

WYKRYWANIE SYGNAŁÓW SKOKOWYCH W SZEREGACH CZASOWYCH ZMIAN WSPÓŁRZĘDNYCH GPS

Bernard Kontny

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie. W pracy zaprezentowano zmodyfikowaną metodę różnicową wykrywania zmian skokowych w dyskretnych sygnałach pomiarowych (np. szeregach czasowych zmian współrzędnych punktów GPS) w obecności zakłóceń sygnału przypadkowym szumem pomiarowym (white noise) oraz obserwacji odstających (outliers). Metoda polega na zastąpieniu średniej ruchomej w klasycznym algorytmie metody różnicowej poprzez medianę, przez co w znacznym stopniu ogranicza się wpływ obserwacji odstających. Metodę przetestowano na symulowanych sygnałach pomiarowych. Jak wykazały obliczenia testowe, metoda jest skuteczna nawet dla stosunkowo wąskiego okna po stronie obserwacji następujących po testowanej i-tej epoce pomiarowej. Pozwala to na stosunkowo szybkie alarmowanie o zaistnieniu zmiany skokowej o amplitudzie nawet na granicy szumu pomiarowego (3 sigma). Metoda może znaleźć zastosowanie w automatycznych systemach kontrolno-pomiarowych do monitorowania przemieszczeń obiektów inżynierskich wykorzystujących satelitarny system GPS, w szczególności do monitorowania deformacji obiektów hydrotechnicznych, przemysłowych i górniczych.

Słowa kluczowe: szeregi czasowe współrzędnych, sygnały skokowe, obserwacje odstające, medianowa metoda różnicowa

WSTĘP

System ASG/EUPOS ma zapewnić dokładność pozycjonowania w czasie rzeczywistym na poziomie 3–5 cm. Dokładność taka jest wystarczająca dla większości zastosowań geodezyjnych i nawigacyjnych, zdecydowanie jednak niewystarczająca dla precyzyjnych prac realizacyjnych (tyczeniowych) oraz monitorowania i kontroli deformacji obiektów inżynierskich. Ten asortyment prac geodezyjnych wymaga często dokładności pojedynczych milimetrów. Konieczność monitorowania zachowania się niektórych obiektów w czasie rzeczywistym wynika przede wszystkim ze względów bezpieczeństwa,

© Copyright by Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Adres do korespondencji – Corresponding author: Bernard Kontny, Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław, e-mail: bernard.kontny@up.wroc.pl

np. monitorowanie dachu hali wystawienniczo-targowej w Katowicach mogłoby zapobiec tragedii, jaka się tam wydarzyła. Duże obiekty inżynieryjno-przemysłowe, typu: zapory wodne, kopalnie odkrywkowe itp., wyposażane są w stacjonarne, ostatnio coraz częściej automatyczne, systemy kontrolno-pomiarowe. Względy ekonomiczne nie pozwalają na instalowanie takich systemów na obiektach wymagających tylko czasowej, epizodycznej kontroli, np. w warunkach zagrożenia powodziowego, pożarowego czy chwilowego obciążenia krytycznego. Zagęszczenie stacji referencyjnych systemu ASG/EUPOS (odległość pomiędzy stacjami ok. 70 km) nie zaspokoi tego typu potrzeb. Dla takich zastosowań można by zatem zaproponować system precyzyjnego wyznaczania pozycji względnej i zmian pozycji w czasie rzeczywistym, który nie tylko mógłby zapewnić możliwość monitorowania obiektów inżynierskich z dokładnością pojedynczych milimetrów, ale byłby też systemem mobilnym, prostym, możliwym do szybkiego zainstalowania na obiekcie w nagłej potrzebie i szybkiego przeniesienia na inny obiekt. Koncepcja tego systemu opiera się na wykorzystaniu mobilnych, precyzyjnych odbiorników GPS, przenośnych stacji referencyjnych, lokalnego centrum obliczeniowego oraz bezprzewodowej transmisji danych pomiarowych opartej na systemach pakietowej transmisji cyfrowej oraz Internecie. Podstawowym założeniem systemu, umożliwiającym osiągnięcie wysokich dokładności wyznaczania pozycji względnej, jest skrócenie odległości pomiędzy mobilnym odbiornikiem pomiarowym a przenośną stacją referencyjną do kilkudziesięciu, co najwyżej kilkuset metrów. Dane z obu tych odbiorników, przesyłane łącznie teletransmisyjnymi do lokalnego centrum obliczeniowego, byłyby obliczane on-line, tworząc szeregi czasowe pozycji względnej, podlegające filtracji i analizie sygnału w czasie „prawie” rzeczywistym. Wyniki mogłyby być przesyłane do centrum decyzyjnego lub na badany obiekt. Wdrożenie koncepcji systemu wymagać będzie rozwiązania szeregu problemów naukowych, m.in. dotyczących opracowania algorytmów precyzyjnego wyznaczania pozycji względnej z obserwacji GPS w czasie „prawie” rzeczywistym (tzw. rozwiązań pojedynczych epok – "epoch by epoch"), metod przetwarzania sygnałów cyfrowych pozwalających na filtrację szumów i detekcję sygnału o zmianie pozycji punktu pomiarowego, metod kontroli wyników oraz zapewnienia niezawodnej teletransmisji danych. W przedstawionej pracy podjęto tematykę wykrywania zmian skokowych w szeregach czasowych współrzędnych GPS w obecności zakłóceń sygnału przypadkowym szumem pomiarowym (white noise) oraz obserwacjami odstającymi (outliers).

SFORMUŁOWANIE PROBLEMU NAUKOWEGO

Idea zastosowania automatycznych systemów pomiarowych do monitorowania deformacji obiektów hydrotechnicznych (głównie zapory), przemysłowych i górniczych, wykorzystujących satelitarny system GPS, znalazła już wiele zastosowań praktycznych [Bond 2004, Duffy et al. 2001, Günther et al. 2008, Kälber et al. 2000, Pretorius et al. 2001, Szostak-Chrzanowski et al. 2008, Zhou et al. 2005]. W większości opisanych w literaturze przypadków system taki jest wielopunktowy, wielosensoryczny, zainstalowany na stałe na obiektach wymagających ciągłego monitoringu (zapory wodne, kopalnie odkrywkowe itp.). System taki jest bardzo kosztowny, koszt jego wdrożenia w warunkach polskich przeważnie przekracza milion złotych. W literaturze przedmiotowej niewiele jest opisów małych, prostych i niezbyt kosztownych systemów przenośnych, działają-

cych w czasie rzeczywistym [Borre et al. 2001, 2002, Kim and Langley 2003, Larocca and Schaal 2005, Roberts et al. 2006]. W kraju dotąd brak jest takich rozwiązań. Zastosowanie „klasycznej” technologii RTK z własną stacją bazową nie zapewnia wymaganych dokładności i funkcjonalności takiego systemu. Główną zaletą proponowanej przez autora koncepcji systemu pomiarowego jest jego mobilność, prostota i relatywnie niewielki koszt instalacji przy zachowaniu wysokiej precyzji, przez co możliwe będzie jego wykorzystanie w bardzo różnych zastosowaniach. System będzie mógł być pomocny wszędzie tam, gdzie konieczna jest natychmiastowa informacja o zmianach pozycji względnej (przemieszczeniach) wybranych punktów na kontrolowanych obiektach położonych na otwartej przestrzeni, a wymagana wysoka dokładność wyznaczania zmian nie pozwala na użycie ogólnodostępnych serwisów pozycyjnych, np. ASG-EUPOS [Bosy i in. 2008]. Najważniejszym obszarem zastosowań systemu może być kontrolowanie obiektów inżynieryjno-technicznych, takich jak mosty, wiadukty, hale przemysłowe, wysokie budowle, dźwigi budowlane, zabezpieczenia głębokich wykopów, obiekty hydrotechniczne itp., w warunkach zagrożenia (powodzie, pożary, wichury, ekstremalne obciążenia itp.) Jednym z możliwych zastosowań może być kontrolowanie stanu geometrycznego obiektów budowlanych w czasie trwania imprez masowych (koncerty, wystawy, targi, imprezy sportowe itp.). System mógłby być również wykorzystany w pracach tyczeniowych, montażowych i budowlanych wymagających wysokiej precyzji (np. nasuwanie przeseł mostowych).

Założeniem proponowanego projektu jest opracowanie technologii pomiarowej, opartej na technice satelitarnej GNSS, umożliwiającej pomiar zmian pozycji względnej (przemieszczeń) w czasie prawie rzeczywistym (z opóźnieniem co najwyżej kilkusekundowym) z dokładnością poniżej 10 mm na poziomie ufności 95%. Opracowanie szczegółowej koncepcji oraz wdrożenie projektu w praktyce wymaga rozwiązania wielu problemów naukowych, w tym m.in.:

- opracowania algorytmów i programów komputerowych wyznaczenia krótkich wektorów GPS w czasie „prawie” rzeczywistym na podstawie pojedynczych rekordów danych ("epoch-by-epoch") lub bardzo krótkich szeregów danych [np. Bock et al. 2001, Greenfeld 2003, Rzepecka 2004];
- zastosowania odpowiednich metod filtracji szumów i wpływów zewnętrznych (atmosfera, odbicia sygnału) z szeregów czasowych współrzędnych [np. Szpunar 2006];
- wyboru i aplikacji odpowiednich metod detekcji zmian ciągłych i skokowych sygnału pomiarowego [np. Li and Kuhlmann 2008].

Szeregi czasowe współrzędnych, oprócz użytecznego sygnału pomiarowego, zawierają wpływy systematyczne (szum „kolorowy”) oraz przypadkowy szum pomiarowy (szum „biały”). Jedną z metod przetwarzania takich danych w czasie rzeczywistym jest zastosowanie filtracji Kalmana [Ince and Sahin 2000, Iyiade 2006, Li and Kuhlmann 2008], analizy falkowej [Ogaja et al. 2001] lub innych metod filtracji cyfrowej [Szpunar 2006]. Do rozwiązania pozostaje również problem identyfikacji (detekcji) niewielkich, epizodycznych zmian skokowych. W przedstawionej pracy podjęto tematykę wykrywania zmian skokowych w szeregach czasowych współrzędnych GPS w obecności zakłóceń sygnału przypadkowym szumem pomiarowym (white noise) oraz obserwacjami odstającymi (outliers).

METODY DETEKCJI ZMIAN SKOKOWYCH

Wykrywanie zmian skokowych w szeregach i sygnałach czasowych jest od dawna przedmiotem badań w analizie szeregów czasowych i przetwarzaniu sygnałów (robotyka, telekomunikacja, przetwarzanie obrazów, statystyka finansowa itp.). Wśród bardzo szerokiego spektrum metod stosowanych do tego celu wyróżnić można m.in. [Rodionow 2005]:

- metody parametryczne, takie jak klasyczny test-t; metody wymagają założenia co do rozkładu prawdopodobieństwa danych;
- metody nieparametryczne, takie jak U-test Mann–Whitney, test Wilcoxon sumy szeregu; metody te nie wymagają założenia co do rozkładu prawdopodobieństwa danych;
- metody dopasowania krzywej;
- metody oparte na analizie Bayesowskiej;
- metody regresji;
- metody sumowania kumulacyjnego (np. metoda CUMSUM);
- metody sekwencyjne, wśród których można wymienić metody będące modyfikacjami i kombinacjami ww. metod (np. ARMA, ARIMA, Filtr Kalmana itp.).

Do wykrywania zmian skokowych w sygnałach pomiarowych w czasie rzeczywistym (on-line) wykorzystywane są przede wszystkim metody sekwencyjne, wśród których do najbardziej popularnych zaliczyć można [Paavola et al. 2005]:

- metody różnicowe;
- metody probabilistyczne (testowanie parametryczne lub nieparametryczne);
- metody modelowania i predykcji sygnału (np. regresji i autoregresji liniowej lub nieliniowej).

Do najprostszych, ale jednocześnie bardzo skutecznych metod należą metody różnicowe [Paavola et al. 2005]. Metody te bazują na testowaniu różnicy wartości aktualnej i poprzedniej (przeszłej) wybranego parametru (np. średniej) szeregu czasowego:

$$|\Delta_i| = \left| \bar{x}_{i+n} - \bar{x}_{i-k} \right| \leq d_{i,kryt} \quad (1)$$

gdzie $d_{i,kryt}$ oznacza dopuszczalną wartość progową (krytyczną) różnicy parametru. Przekroczenie wartości progowej oznacza wystąpienie istotnej zmiany parametru. Wartości \bar{x}_{i-k} oraz \bar{x}_{i+n} analizowanego parametru obliczane są zazwyczaj dla ruchomych (sekwencyjnych) przedziałów k obserwacji poprzedzających obserwację i -tą oraz n obserwacji następujących po obserwacji i . Z tego też względu metoda „działa” z pewnym opóźnieniem czasowym, równym n obserwacji. Zastosowanie średniej jako analizowanego parametru wymaga wcześniejszego usunięcia trendu badanego sygnału (szeregu czasowego). Jak wykazano w pracy Paavola et al. [2005], metoda różnicowa cechuje się wysoką efektywnością detekcji sygnałów skokowych (wg przeprowadzonego w ww. pracy testu znacznie wyższą niż metody probabilistyczne oraz metody modelowania i predykcji sygnału), a także łatwością implementacji.

MODYFIKACJA SEKWENCYJNEJ METODY RÓŻNICOWEJ

W „klasycznej” metodzie różnicowej, opartej na testowaniu różnicy średniej ruchomej, obliczanej sekwencyjnie dla przedziału k obserwacji poprzedzających analizowaną obserwację i , oraz n obserwacji następujących, kryterium istotności zmiany parametru (średniej ruchomej) można sformułować następująco:

$$|\Delta_i| > d_{i,kryt} = c \cdot \hat{\sigma}_{x,i-k} \quad (2)$$

gdzie:

$$\Delta_i = \bar{x}_{i+n} - \bar{x}_{i-k} = \text{avg}(x_i : x_{i+n-1}) - \text{avg}(x_{i-k} : x_{i-1}) \quad (3)$$

a wartość $d_{i,kryt}$ obliczana jest dla przedziału k wartości poprzedzających, zaś:

$$\hat{\sigma}_{x,i-k} = \text{std}(x_{i-k} : x_{i-1}) = \sqrt{\frac{\sum_{j=i-k}^{i-1} (x_j - \bar{x}_{i-k})^2}{k-1}} \quad (4)$$

natomiast wartość c oznacza przyjęty arbitralnie (doświadczalnie lub probabilistycznie) współczynnik.

Szeregi czasowe współrzędnych GPS wyznaczone w czasie rzeczywistym (prawie rzeczywistym) charakteryzują się obecnością obserwacji odstających (outliers). W takich sytuacjach zarówno średnia ruchoma, jak i estymator odchylenia standardowego są znacznie obciążone obserwacjami odstającymi. Bardziej „odporne” na wpływ obserwacji odstających są estymatory oparte na medianie. Zatem, zastępując średnią przez medianę, otrzymamy zmodyfikowaną, „odporną” wersję metody różnicowej:

$$\Delta_i = \bar{x}_{i+n} - \bar{x}_{i-k} = \text{med}(x_i : x_{i+n-1}) - \text{med}(x_{i-k} : x_{i-1}) \quad (5)$$

$$\hat{\sigma}_{x,i-k} = 1,4825 \cdot \text{med}(\text{abs}(x_i - \text{med}(x_{i-k} : x_{i-1}))) \quad (6)$$

gdzie „odporny” estymator odchylenia standardowego $\hat{\sigma}_{x,i-k}$ obliczany jest metodą MAD [Huber, Ronchetti 2009], a współczynnik 1,4825 doprowadza estymator MAD do zgodności z rozkładem normalnym. Zmienną testową można sformułować następująco:

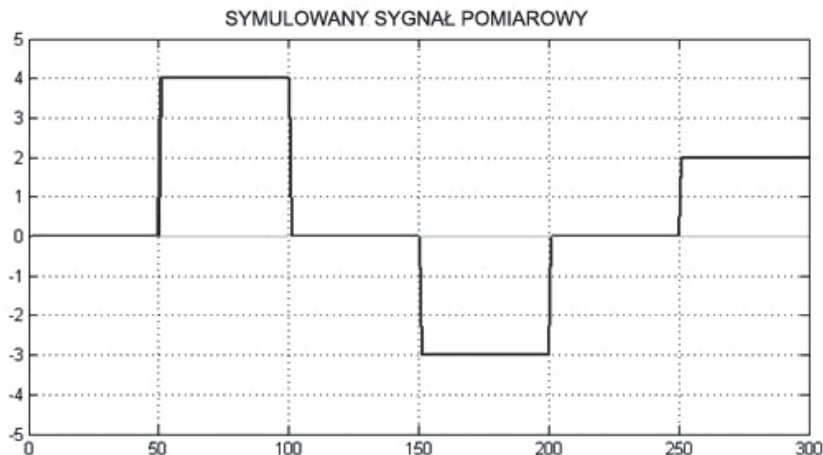
$$T_i = \frac{|\Delta_i|}{\hat{\sigma}_{x,i-k}} \quad (7)$$

Przedziały, dla których $T_i > c$, są przedziałami istotnej, skokowej zmiany wartości uśrednionej (mediany) badanego szeregu czasowego, zaś środek tego przedziału jest przyjmowany za najbardziej prawdopodobny moment skoku sygnału pomiarowego.

OBLICZENIA TESTOWE

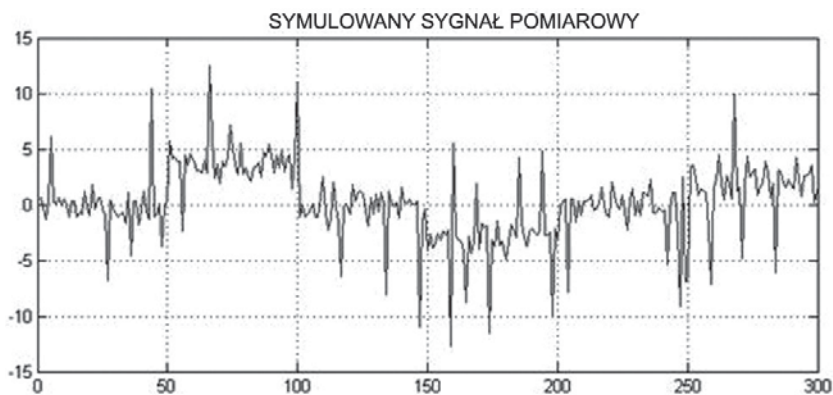
Testowanie skuteczności zmodyfikowanej metody różnicowej przeprowadzono na symulowanym szeregu 300 kolejnych obserwacji (np. współrzędnych chwilowych punktu GPS). Symulowany sygnał obserwacyjny uzyskano przez nałożenie przypadkowego

szumu białego (wartości losowe rozkładu normalnego o zerowej wartości oczekiwanej i jednostkowej wariancji) na sygnał przedziałowo stały, o wartościach równych kolejno: 0, +4, 0, -3, 0, +2 w stałych przedziałach 50 kolejnych obserwacji (rys. 1). Dodatkowo, sygnał zaburzono przypadkowo rozmieszczonymi obserwacjami odstającymi o amplitudzie przypadkowej z zakresu (-10 : +10). Wynikowy sygnał pomiarowy przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Symulowany sygnał wyjściowy, przedziałowo stały

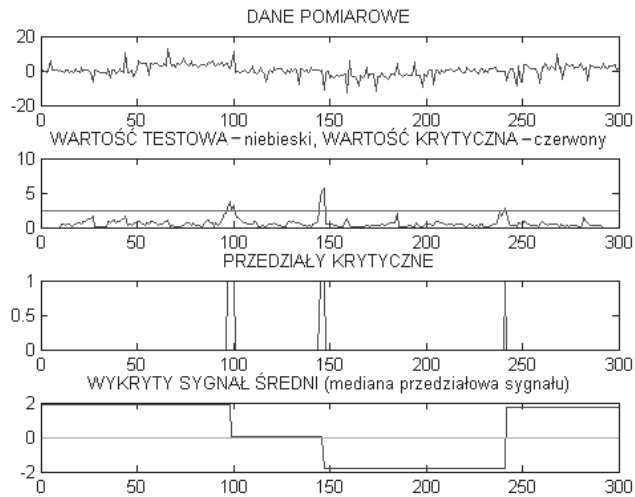
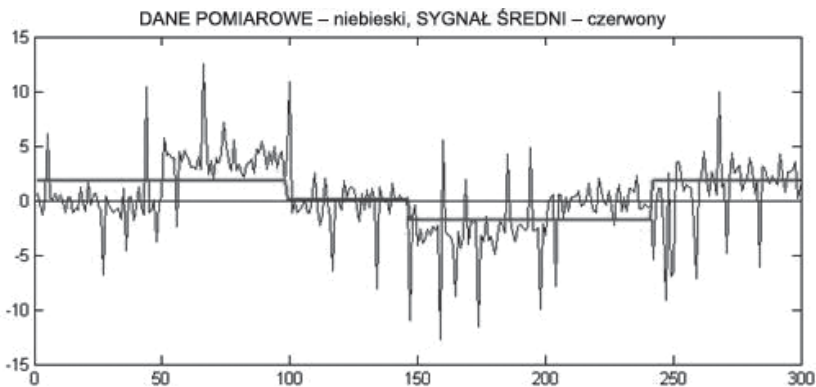
Fig. 1. Simulated output signal, constant with ranges



Rys. 2. Sygnał symulowany zakłócony szumem białym i obserwacjami odstającymi

Fig. 2. Simulated signal disturbed with the random white noise and outliers

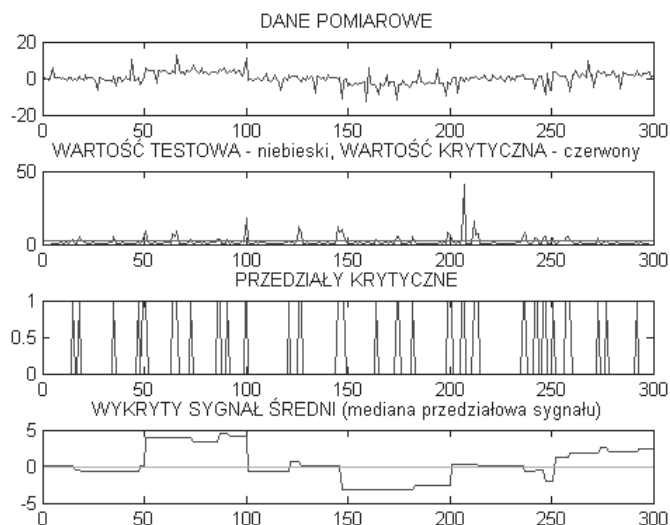
W pierwszej kolejności detekcję zmian skokowych wykonano „klasyczną” metodą różnicową, opartą na średniej ruchomej. Początkową wielkość okna uśredniania obserwacji poprzedzających i -tą obserwację badaną, i następujących po niej, ustalono na 10 obserwacji ($k = n = 10$). Kryterium istotności zmiany skokowej (współczynnik c) przyjęto na poziomie $c = 2.5$, co odpowiada, w przybliżeniu poziomowi ufności $\beta = 1 - \alpha = 0.98$ (dla rozkładu t-Studenta). Wynik testowania pokazano na rysunku 3. Wykryte zostały jedynie trzy zmiany skokowe (spośród pięciu), a odtworzony sygnał przedziałowo uśredniony daleko odbiega od sygnału wyjściowego (rys. 4).

Rys. 3. Detekcja zmian skokowych – test T oparty na średniej ruchomejFig. 3. Detection of jumping changes – test T based on the moving average

Rys. 4. Wyznaczony sygnał średni (średnia przedziałowa)

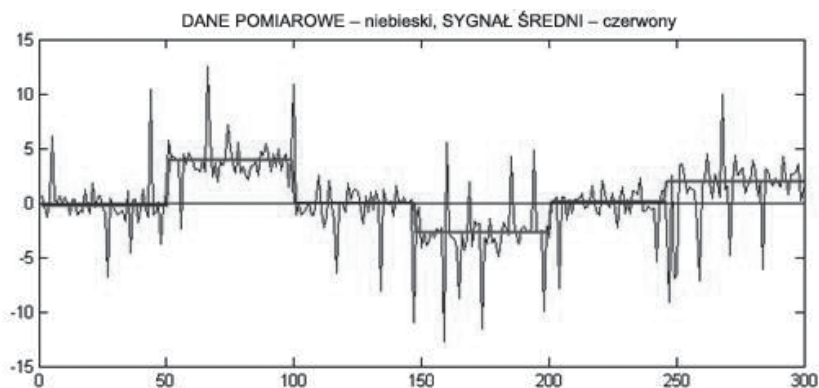
Fig. 4. Determined average signal (average with ranges)

Wyniki zastosowania zmodyfikowanej metody różnicowej dla tego samego, symulowanego sygnału pomiarowego, przedstawiono na rysunkach 5 i 6. Za pomocą testu (7) wykryto wszystkie zmiany skokowe, a odtworzony sygnał uśredniony przedziałowo (mediana przedziałowa) jest zgodny z symulowanym sygnałem wyjściowym.



Rys. 5. Detekcja zmian skokowych – test T oparty na medianie ruchomej

Fig. 5. Detection of jumping changes – test T based on the moving median



Rys. 6. Wyznaczony sygnał średni (mediana przedziałowa)

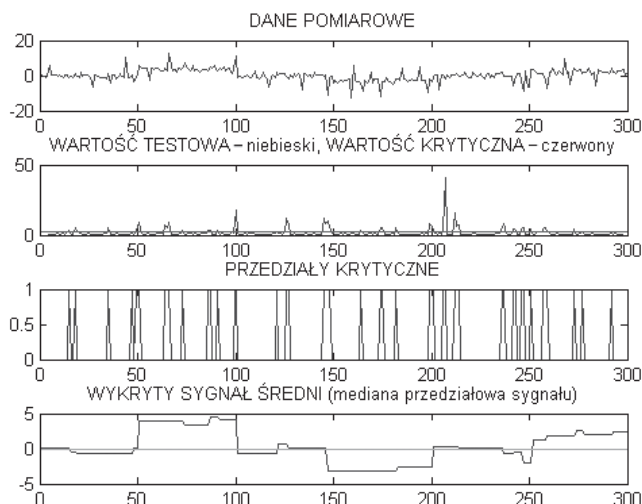
Fig. 6. Determined average signal (median with ranges)

W celu sprawdzenia skuteczności metody różnicowej wykonano obliczenia testowe dla siedmiu serii, po 100 prób każda, symulowanych sygnałów pomiarowych z losowo generowanymi zakłóceniami przypadkowymi (szum biały) i obserwacjami odstającymi. Każda seria różniła się szerokością okna poprzedzającego i następującego, branego pod uwagę do obliczenia wartości testu (7). Dla każdej pojedynczej próby odnotowywano skuteczność wykrywania skoków sygnału na poziomie odpowiednio cztero-, trzy- i dwukrotnej wartości założonego odchylenia standardowego składowej losowej sygnału (szumu). Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki testu skuteczności wykrywania skoków sygnału pomiarowego
 Table 1. Test results of the effectiveness of the jumps detection of the measuring signal

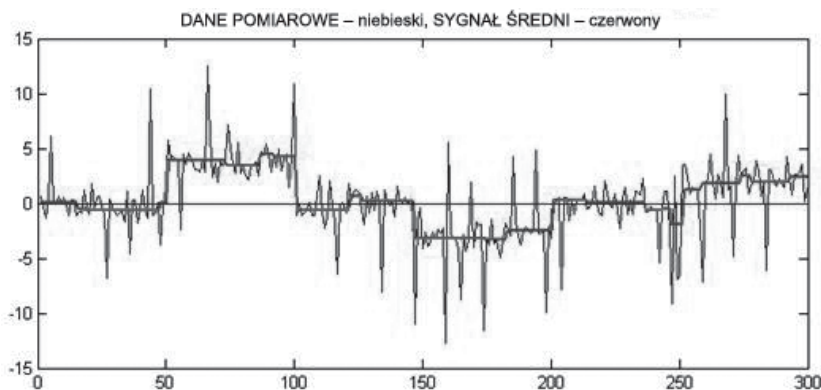
Wynik testu (100 prób): Test results (100 attempts):	Wartość symulowanego skoku – Value of the simulated jump		
	4 σ	3 σ	2 σ
k=10, n=10			
Wykryto skok symulowany A simulated jump was detected	98	84	57
Nie wykryto skoku A jump wasn't detected	2	16	43
Wykryto skok nieistniejący A non-existent jump was detected	10	8	14
k=10, n=8			
Wykryto skok symulowany A simulated jump was detected	98	78	65
Nie wykryto skoku A jump wasn't detected	2	22	35
Wykryto skok nieistniejący A non-existent jump was detected	10	25	10
k=10, n=6			
Wykryto skok symulowany A simulated jump was detected	95	85	50
Nie wykryto skoku A jump wasn't detected	5	15	50
Wykryto skok nieistniejący A non-existent jump was detected	21	20	15
k=10, n=4			
Wykryto skok symulowany A simulated jump was detected	92	85	54
Nie wykryto skoku A jump wasn't detected	8	15	46
Wykryto skok nieistniejący A non-existent jump was detected	40	41	32
k=8, n=8			
Wykryto skok symulowany A simulated jump was detected	98	84	65
Nie wykryto skoku A jump wasn't detected	2	16	35
Wykryto skok nieistniejący A non-existent jump was detected	20	30	23
k=6, n=6			
Wykryto skok symulowany A simulated jump was detected	98	80	57
Nie wykryto skoku A jump wasn't detected	2	20	43
Wykryto skok nieistniejący A non-existent jump was detected	62	82	58
k=4, n=4			
Wykryto skok symulowany A simulated jump was detected	92	86	36
Nie wykryto skoku A jump wasn't detected	8	14	64
Wykryto skok nieistniejący A non-existent jump was detected	252	306	230

Jak wynika z tabeli 1, skuteczność wykrywania sygnałów skokowych na poziomie 4σ jest wysoka nawet dla bardzo wąskiego okna testu (7). Skok sygnału na poziomie 3σ (a więc na granicy szumu) wykrywany jest prawidłowo w około 80–85 procentach, również bez względu na zastosowaną szerokość okna. Skuteczność wykrywania słabych skoków sygnału (na poziomie 2σ) jest już niższa i wynosi ok. 50–60 procent, spada poniżej 40 procent dla bardzo wąskiego okna. Zawężanie okna testu, zwłaszcza okna poprzedzającego („przeszłego”), powoduje znaczny wzrost liczby tzw. fałszywych alarmów, co niemal całkowicie eliminuje praktyczne zastosowanie takiego testu. Dla okna $k = 10$ i $n = 10$ fałszywy alarm zdarzał się średnio raz na 3 próby (symulacje), podczas gdy dla okna $k = 6$ i $n = 6$ zdarzał się średnio 2 razy dla każdej próby, a dla okna $k = 4$ i $n = 4$ zdarzał się już średnio prawie 8 razy dla każdej próby. Przyjmując częstotliwość pomiaru 1 Hz, fałszywy alarm więc mógłby się zdarzać średnio co 38 sekund. Wynik testowania sygnału pokazanego na rysunkach 1 i 2 dla okna $k = 4$ i $n = 4$ zaprezentowano na rysunkach 7 i 8.



Rys. 7. Detekcja zmian skokowych – test T oparty na medianie ruchomej dla okna $k = 4$ i $n = 4$

Fig. 7. Detection of jumping changes – test T based on the moving median for the window $k = 4$ and $n = 4$



Rys. 8. Wyznaczony sygnał średni (mediana przedziałowa) dla okna $k = 4$ i $n = 4$

Fig. 8. Determined average signal (median with ranges) for the window $k = 4$ and $n = 4$

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zaproponowana modyfikacja metody różnicowej detekcji zmian skokowych w szeregach czasowych (dyskretnych sygnałach pomiarowych), polegająca na zastąpieniu średniej ruchomej medianą ruchomą w konstrukcji funkcji testowej, powoduje znaczne podniesienie skuteczności metody dla sygnałów zakłóconych obserwacjami odstającymi. Jak wykazały obliczenia testowe, metoda jest skuteczna nawet dla stosunkowo wąskiego okna po stronie obserwacji następujących po testowanej epoce. Pozwala to na stosunkowo szybkie alarmowanie o zaistnieniu zmiany skokowej, nawet na granicy szumu pomiarowego (3 sigma). Biorąc pod uwagę, że współczesne, precyzyjne odbiorniki GPS, stosowane w automatycznych systemach kontrolnych pozwalają na wyznaczenie chwilowej pozycji względnej z dokładnością kilku milimetrów, z częstotliwością nawet do 10–20 Hz, zastosowanie zmodyfikowanej metody różnicowej pozwala na wykrycie zmian skokowych o amplitudzie pojedynczego centymetra już po jednej sekundzie.

Zaprezentowane testy zostały przeprowadzone każdorazowo na 100 przykładach symulowanych, co zdaniem autora nie daje podstaw do wyciągania daleko idących wniosków. Korzystne byłyby zastosowanie metody Monte Carlo, dla liczebności prób przekraczających co najmniej kilka tysięcy symulacji. Ponadto, rzeczywiste warunki pomiaru znacznie odbiegają od warunków symulowanych, obserwacje obciążone są wpływem czynników zakłócających o systematycznym charakterze, przez co szum pomiarowy bardziej przypomina szum kolorowy niż szum biały. Dalsze badania będą przeprowadzone dla przypadku bardziej ogólnego, kiedy sygnał pomiarowy obciążony jest zarówno zmiennym trendem nieliniowym, jak i zmiennym w czasie szumem kolorowym.

PIŚMIENNICTWO

- Bock Y., de Jonge P.J., Honcik D., Bevis M., Bock L., Wilson S., 2001. Epoch-By-EPOCH Positioning applied to dam deformation monitoring at Diamond Valley Lake, Southern California, Proceedings of 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19–22 March 2001 Orange, California, USA.
- Bond J., 2004. An Investigation on the Use of GPS for Deformation Monitoring in Open Pit Mines. M.Sc.E. Thesis, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 222, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 140 pp.
- Bosy J., Graszka W., Leończyk M., 2008. Aktywna Sieć Geodezyjna EUPOS jako element składowy państwowego systemu odniesień przestrzennych, Przegląd Geodezyjny, Nr 12/2008, 10–16.
- Borre K., de Jong K., Pichot C., 2001. Subsidence monitoring system using real-time GPS sensors, In: Proc. ION-GPS, Salt Lake City, 2001.
- Borre K., de Jong K., Pichot C., 2002. GPS Deformation Analysis with Millimeter Precision in Real-Time, GNSS, Seoul Korea.
- Duffy M., Hill C., Whitaker C., Chrzanowski A., Lutes J., Bastin G., 2001. An automated and integrated monitoring scheme for Diamond Valley Lake in California. Proceedings of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, March 19–22, USA.
- Greenfeld J.S., 2003. How long must we wait? The duration of GPS observations for short baseline measurements, Surveying and Land Information Science, Jun 2003.

- Günther J., Heunecke O., Pink S. Schuhbäck S., 2008. Developments towards a low-cost GNSS based sensor network for the monitoring of landslides, 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, LNEC, Lisbon, Portugal, 2008, May 12–15.
- Huber P. J., Ronchetti E.M., 2009. Robust statistics, John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 354 p.
- Ince C.D., Sahin M., 2000. Real-time deformation monitoring with GPS and Kalman Filter, Earth Planets Space, 52, 837–840.
- Iyiade A., 2006. GPS Time Series Land Slide Monitoring using a Weighted Extended Kalman Filtering with a DIA Procedure, Shaping the Change, XXIII FIG Congress, Munich, Germany, October 8–13, 2006
- Kälber S., Jäger R., Schwäbe R., Heimberg F., Kast K., 2000. GPS-based Online Control and Alarm System (GOCA). Proceedings of the 20. ICOLD-Congress, 2000, Peking, Report No. Q. 78 -R.14. International Commission on Large Dams, Paris, 189–209.
- Kim D., Langley R.B., 2003. On ultrahighprecision GPS positioning and navigation, Navigation: Journal of the Institute of Navigation, Vol. 50, No. 2, Summer 2003, 103–116.
- Kim D., Langley R., Bond J., Chrzanowski A., 2003. Local deformation monitoring using GPS in an open pit mine: initial study, Proceedings of IUGG Congress 2003 in Sapporo, Japan, July 2003.
- Larocca A.P.C., Schaal R.E., 2005. Millimeters in Motion, Dynamic Response Precisely Measured, GPS World, Jan 1, 2005.
- Li L., Kuhlmann H., 2008. Detection of deformations and outliers in real-time GPS measurements by Kalman Filter model with shaping filter, 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, LNEC, Lisbon, Portugal, 2008, May 12–15.
- Ogaja C., Rizos C., Wang J., James Brownjohn J., 2001. Toward the implementation of on-line structural monitoring using RTK-GPS and analysis of results using the wavelet transform, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19–22 March 2001 Orange, California, USA.
- Paavola M., Ruusunen M., Pirttimaa M., 2005. Some change detection and time-series forecasting algorithms for an electronics manufacturing process, University of Oulu, Control Engineering Laboratory, Report A No 26, March 2005.
- Pretorius C.J., Schmidt W.F., van Staden C.S., Egger K., 2001. The extensive geodetic system used for the monitoring of a 185 metre high arch dam in Southern Africa, Proceedings of 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19–22 March 2001 Orange, California, USA.
- Roberts G.W., Brown C., Meng X., 2006. Bridge Deflection Monitoring – Tracking Millimeters across the Firth of Forth, GPS World, Feb 1, 2006.
- Rodionov S.N., 2005. "A Brief Overview of the Regime Shift Detection Methods", [in:] Large-Scale Disturbances (Regime Shifts) and Recovery in Aquatic Ecosystems: Challenges for Management Toward Sustainability, V. Velikova and N. Chipev (Eds.), UNESCO-ROSTE/BAS Workshop on Regime Shifts, 14–16 June 2005, Varna, Bulgaria, 17–24.
- Rzepecka Z., 2004. Modification of Algorithms for Determination of Short Kinematic Vectors from GPS Data, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińskiego-Mazurskiego, Rozprawy i Monografie 86, Olsztyn, 2004.
- Szostak-Chrzanowski A., Chrzanowski A., Deng N., Bazanowski M., 2008, Design and analysis of multi-sensor deformation detection systems, 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, LNEC, Lisbon, Portugal, 2008, May 12–15.
- Szpunar R., 2006, Satelitarne monitorowanie przemieszczeń w czasie quasi-rzeczywistym, Rozprawa doktorska, Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska,

- Wilkins R., Bastin G., Chrzanowski A., 2003. ALERT: A fully automated real time monitoring system, Proceedings 11th FIG Symposium on Deformation Measurement, May 25–28, 2003, Santorini, Greece.
- Zhou P., Zhou B., Guo J., Li D., Ding Z., Feng Y., 2005. A Demonstrative GPS-aided Automatic Landslide Monitoring System in Sichuan Province, Journal of Global Positioning Systems (2005), Vol. 4, No. 1–2, 184–191.

JUMPING SIGNAL DETECTION IN GPS COORDINATE TIME SERIES

Abstract. A modified differencing method of the detection of irregular jumping changes in discrete measuring signals (e.g. time series of changes of coordinate points GPS) in the presence of disruptions of the signal with random measuring noise (white noise) and of accidental diverging observations (outliers) was shown at the work. The method consists in replacing the moving average in the classic algorithm of the differencing method through the median, what to a considerable degree the influence of diverging observation is being limited by. The method was tested on simulated measuring signals. How the test calculations demonstrated, the method is effective even for relatively narrow window on the side of following observations after tested measuring epoch. It allows on relatively fast alarming because of becoming known the irregular change about the amplitude even on the border of measuring noise (3 sigma). The method can find application in automatic control-measuring systems using the satellite system GPS for displacement monitoring of engineering objects, in particular for monitoring of hydro technical, industrial and mining objects' deformations.

Key words: coordinate time series, jumping signals, outliers, median difference method

Accepted for print – Zaakceptowano do druku: 30.09.2011

For citation – Do cytowania: Kontny B., 2011. Wykrywanie sygnałów skokowych w szeregach czasowych zmian współrzędnych GPS. Acta Sci. Pol. Geod. Descr. Terr. 10(3), 5–18.