numerous numerical experiments were conducted to detect short-period biases, separate them taking into consideration their sources and to investigate possibility of their modelling.

Separate chapter in the paper has been dedicated to reliability analysis of estimation of accuracy of GPS solutions with both Bernese and Pinnacle software. The scale coefficients between the parameters of internal and external estimate of accuracy of GPS solutions were obtained on the basis of numerical experiments with numerous time series of GPS solutions.

The use of time series of overlapping GPS solutions makes possible to detect sudden changes in the GPS-derived vector components. Particular attention was paid to the influence of atmosphere on GPS solutions. Time series of Total Electron Content (TEC) in ionosphere, Total Zenith Delay (TZD) in troposphere and meteorological parameters such as temperature, air pressure and humidity as well as of solar activity parameter were generated for time intervals corresponding to time series of GPS-derived solutions investigated. Correlation between short-period variations of vector components and variations of TEC (with special attention to magnetic storms) as well as variations of TZD (with special attention to atmospheric fronts) was investigated. Numerous empirical models that reduce the level of disturbances in GPS solutions were obtained with use of correlation analysis tools.

Variations in time series of GPS solutions were compared with corresponding time series of gravity residual differences generated from data recorded at Borowa Gora, Lamkowko and Jozefoslaw stations. Empirical model for short-period variations of gravity residuals was discussed. The concept of integrated use of time series of GPS solutions and gravity was presented.

The results obtained were used for physical interpretation of short-period variations in GPS-derived vector components and variations of gravity residuals as well as to generate their empirical models.