

Dariusz POPIELARCZYK¹
Rafał KAŻMIERCZAK²
Grzegorz GRUNWALD³

WYZNACZANIE PIONOWEJ SKŁADOWEJ RUCHU JEDNOSTKI BATYMETRYCZNEJ W OPARCIU O TECHNIKI GNSS

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę możliwości zastosowania satelitarnego pozycjonowania RTK do precyzyjnego badania efektów roll i pitch oraz pionowego ruchu jednostki pływającej w trakcie pomiarów batymetrycznych. Opisano badania terenowe, jakie wykonano na fragmencie rzeki Wisły. Przedstawiono także wyniki obliczeń wykonanych na podstawie zebranych danych. W szczególności skupiono się na ruchu pionowym łodzi, niezbędnym do właściwej redukcji danych głębokościowych do wspólnej, referencyjnej powierzchni lustra wody.

Słowa kluczowe: batymetria, RTK, referencyjny poziom lustra wody.

1. Wstęp

Śródlądowe zbiorniki wodne, rzeki jeziora oraz kanały to nieduże powierzchniowo obszary, gdzie płaszczyznę lustra wody zazwyczaj przyjmuje się jako poziom referencyjny sondażu hydroakustycznego. Są jednak obiekty, gdzie poziom lustra wody znacznie zmienia się w czasie (zbiorniki wodne elektrowni szczytowo-pompowych) oraz obiekty hydrotechniczne, gdzie powierzchnia lustra wody (różne wysokości) dynamicznie zmienia się w czasie i w przestrzeni (obszary rzek za elektrowniami wodnymi).

Sondaż hydroakustyczny na takim obiekcie jest wyjątkowo trudny, zaś proces opracowania danych pomiarowych szczególnie narażony na wpływ błędów systematycznych oraz przypadkowych. Najważniejszym elementem jest wartość wysokości lustra wody w momencie wykonywania sondażu hydroakustycznego. Powierzchnia referencyjna nie jest powierzchnią poziomą płaską, jaką najczęściej przyjmuje się przy prowadzeniu pomiarów na niewielkich obszarach (w oparciu o odczyty z mareografów). Przy czym należy tu podkreślić niezwykłą dynamikę środowiska wodnego, znaczne zmiany wysokości lustra wody w przestrzeni oraz w czasie. Dodatkowo dochodzi pionowy ruch jednostki pływającej (heave).

Celem przeprowadzonych badań jest analiza możliwości dokładnego wyznaczenia ruchu pionowego łodzi podczas pomiarów batymetrycznych z wykorzystaniem współczesnych technik satelitarnego pozycjonowania GNSS (Global Navigation Satellite Systems).

2. Pomiary batymetryczne

Eksperymentalne prace pomiarowe zaplanowano i wykonano na fragmencie rzeki Wisły za Elektrownią Wodną Włocławek. W trakcie prac terenowych wykorzystano Zintegrowany System

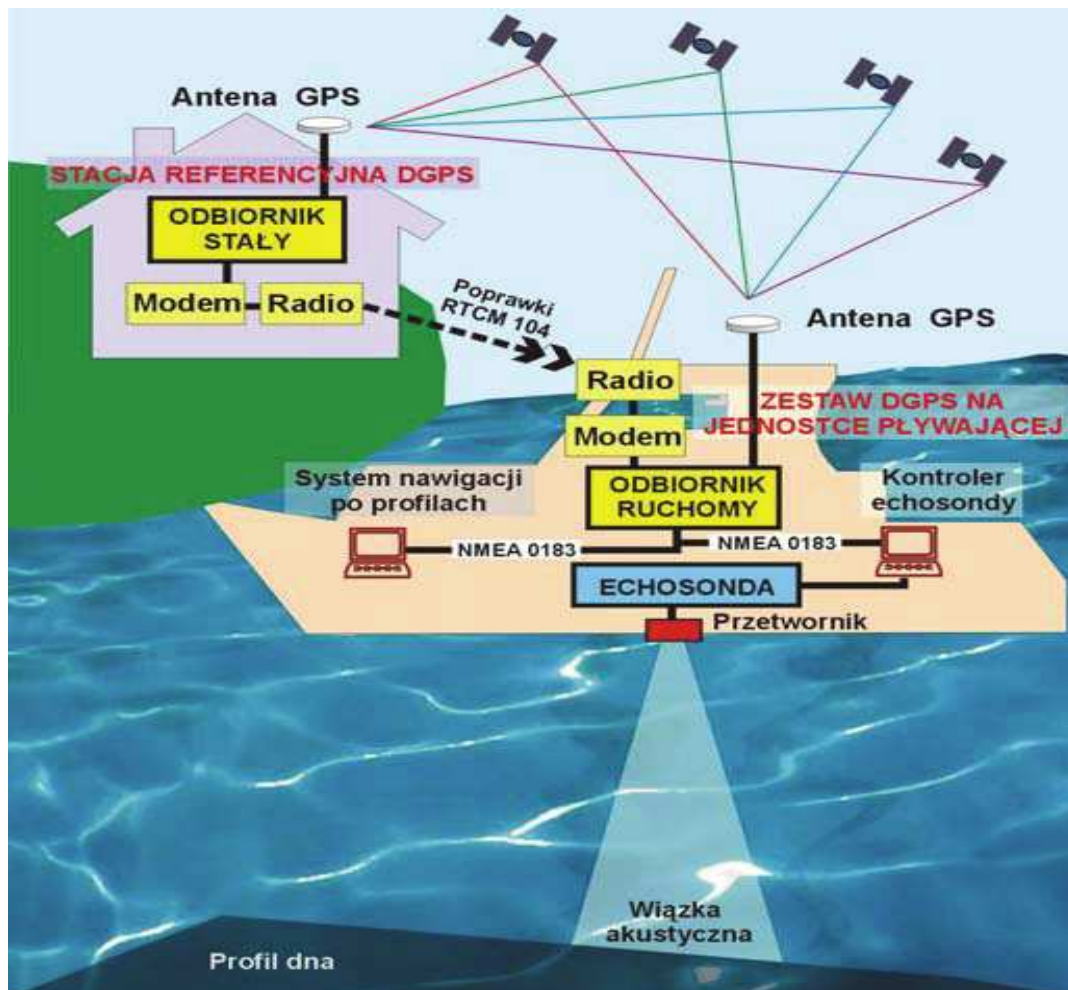
¹ dr inż., Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

² mgr inż., Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

³ mgr inż., Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Batymetryczny, opracowany i wdrożony przez zespół naukowo-badawczy Katedry Geodezji Satelitarnej i Nawigacji. Wykorzystanie najnowszych technik satelitarnej pozycjonowania RTK/DGPS (Real Time Kinematic, Differential GPS) zintegrowanych z hydroakustycznymi systemami pomiaru głębokości pozwala wykonywać badania ukształtowania dna zbiorników wodnych, obliczać objętości wody oraz umożliwia opracowywanie map batymetrycznych śródlądowych i sztucznych śródlądowych zbiorników wodnych [1].

System pomiarowy bazuje na dwóch podsystemach: satelitarnym działającym w trybie RTK lub DGPS oraz jednowiązkowej sondzie ultradźwiękowej. Sonda hydroakustyczna polega na pozyskiwaniu informacji o pozycji poziomej jednostki pływającej i głębokości zbiornika w danym punkcie pomiaru. Niezwykle istotnym aspektem pomiaru jest bardzo dokładne zgranie w czasie pomiarów satelitarnych z hydroakustycznymi.



Rys. 1. Zintegrowany System Batymetryczny

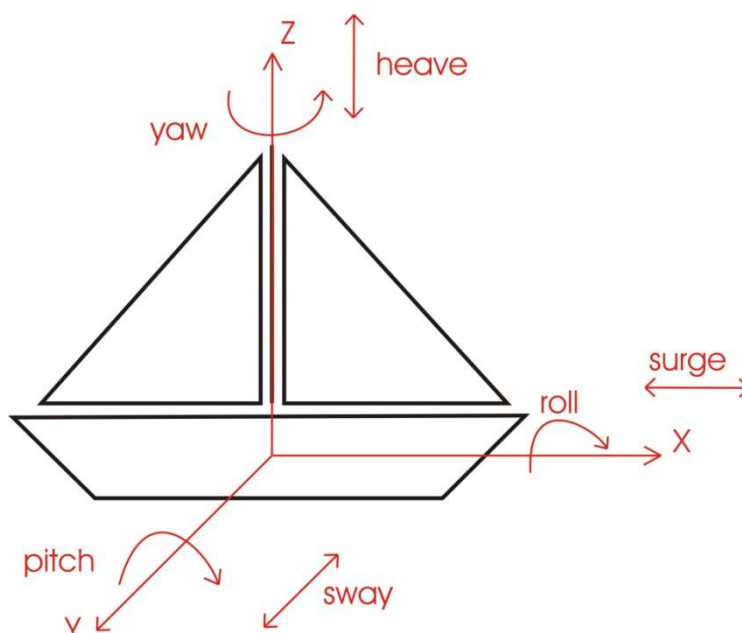
Jednostki pływające mogą podlegać trzem rodzajom ruchów powodujących przemieszczenia obiektu. Ruchy te wpływają na dokładność wykonywania pomiaru głębokości. Są to:

- heave,
- sway (inaczej dryft),
- surge.

Ponadto można wyróżnić 3 ruchy kątowe:

- roll,
- pitch,
- yaw.

Poniższy rysunek przedstawia graficzną interpretację problemu:



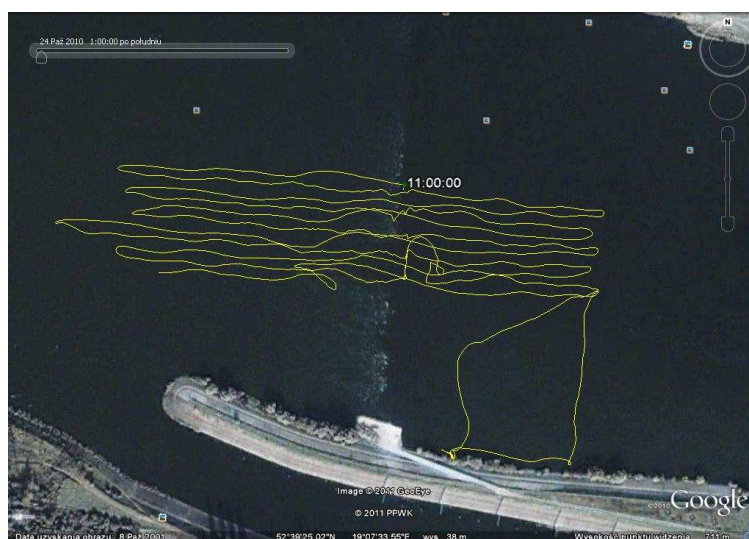
Rys. 2. Ruchy powodujące przemieszczenia liniowe oraz kątowe jednostki pływającej

3. Opis badań terenowych

Eksperymentalne pomiary batymetryczne wykonano 24.10.2010 roku. Podczas prac terenowych zbadano także kształt dna fragmentu rzeki Wisły za Elektrownią Włocławek. Uwzględniając dynamikę zbiornika wodnego za Elektrownią, sondaż hydroakustyczny zaplanowano w czterech etapach:

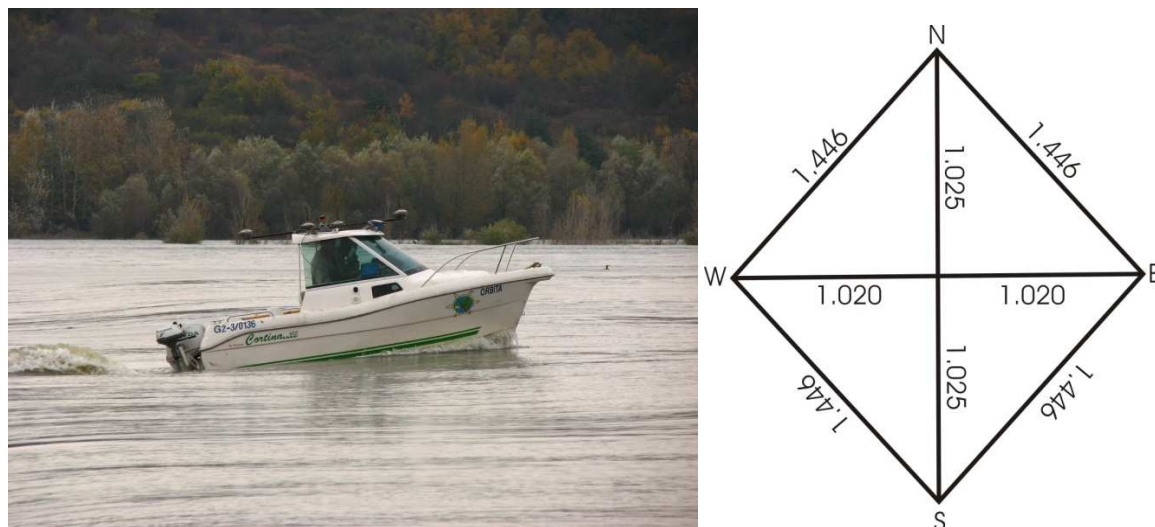
1. W czasie odstawienia pracy turbin elektrowni,
2. W trakcie pracy elektrowni,
3. Podczas dużych przepływów i wysokiego poziomu lustra wody.

Pomiary hydrograficzne wykonano przy użyciu sondażu hydroakustycznego oraz satelitarnego systemu pozycjonowania. Pierwszym etapem prac było przygotowanie podstawowych profili pomiarowych, w odstępach 10 oraz 5 metrowych. Profile poprowadzono równolegle, wykonano je w programie ESRI ArcGIS 9.2, dzięki czemu możliwa była precyzyjna nawigacja i wizualizacja pozycji na tle zaprojektowanych profili. Rysunek 3 przedstawia trajektorię łodzi w trakcie zbierania danych pomiarowych.



Rys. 3. Trajektorja łodzi w trakcie sondażu hydroakustycznego

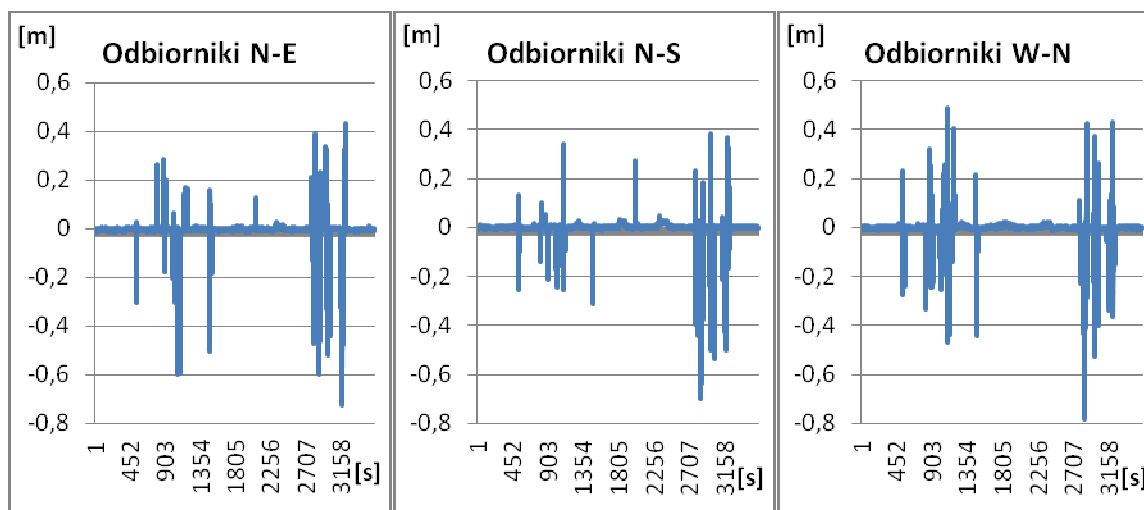
Do przeprowadzonych analiz przedstawionych w artykule wykorzystano dane z trzeciego etapu pomiarowego. W celu realizacji badań zamontowano na łodzi „Orbita” cztery odbiorniki Topcon HiPer Pro. Rysunek 4 przedstawia rozmieszczenie odbiorników względem siebie na jednostce pływającej. W trakcie opracowania danych każdemu z odbiorników została przypisana nazwa. Odpowiednio: N – dziób statku, E – prawa burta, S – rufa, W – lewa burta. Takie rozmieszczenie odbiorników GNSS pozwoliło na rejestrowanie surowych obserwacji satelitarnych. Ułatwiło to późniejsze, jednoznaczne wyznaczenie parametrów ruchu jednostki, wpływających na wyniki pomiarów hydrograficznych.

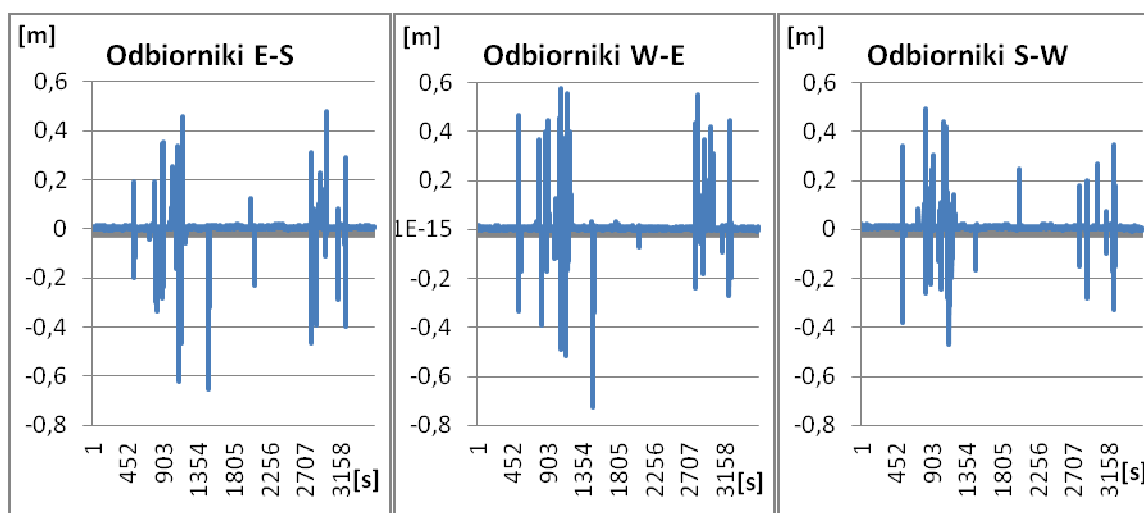


Rys. 4. Rozmieszczenie odbiorników GNSS na jednostce hydrograficznej (rzut z góry)

4. Opracowanie danych pomiarowych GPS

Wszystkie odbiorniki Topcon HiPer Pro rejestrowały surowe obserwacje (GPS + GLONASS) z interwałem 1-sekundowym. Dane kinematyczne opracowano w trybie post-processing przy wykorzystaniu fizycznej stacji referencyjnej wchodzącej w skład systemu ASG-EUPOS znajdującej się we Włocławku. Na podstawie współrzędnych, wyznaczonych dla każdej epoki pomiarowej (1 sekunda), policzono odległości między odbiornikami. Wartości te, zestawiono z odległościami pomierzonymi między odbiornikami po ich zamontowaniu na łodzi. Belki, do których przymocowane były odbiorniki przecinały się pod kątem 90° . Na podstawie tak zebranych informacji wstępnie zweryfikowano dokładności wyznaczeń odbiorników satelitarnych. Rysunek 5 przedstawia odchylenia odległości pomiędzy poszczególnymi odbiornikami, obliczone na podstawie danych z odbiorników a odchyleniami odległości pomierzonymi przed pomiarem.





Rys. 5. Różnice między odległościami pomierzonymi a wyznaczanymi

W (tab.1) przedstawiono minimalne i maksymalne wartości odchyłeń.

Tablica 1. Minimalne i maksymalne odchylenie odległości pomiędzy odbiornikami.

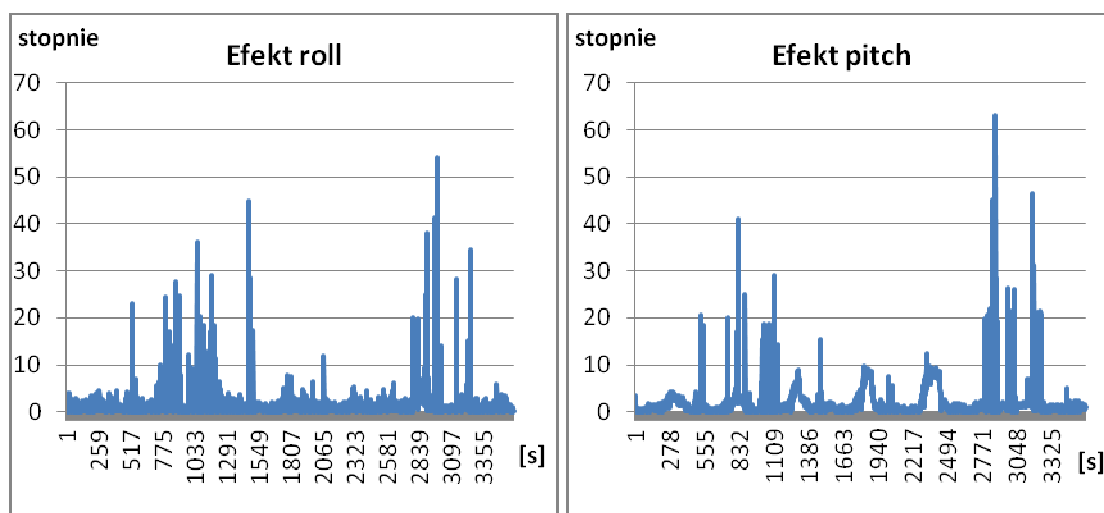
Odbiorniki	N-E [m]	E-S [m]	S-W [m]	W-N [m]	N-S [m]	W-E [m]
min	-0,73	-0,66	-0,47	-0,78	-0,70	-0,72
max	0,43	0,48	0,49	0,49	0,39	0,58

Analizując otrzymane wyniki i uwzględniając dokładności wyznaczania współrzędnych otrzymywanych z obliczeń OTF/On The Fly (do 10 cm) można przyjąć otrzymane wyniki za wiarygodne. W obliczeniach wyeliminowano największe różnice w odległościach, które spowodowane były brakiem rozwiązania typu fixed. Problemy pojawiały się głównie przy nawrotach łodzi na kolejny profil pomiarowy. Zmiany różnic wysokości poszczególnych odbiorników w odniesieniu do wysokości środka łodzi przedstawia (rys.6).



Rys. 6. Różnice wysokości poszczególnych odbiorników od środka łodzi

Kolejnym elementem opracowania danych było wyznaczenie efektów „roll” i „pitch”.

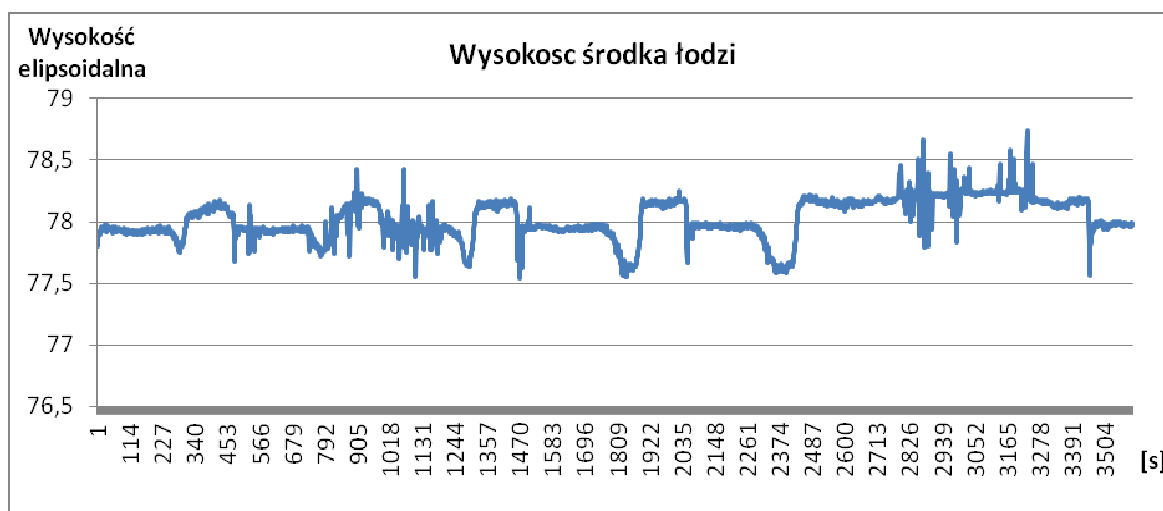


Rys. 7. Przechylenia łodzi w trakcie pomiaru

Podobnie jak w przypadku kontroli wyznaczeń poziomych największe wartości przechyleń łodzi wzdłuż i w poprzek spowodowane były brakiem prawidłowego rozwiązania pozycji. Największe wartości przechyleń jednostka pływająca osiąga w trakcie manewru zawracania lub zmiany kierunku pływania. Odzwierciedla to sytuacja przedstawiona na (rys.6). Analizując wartości można zaobserwować wychylenia jednostki w tym samym czasie. Efekt roll (obrotowy, poprzeczny ruch łodzi względem podłużnej osi) średnio nie przekraczał 5 stopni (po wyeliminowaniu błędów przypadkowych). Efekt pitch (obrotowy, podłużny ruch łodzi względem poprzecznej osi) można zauważyć przy podpływaniu pod prąd rzeki, gdy dziób łodzi nieznacznie się unosił do góry. Maksymalne wartości dochodzące do 10 stopni można zauważyć przy podpływaniu na próg podpiętrzającym wodę.

Kluczową informacją w trakcie sondu hydroakustycznego jest pozycja. Szczególnie istotna jest wysokość jednostki pływającej w aspekcie dynamicznych zmian poziomu lustra wody. Zmiany te należy określić, a następnie wykorzystać do redukcji obserwacji głębokości do wspólnej, referencyjnej płaszczyzny wody.

Wysokość środka łodzi została wyznaczona na podstawie obserwacji z czterech odbiorników, które były rozmieszczone w równych odległościach od środka konstrukcji mocującej. Otrzymane współrzędne z każdego odbiornika zsynchronizowano w czasie, a następnie wykorzystując średnią arytmetyczną wyznaczono pionową składową ruchu jednostki hydrograficznej.



Rys. 8. Wysokość środka łodzi obliczona na podstawie danych z 4 odbiorników

W trakcie sondu hydroakustycznego przepływ wody przez elektrownie był wyjątkowo duży, na poziomie $1680 \text{ m}^3/\text{s}$ do $1766 \text{ m}^3/\text{s}$ (łącznie przepływ elektrowni i jazu). Maksymalny, miejscowy

poziom lustra wody wynosił ok. 45.80 m n.p.m. Pozwoliło to na prowadzenie pomiarów batymetrycznych na całym obszarze objętym projektem, pomimo podwodnych przeszkód. Poziom lustra wody różnił się w zależności od pozycji łodzi względem elektrowni. Dodatkowo poziom zwiększał się w czasie wraz ze wzrostem wartości przepływu wody przez elektrownię.

Ze względu na różnego rodzaju czynniki zewnętrzne, wpływające na jednostkę pływającą, wyznaczenie poziomu lustra wody staje się zadaniem najtrudniejszym. W szczególności w zbiornikach wodnych o dużych zmianach poziomu wody (np. rzekach). Najważniejszym czynnikiem wymaganym do wyznaczenia wysokości poziomu lustra wody jest uwzględnienie efektu heavy, czyli unoszenia i opadania jednostki pływającej na wodzie. Efekt ten można zaobserwować na rysunkach (rys.8) i (rys.9).



Rys. 9. Pomiar hydroakustyczny w pobliżu progu (wpłynięcie na próg z nurtem)

5. Analiza ruchu pionowego łodzi

Do wykonania mapy dna zbiornika wodnego należy odnieść się do wspólnego, referencyjnego poziomu lustra wody. Poziom ten można wyznaczać z użyciem funkcji aproksymujących dane. Na tym etapie należy zaznaczyć, że nie ma jednej metody, która pozwoliłaby wykonać te zadanie dla wszystkich akwenów. Uzależnione to jest przede wszystkim od typu otrzymanych danych. Ich opracowanie pod kątem wyznaczenia pionowej składowej ruchu jednostki batymetrycznej można podzielić na kilka etapów. Pierwszym z nich jest zredukowanie wysokości elipsoidalnych do poziomu lustra wody o wartość 32.57 m, na którą składają się wartość undulacji geoidy (+31.02 m), wysokość punktu przecięcia konstrukcji mocującej, na której rozmieszczone zostały odbiorniki (+1.65 m) oraz różnica pomiędzy zredukowaną wysokością elipsoidalną z obserwacji GPS a lokalnym reperem wysokościowym (-0.10 m).

Kolejnym etapem opracowania danych było usunięcie wartości odstających – proces identyfikacji i usunięcia wartości odstających polegał na wyszukaniu wartości wysokości normalnych większych niż określona oddzielnie dla każdego etapu pomiaru wielokrotność odchylenia standardowego σ , liczonego w stosunku do wartości średniej μ . W wyniku usunięcia danych odstających otrzymano nowy zbiór danych, który charakteryzował się dodatkowo dużym zaszumieniem (wykazuje często przypadkowe zmiany wartości wysokości). W taki sposób przygotowane dane zostały przefiltrowane i wygładzone.

Zjawiska i zależności wykryte w szeregach czasowych można opisać w postaci modelu zależności poziomu zjawiska od czasu, czyli w postaci funkcji [2]:

$$y_t = f(t) + g(t) + e_t$$

gdzie:

$f(t)$ - funkcja czasu, trendu,

$g(t)$ - funkcja czasu, charakteryzująca wahania,

e_t - zmienna losowa.

Równanie oznacza, że zmiany czasu są wyrazem zmiany warunków towarzyszącym zjawisku. Celem analizy szeregów czasowych jest:

- oszacowanie parametrów wybranego modelu kształtowania się zmiennej i ocena dokładności dopasowania modelu do danych empirycznych,
- wykorzystanie oszacowanego modelu do sporządzenia prognozy kształtowania się analizowanego zjawiska w przyszłych okresach.

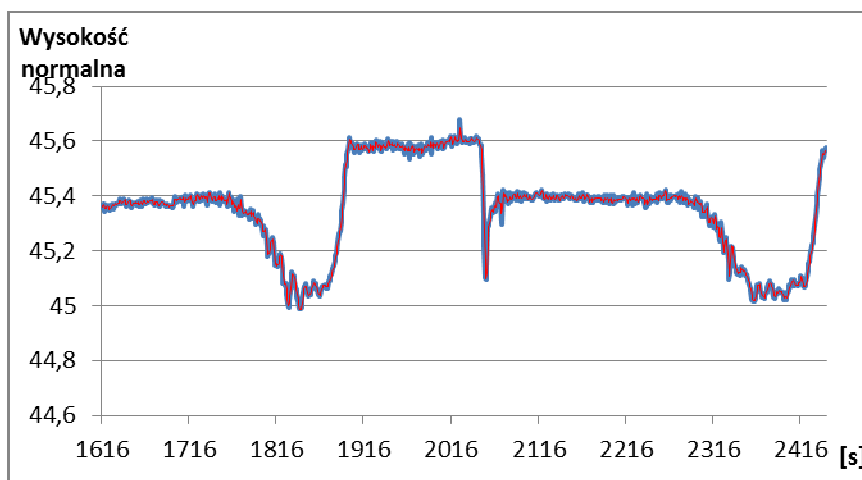
Zadanie wyznaczenia funkcji $f(t)$ jest nazywane wygładzaniem (wyrównywaniem) szeregu czasowego. Najczęściej stosowanymi metodami wygładzania są:

- metody analityczne, przy pomocy których określamy postać analityczną funkcji trendu i jej parametry,
- metody adaptacyjne, w których nie zakłada się stałej postaci analitycznej trendu, lecz przeciwnie, zakłada się, że dla każdego okresu ocenę poziomu trendu buduje się jako pewną przeciętną z tego rodzaju ocen dokonanych w poprzednich okresach.

Najczęściej wykorzystywaną w praktyce postacią funkcji trendu jest jej postać liniowa, w przypadku, gdy przyrosty zmiennej y w jednostce czasu są stałe. Parametry funkcji zostają w niej oszacowane metodą najmniejszych kwadratów.

Najlepszym sposobem w doborze funkcji trendu jest ocena wizualna danych przedstawionych na wykresie, na podstawie której można wyciągnąć pierwsze wnioski (rys.8).

Do wygładzania danych wykorzystano metodę średniej ruchomej. Wykorzystywana jest ona w przypadku danych bez wyraźnej tendencji. Stosowana jest przy stałym poziomie zjawiska i znacznych waniach przypadkowych. Pozwala ona na eliminację z sygnału szumu. Cechą charakterystyczną metody średniej ruchomej jest fakt, że przy wykorzystaniu jej dla danych posiadających trend odpowiada ona metodzie najmniejszych kwadratów dla ostatnich N obserwacji.

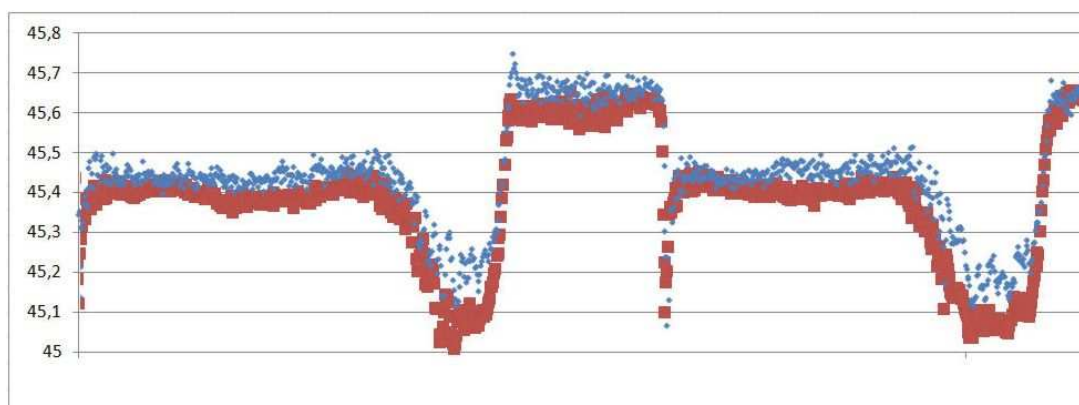


Rys. 10. Graficzna ilustracja danych wygładzonych średnią ruchomą

Wysokość lustra wody w badanym okresie mieściła się w granicach od 44.98 m do 46.17 m.

Aby zweryfikować poprawność wyznaczeń pionowej składowej pozycji łodzi techniką OTF (On The Fly) z wykorzystaniem geodezyjnych odbiorników satelitarnych i własnej stacji referencyjnej, wykorzystano tachimetr automatyczny z lustrem dookólnym, umieszczonym w punkcie przecięcia się osi wyznaczonych przez cztery odbiorniki Topcon HiPer Pro. Tachimetr śledził automatycznie ruch lustra na łodzi i zapisywał pozycję i wysokość z interwałem od 1 do 3 sekund.

Wyniki pomiarów przeprowadzonych przy użyciu odbiorników satelitarnych i tachimetru zostały porównane i nałożone na jeden wykres (rys.11).



Rys. 11. Wysokość łodzi: punkty czerwone – Total Station, punkty niebieskie – OTF

Różnice wartości wyznaczenia wysokości normalnej dwoma niezależnymi technikami pomiarowymi są bardzo zbliżone do siebie i nie przekraczają 10 cm (średnia wartość różnicy wynosi 6 cm).

6. Wnioski

Analizując wyniki wyznaczeń pionowego ruchu jednostki pływającej w czasie śródlądowych pomiarów batymetrycznych na akwenu o zmiennej powierzchni lustra wody w czasie i przestrzeni można stwierdzić, iż satelitarne techniki pozycjonowania OTF w trybie post-processing dają możliwość wiarygodnego i dokładnego monitorowania ruchu tej jednostki. Należy zaznaczyć, iż w trakcie eksperymentalnych pomiarów była bardzo dobra sytuacja satelitarna a na obszarze objętym pomiarem nie występowały zasłony terenowe. Pozycjonowanie realizowano z wykorzystaniem czterech odbiorników satelitarnych umieszczonych na dachu łodzi pływającej, a stacja referencyjna rejestrująca surowe dane satelitarne umieszczona była w bezpośrednim sąsiedztwie obszaru testowego.

Kontrola wyznaczenia wysokości łodzi technikami satelitarnymi wykonana przy użyciu metody klasycznej sugeruje, iż można wykorzystywać kinematyczne metody GPS do wyznaczania pozycji, ale także wysokości jednostki hydrograficznej. Należy jednak mieć świadomość, iż warunki satelitarne (ilość satelitów, PDOP), oraz odległość od stacji referencyjnej mają kluczowy wpływ na dokładność otrzymanych wyznaczeń.

Na podstawie wstępnych wyników pomiarów przeprowadzonych na fragmencie rzeki Wisły za Elektrownią Wodną Włocławek można oszacować, iż wysokość normalna poziomu lustra wody na obszarze około 300x300 m waha się w zakresie 60 cm. Aby otrzymać ostateczną, dokładną i wiarygodną wysokość punktu pomiarowego dna rzeki w układzie Kronsztad 86, należy uwzględnić model powierzchni lustra wody, a następnie wykorzystując go zredukować surowe pomiary głębokości przeprowadzone metodami hydroakustycznymi.

Literatura

- [1] POPIELARCZYK D., Zastosowanie zintegrowanych technik pomiarowych GPS oraz echosondy cyfrowej do tworzenia map batymetrycznych cieków i śródlądowych zbiorników wodnych, Rozprawa doktorska, 2002, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
- [2] SIEGMUND BRANDT Analiza danych: metody statystyczne i obliczeniowe, tł. Lech Szymanowski. Warszawa: 1998, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998

DETERMINATION OF VERTICAL HYDROGRAPHIC BOAT MOVEMENT WITH THE USE OF GNSS TECHNIQUES

Summary

The paper presents analysis of determination of vertical movement of the surveying boat with the use of GNSS techniques. The hydrographic surveys on Vistula river were conducted where the water level was changing significantly over time depending on the operational schedule of the power plant. Verified hydrographic data had to be brought to the common water level. To determine the final water level, data on the height of the RTK/GPS antenna positioned on the boat during sounding and the classical total station level measurements were considered. The RTK/GPS technique with 0.02-0.05 m vertical accuracy proved to be very useful and essential in engineering inland bathymetric measurements.