

BOGUSZ Janusz¹
NYKIEL Grzegorz
SZOŁUCHA Marcin
SZYMAŃSKI Piotr
WRONA Maciej

ZINTEGROWANY SYSTEM KONTROLNO-MONITORUJĄCY DLA OBIEKTÓW INŻYNIERSKICH – KONCEPCJA I WYNIKI TESTÓW

Postęp w dziedzinie precyzji wyznaczania pozycji powoduje, iż dzięki zaawansowanym technologicznie instrumentom pomiarowym jesteśmy w stanie w dniu dzisiejszym wyznaczać przemieszczenia lub deformacje konstrukcji inżynierskich z dokładnością centymetrową. Jednak w pełni wiarygodną informację można uzyskać jedynie tworząc systemy zintegrowane, składające się z niezależnych czujników przemieszczenia. Prace nad takim systemem prowadzone są w Centrum Geomatyki Stosowanej Wojskowej Akademii Technicznej od 2007 roku. Prototyp systemu był testowany na mostach: Siekierkowskim i w Zakroczymiu, a wyniki potwierdziły zgodność mierzonych odkształceń. Niniejszy referat przedstawia zarys działania zintegrowanego systemu monitorowania przemieszczeń dynamicznych obiektów inżynierskich opartego na technice pomiarów satelitarnych GPS/GLONASS z dodatkowymi czujnikami. Przedstawione również zostały wyniki testów przeprowadzonych we współpracy z Wydziałem Mechanicznym WAT na tymczasowej przeprawie mostowej typu BLG-67.

INTEGRATED SYSTEM FOR MONITORING OF THE ENGINEERING FACILITIES – CONCEPT AND PRELIMINARY RESULTS

Progress in the high-tech measuring instruments enable today to determine displacement or deformation of engineering structures with centimeter accuracy. But fully credible information can be obtained only by creating integrated systems, consisting of independent displacement sensors. Researches on such a system are conducted at the Center of Applied Geomatics Military University of Technology since 2007. The prototype system was tested on the road bridges: Siekierkowski and Zakroczym, and the results confirmed the compatibility of the measured deformations. This paper provides an overview of the integrated system to monitor dynamic movements of engineering objects based on the technique of satellite measurements in GPS/GLONASS with additional sensors. The results of the tests carried out in cooperation with the Faculty of Mechanical Engineering MUT on the temporary bridge crossing (BLG-67 type) are also presented.

¹Wojskowa Akademia Techniczna, Centrum Geomatyki Stosowanej, 00-908 Warszawa, ul. Kaliskiego 2
Tel. (22) 683 71 25, e-mail: mwrona@wat.edu.pl

1. WSTĘP

Współczesne systemy pomiarowe i diagnostyczne w sposób radykalny podnoszą wiarygodność ekspertyz dotyczących stanu technicznego obiektów budowlanych. W niedalekiej przeszłości ciężar pozyskania precyzyjnej informacji o geometrii konstrukcji spoczywał na geodetach korzystających głównie z optycznych instrumentów pomiarowych i zaawansowanych metod opracowania obserwacji [1]. Wobec skali dzisiejszych projektów budowlanych tradycyjne metody geodezyjne zdawały się być niejednokrotnie niewystarczające do pełnej diagnozy stanu konstrukcji. Postęp w dziedzinie narzędzi i technologii pomiarowych doprowadził w rezultacie do powstania nowych, specjalistycznych rozwiązań z zakresu pozyskiwania informacji o dynamicznym i geometrycznym stanie konstrukcji.

W świetle najnowszych publikacji z dziedziny geodezji inżynierskiej oraz osiągnięć z zakresu geodezyjnego pozyskiwania i przetwarzania danych, coraz wyraźniej widoczny jest fakt wzrostu liczby instalacji wykorzystujących technikę GNSS (Global Navigation Satellite System) jako narzędzia do detekcji przemieszczeń elementów konstrukcji określanego jako monitoring strukturalny GNSS [2].

2. GNSS

W dzisiejszych czasach system nawigacji satelitarnej kojarzony jest z potocznie używanym skrótem GPS. Globalny system pozycjonowania NAVSTAR GPS był pierwszym systemem którego głównymi beneficjentami byli użytkownicy cywilni. Był również pierwszym w pełni operacyjnym systemem pozwalającym na określenie położenia odbiornika w dowolnym miejscu na Ziemi i jej bliskim otoczeniu. Mimo ograniczeń w dostępności (Selective Availability) system w szybkim tempie zaczął być wykorzystywany przez użytkowników cywilnych w najróżniejszych dziedzinach. Tendencja ta sprawiła, iż Departament Obrony USA początkowo udostępnił 1993 roku informacje o charakterystyce systemu, a w 2000 roku zawiesił wszelkie celowe ograniczenia dla użytkowników cywilnych.

Dziś posiadacze prostych, nawigacyjnych odbiorników GPS nie zawsze zdają sobie sprawę że oprócz systemu NAVSTAR istnieje drugi, bliźniaczo podobny GLONASS sięgający początkami czasów ZSRR (1982 r.). Ponadto od pewnego czasu ESA (Europejska Agencja Kosmiczna) buduje własny system nawigacyjny Galileo a Chińska Republika Ludowa QZSS (Quasi-Zenith Satellite System). Z chwilą, gdy powszechna stała się możliwość określania pozycji na podstawie danych satelitarnych z różnych systemów nawigacyjnych, można posługiwać się nowym terminem GNSS – Global Navigation Satellite System.

Podstawą wyznaczenia położenia odbiornika jest pomiar pseudodległości pomiędzy widocznymi satelitami a odbiornikiem, realizowany przez porównanie momentów czasu propagacji sygnału, którego wzorcowy generator umieszczony jest wewnątrz satelity.

Znacznie dokładniejszym sposobem uzyskiwania współrzędnych punktów pomierzonych metodą satelitarną jest wykorzystanie odbiorników działających nie tylko w oparciu o techniki kodo-korelacyjne, ale również te, umożliwiające pomiar fazy fali nośnej. Podstawą technik fazowych pomiarów pseudodległości jest określenie wielkości różnicy faz dwóch częstotliwości: stałej, generowanej przez odbiornik oraz przesuniętej o efekt

Dopplera, zmiennej w czasie fali transmitowanej przez satelitę. Dziś wszelkie prace pomiarowe wymagające najwyższej dokładności prowadzone są w oparciu o pomiary fazowe metodą różnicową („post-processing” – obliczenie pozycji odbiornika ruchomego po fakcie oraz RTK – Real Time Kinematic, NRTK – Network Real Time Kinematic – w czasie prawie-rzeczywistym).

Metoda obliczania pozycji po fakcie (post-processing) jest obecnie najdokładniejsza spośród wszystkich metod pomiaru techniką GNSS. Polega ona na kameralnym opracowaniu obserwacji satelitarnych z minimum dwóch odbiorników z wykorzystaniem dodatkowych informacji, niedostępnych dla użytkownika podczas pomiarów w terenie (np. precyzyjne dane o efemerydach satelitów systemu czy korekty ze względu na opóźnienie jonosferyczne czy troposferyczne).

Metoda czasu rzeczywistego RTK oparta jest o technikę różnicowych pomiarów fazowych prowadzonych przez minimum dwa odbiorniki: bazowy (Base) i ruchomy (Rover). Odbiornik bazowy, tworzący wraz z elementami dodatkowymi stację referencyjną, transmituje do odbiornika ruchomego informacje o swojej pozycji oraz obserwacje. Odbiornik ruchomy następnie uwzględnia korekty i wyznacza własne położenie z dokładnością 2-3 cm z zadaną częstotliwością (najczęściej 1 Hz). Cały proces przy wyznaczonej liczbie cykli fazowych dla odbiornika ruchomego odbywa się niemal w czasie rzeczywistym. W zależności od częstotliwości wyznaczenia położenia, której wzrost przekłada się bezpośrednio na wielkość transmitowanej informacji oraz integracji danych zewnętrznych opóźnienia sięgają maksymalnie 2 sekund. Informacja o położeniu jest dostarczana do użytkownika za pomocą wybranej techniki: światłowodowy, łącza radiowe, technika GPRS i 3G.

Powszechnym rozwiązaniem jest technologia wykorzystująca dwukierunkową transmisję danych pomiędzy odbiornikiem ruchomym a centrum obliczeniowym sieci stacji referencyjnych – VRS (Wirtualna Stacja Referencyjna) [3]. Koncepcja ta polega na wygenerowaniu na podstawie danych z sieci, wirtualnej stacji w pobliżu odbiornika ruchomego. Wykorzystuje ona sieć permanentnych stacji referencyjnych połączonych z centrum. System zbiera informacje z sieci nadchodzące do centrum w czasie rzeczywistym i na ich podstawie generuje poprawki powierzchniowe dla danego obszaru (Regional Area Corrections). Dane te są następnie wykorzystywane do stworzenia wirtualnej stacji referencyjnej VRS usytuowanej w niewielkiej odległości od odbiornika ruchomego. Z reguły odległość ta nie przekracza 10 km.

Technologia ta została wykorzystana w polskiej sieci stacji referencyjnych ASG-EUPOS (Aktywna Sieć Geodezyjna – European Positioning Determination System). System umożliwia pomiar trójwymiarowych współrzędnych techniką GNSS w czasie rzeczywistym i po fakcie z błędem nie przekraczającym 1-2 cm dla składowej poziomej i 3-4 cm dla składowej pionowej.

3. MONITOROWANIE KONSTRUKCJI

Zastosowanie technik satelitarnych wyznaczania pozycji do badań konstrukcji inżynierskich początkowo były oparte o pomiar statyczny (metodę zapewniającą wówczas odpowiednią dokładność) mające na celu detekcję długoterminowych odkształceń konstrukcji powodowanych przez napór wody lub lodu, zmiany temperatury czy powolne zmiany tektoniczne [4], [5], [6]. Z biegiem lat szybkość procesorów wykorzystywanych w

odbiornikach pozwoliła na wzrost częstotliwości wyznaczania współrzędnych pozycji do 100 Hz. Umożliwiło to podjęcie prób detekcji deformacji konstrukcji wywołanych przez szybko-zmienne w czasie czynniki zewnętrzne jak wiatr, trzęsienia Ziemi czy działalność człowieka [7].

Niestety mimo szeregu zalet związanych z możliwościami jakie daje GNSS w wielu przypadkach system ten jest niemożliwy do zastosowania lub nie dający spodziewanych efektów [8]. Do podstawowych wad techniki GNSS należą:

- wymóg odsłoniętego horyzontu;
- pomiar techniką różnicową (potrzebne minimum 2 odbiorniki);
- dokładność pozycji w trybie post-processing: 1 cm dla składowych poziomych, 2 cm dla składowej wysokościowej;
- dokładność pozycji w trybie Real Time Kinematic: 1-2 cm dla składowych poziomych, 2-4 cm dla składowej wysokościowej;
- niska, w porównaniu z innego typu czujnikami, częstotliwość akwizycji (maks. 100 Hz).

Oprócz pierwszej z wymienionych wad pozostałe można zredukować wykorzystując architekturę systemu zintegrowanego. Koncepcja ta polega na pomiarze wybranych elementów konstrukcji w tym samym czasie z wykorzystaniem różnego typu czujników wielkości fizycznych. Informacja pomiarowa z wielu instrumentów jest w sposób numeryczny integrowana dla wyznaczenia badanej wielkości fizycznej, jak np. wektora przemieszczenia. Pozwala to między innymi na wzajemną kontrolę jakości informacji pozyskiwanych przez różnego typu czujniki oraz wyliczenie badanej wielkości z większą dokładnością i wiarygodnością [9], [10].

Na świecie od dłuższego czasu prowadzone są prace nad zintegrowanymi systemami pomiaru konstrukcji inżynierskich z wykorzystaniem GPS [11], [12]. Najczęściej spotykanym rozwiązaniem jest integracja czujnika przyspieszenia z danymi o pozycji z GPS [13], a doświadczenia wykazały widoczną poprawę wyników pomiaru po zastosowaniu numerycznej integracji GPS/INS [14]. Widoczna jest również wysoka zbieżność rezultatów transformacji Fouriera uzyskanych na podstawie danych GPS i czujników przyspieszenia [15]. Do przeprowadzenia procesu numerycznej integracji danych najczęściej wykorzystywany jest algorytm numerycznej filtracji Kalmana [14]. Badania nad tą tematyką zaowocowały szeregiem wdrożeń systemów pomiaru konstrukcji opartych o system GNSS. Są to przeważnie dużej skali obiekty geotechniczne i mostowe oraz konstrukcje wysokie i smukłe [16], [17].

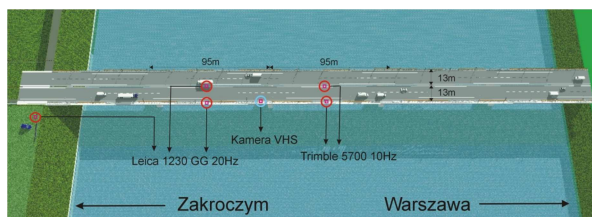
Centrum Geomatyki Stosowanej WAT rozpoczęło prace nad wykorzystaniem wysokoczęstotliwościowych pomiarów GNSS w połowie 2007 roku. Od początku myślą przewodnią realizowanych prac było efektywne wykorzystanie możliwości jakie daje technika pomiarów satelitarnych w aplikacjach ciągłego monitorowania geometrii konstrukcji. Wykonywane testy opierały się wówczas przede wszystkim na wynikach post-processingu przeprowadzanego na klastrze komputerowym Fenix z wykorzystaniem zmodyfikowanej aplikacji TRACK (Trajectory Calculation with Kalman Filter) z MIT (Massachusetts Institute of Technology) [18]. Od tego czasu wykonano szereg testów pomiarowych i zrealizowano kilka projektów będących pionierskimi w tej dziedzinie w Polsce [19]. W chwili obecnej zakres działalności CGS został poszerzony o zagadnienia związane z akwizycją, integracją i dystrybucją danych pomiarowych z różnego typu

czujników w czasie rzeczywistym oraz budowę autorskiego systemu badania przemieszczeń.

4. TESTY NA PRZEPRAWACH STAŁYCH

Pierwsze próby pomiarowe z wykorzystaniem odbiorników GNSS 10 Hz przeprowadzono 10 lipca 2007 roku na terenie WAT. Doświadczenie to miało na celu dostarczenie informacji o możliwościach detekcji przemieszczeń pionowych i poziomych z wykorzystaniem wysokoczęstotliwościowych danych GPS. Założono, że zmiana położenia anteny ma odbywać się z różną częstotliwością i wielkością amplitudy. Dla realizacji tych założeń skonstruowano ruchomą platformę z zestawem pozwalającą na generowanie przemieszczeń w trzech kierunkach. W testach oprócz GPS wykorzystano również trójosiowy przyspieszeniometer. Dzięki nim możliwe wykonanie pomiarów testowych na trzech obiektach mostowych: dwóch na Wiśle (Moście im. Obrońców Modlina 1939 r. koło Zakroczymia oraz Moście Siekierkowskim w Warszawie) oraz jednym moście tymczasowym na stanowisku badawczym Wydziału Mechaniki WAT.

W nocy 24 sierpnia 2008 r. rozpoczęto pomiary na moście w Zakroczymiu. Czas sesji pomiarowej (3:00-8:00) dobrano z myślą o charakterze ruchu na przeprawie. Przyjęto, że w godzinach nocnych głównym obciążeniem konstrukcji będą pojedyncze samochody dostawcze typu TIR, a w godzinach porannych – osobowe.



Rys. 1. Rozmieszczenie odbiorników na przęsłach mostu w Zakroczymiu

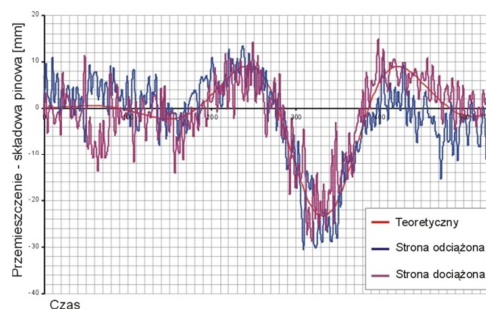
Odbiorniki Leica 1230 umieszczono na jednym z 95-cio metrowych przęseł po obu stronach jezdni, odbiorniki Trimble 5700 na kolejnym przęsle (rys. 1). W ten sposób możliwe było określenie wielkości odkształceń na profilu poprzecznym jezdni i tym samym detekcję ruchów skrętnych konstrukcji. Pomiędzy odbiornikami ustawiono kamerę zwróconą w kierunku Zakroczymia. Materiał wideo posłużył podczas opracowania kameralnego na określenie źródła obciążeń dynamicznych konstrukcji. Na podstawie informacji o parametrach technicznych mostu przeprowadzono analizę zachowania kolejnych przęseł wobec wymuszenia o sile 300 kN rozłożonej na odcinku 10 m Metodą elementów skończonych (Finite Element Method) opracowano teoretyczny model zachowania dynamicznego przęsła, którego przemieszczenia teoretyczne porównano z otrzymanymi z pomiaru. Rezultat przykładowej analizy przedstawia rysunek 2 gdzie płynną, czerwoną linią przedstawiono model teoretyczny, niebieską i fioletową zaś wyniki z odbiornika Leica (20 Hz) podczas przejazdu pojedynczego pojazdu o dużym tonażu. Oba przebiegi pokrywają się co świadczy o wiarygodności wyników otrzymanych z pomiaru GPS. System monitoringu strukturalnego działa na podobnej zasadzie, analizując i

porównując dane teoretyczne, historyczne i aktualne [20]. Rozbieżności pomiędzy tymi wartościami mogą świadczyć o zmianach w wewnętrznej strukturze elementu i tym samym osłabieniu całej konstrukcji.

Interesujące rezultaty dało porównanie odcinka czasowego, podczas którego pojedynczy samochód ciężarowy wjechał na most (rys. 2). Dodatkowo wykazano ruchy skrętne jezdni powstałe na skutek obciążenia jej prawej strony (widoczne w pierwszej części wykresu). W momencie najazdu prawa strona jezdni obniża się, podczas gdy druga przemieszcza się w przeciwnym kierunku.

Następnie zespół Centrum Geomatyki Stosowanej wraz z przedstawicielami Leica Geosystems, Zarządu Dróg i Mostów oraz Warszawskiego Przedsiębiorstwa Geodezyjnego zaaranżował kolejny pomiar na Moście Siekierkowskim w Warszawie.

Główne przęsło Mostu Siekierkowskiego o długości 250 metrów podwieszane jest za pomocą 28 stalowych lin na dwóch pylonach o wysokości 90 m (rys. 3). Podczas pomiarów wykorzystano 9 odbiorników GPS: 4 rozmieszczone na szczycie każdego z pylonów (Leica serii 1230), 3 umieszczone w poprzek głównego przęsła (Leica 1230 i Trimble 5700), 2 posłużyły jako referencyjne dla pomiarów różnicowych (Leica 1230). Dla identyfikacji źródeł obciążeń dynamicznych konstrukcji wykorzystano 2 kamery VHS.



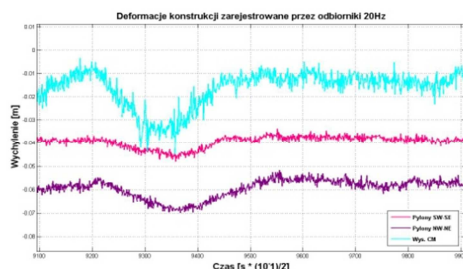
Rys. 2. Zmiana geometrii konstrukcji podczas dynamicznego obciążenia zewnętrznej strony jezdni pozyskana techniką GPS



Rys. 3. Rozmieszczenie odbiorników na wybranych elementach konstrukcji

Dane z odbiorników umieszczonych na pylonach wykorzystano do zbadania ich wzajemnego zachowania (NW-NE i SW-SE) podczas dynamicznego obciążenia głównego przęsła. Przykładowy przebieg podczas przejazdu pojazdów ciężarowych przedstawia rysunek 3. Analiza odległości pomiędzy pylonami ujawniła ich ruchy poziome dochodzące do 2 cm. Wykresy na rysunku 4 ilustrują moment przejazdu po północnej stronie mostu dwóch pojazdów ciężarowych jadących w odstępach ok. 80 m z szacowaną prędkością 60 km/h. Na pierwszym wykresie przedstawiono przebieg składowej pionowej pozycji odbiornika (20 Hz) na środku głównego przęsła CM (ciemny niebieski) oraz zmiany odległości pomiędzy pylonami SW-SE (różowy) i NW-NE (jasny niebieski).

Aby określić częstotliwość drgań własnych zebrane dane wstępnie przetworzono, a następnie poddano szybkiej transformacji Fouriera. Wszystkie odbiorniki ujawniły częstotliwość oscylacji równą 0,931 Hz. Wartość ta jest zbliżona do 0,95 Hz uzyskanej podczas badań odbiorczych obiektu.



Rys. 4. Reakcja konstrukcji zarejestrowana przez odbiorniki GPS podczas przejazdu dwóch ciężarowych aut po północnej stronie głównego przęsła

5. ZINTEGROWANY SYSTEM MONITOROWANIA PRZEMIESZCZEŃ

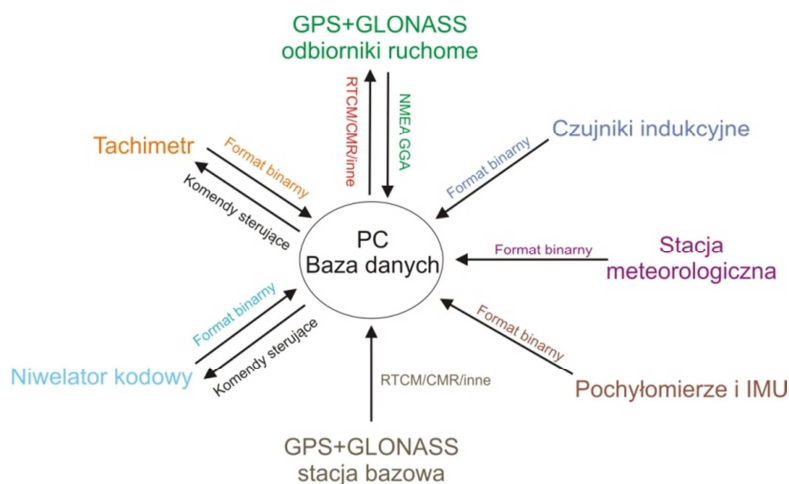
Zintegrowany system monitorowania przemieszczeń dynamicznych został zaprojektowany z myślą o wykorzystaniu wielu różnego rodzaju czujników pomiarowych w tym wysokoczęstotliwościowych odbiorników GPS/GLONASS, indukcyjnych czujników przemieszczeń, tachimetrów, niwelatorów kodowych oraz stacji meteorologicznych. Dodatkowo w skład systemu wchodzi część teleinformatyczna oraz stacja robocza. Opcjonalnie system może zostać doposażony w pochyłomierze oraz trójosiowy przyspieszeniometer.

Odbiorniki GPS/GLONASS stanowią podstawę opracowanego systemu. Dzięki wykorzystaniu wysokoczęstotliwościowych pomiarów, sięgających nawet 100 Hz, możliwe jest nie tylko zaobserwowanie statycznych zmian w geometrii konstrukcji, ale również zbadanie jej parametrów dynamicznych. Komunikacja z odbiornikami satelitarnymi odbywa się z wykorzystaniem dwóch protokołów. Pierwszy z nich służy do zdalnej konfiguracji odbiornika poprzez zapytania http, drugi natomiast wykorzystywany jest do przesyłania wyników pomiarów z odbiornika do stacji roboczej. Do tego celu służy protokół komunikacyjny NMEA 0183 - GGA (National Marine Electronics Association - Global Positioning System Fix Data), która zawiera informację o aktualnie wyznaczonej pozycji wraz z czasem GPS. W celu uzyskania wysokiej dokładności pomiarów rzędu kilku

centymetrów do odbiorników wysyłana jest informacja o obserwacjach z odbiornika bazowego umieszczonego poza strefą oddziaływania konstrukcji oraz warunkach zewnętrznych. Informacja ta może zostać przesyłana bez względu na typ formatu (RTCM - Global Positioning System Fix Data, CMR - Compact Measurement Record), jednak musi on być obsługiwany przez odbiornik ruchomy znajdujący się na konstrukcji. Dane z odbiorników satelitarnych są weryfikowane poprzez indukcyjne czujniki przemieszczeń, które charakteryzują się wyższą dokładnością pomiarów, ale mniejszą częstotliwością pracy.

Działanie złożonego systemu pomiarowego jest uzależnione nie tylko od użytego sprzętu pomiarowego, ale również od narzędzi teleinformatycznych służących do transmisji danych. Odpowiedni ich dobór pozwala na zapewnienie niezawodności projektowanego systemu oraz bezpieczeństwo transmisji danych. Ważnym elementem całej infrastruktury teleinformatycznej zaprojektowanej dla przeprawy mostowej jest zapewnienie transmisji dużej ilości danych zarówno z odbiorników satelitarnych, jak i dodatkowych czujników. Komunikacja pomiędzy wszystkimi urządzeniami znajdującymi się w systemie odbywa się z wykorzystaniem kabli sieciowych lub światłowodowych o wysokiej jakości zapewniającej eliminację zakłóceń zewnętrznych. Wszystkie instrumenty pomiarowe znajdują się w jednej lokalnej sieci i posiadają swój własny, stały adres IP. Sieć ta może być dowolnie rozszerzana poprzez dodatkowe routery sieciowe. Tak zbudowane środowisko pomiarowe zarządzane jest przez stację roboczą, która odpowiedzialna jest za integrację pomiarów pochodzących z różnych czujników, ich akwizycję, przetwarzanie oraz prezentację wyników w formie graficznej.

Dane pomiarowe w pierwszej fazie zostają sprawdzone pod kątem prawidłowej budowy oraz ewentualnych przekłamań wartości powstałych na etapie transmisji. Po przejściu kontroli następuje ich filtracja z wykorzystaniem filtra Kalmana [21]. Tak przygotowane dane zostają poddane integracji. Odbywać się ona będzie z wykorzystaniem czasu stacji roboczej. Każdy instrument pomiarowy jest obsługiwany przez osobny proces systemowy, który pobiera wyniki pomiarów oraz dopisuje do nich czas odebrania przez komputer.

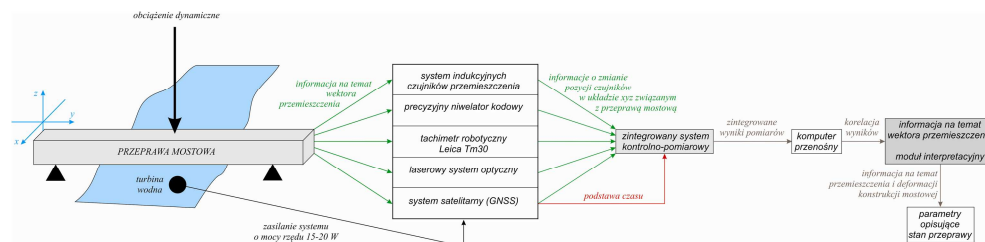


Rys. 5. Schemat architektury systemu zintegrowanego

Dzięki temu można zintegrować ze sobą pomiary pochodzące od różnych czujników. Dodatkowo w przypadku odbiorników satelitarnych przesyłana jest precyzyjna informacja o czasie dzięki czemu możliwe jest odniesienie wszystkich pomiarów do jednolitej, precyzyjnej skali czasu. Końcowym etapem jest zapis wszystkich informacji do specjalnie zaprojektowanej bazy danych znajdującej się albo na stacji lokalnej albo na serwerze zewnętrznym. Oprócz funkcji związanych z przetwarzaniem danych, opracowany system umożliwi również prezentację wyników pomiarów w postaci wykresów oraz tabel. Schemat połączeń systemu przedstawia rysunek 5.

6. WSTĘPNE WYNIKI TESTÓW NA PRZEPRAWIE TYMCZASOWEJ

W ramach współpracy Centrum Geomatyki Stosowanej z Wydziałem Mechanicznym WAT w lutym 2011 roku przeprowadzono pomiary podczas prób obciążeniowych mostu wojskowego BLG-67. Stanowisku testowemu cyklicznie obciążano konstrukcję masą 30 t za pomocą podnośników hydraulicznych. Wykonano ponad 2500 cykli pomiarowych. W pozyskiwaniu danych o przemieszczeniu konstrukcji wykorzystano odbiorniki GNSS, indukcyjne czujniki przemieszczenia, tachimetr robotyczny, niwelator kodowy oraz inercyjną jednostkę pomiarową (IMU) (Rys. 6 i 7).

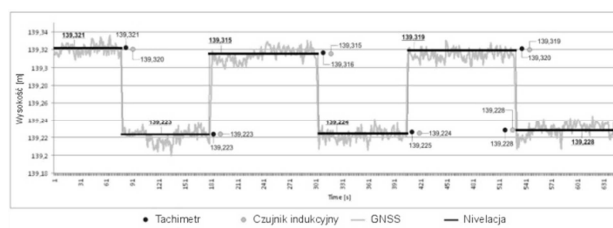


Rys. 6. Schemat systemu pomiarowego na moście



Rys. 7. Instrumenty pomiarowe zainstalowane na przeprawie tymczasowej BLG-67

Wykorzystanie kilku rodzajów czujników pozwoliło na określenie dokładności pomiaru przemieszczenia metodą GNSS RTK. Z uwagi na nominalnie najwyższą precyzję punktem odniesienia dla celów porównawczych był pomiar wykonany niwelatorem kodowym Leica Sprinter 250. Wyniki z tachimetru robotycznego Leica TM30 oraz indukcyjnych czujników przemieszczenia były zgodne z pomiarem odniesienia w zakresie ± 1 mm. Dokładność pomiaru GNSS RTK nie przekroczyła podczas pomiaru poziomu 2 cm (rys. 8).



Rys. 8. Przykładowe wyniki testu pomiarowego na przeprawie tymczasowej

Test potwierdził wysoką użyteczność metody GNSS RTK w tego typu projektach pomiarowych i był wstępem do realizowanego od niedawna projektu związanego ze stworzeniem zintegrowanego systemu pomiaru wektora przemieszczenia konstrukcji przepraw tymczasowych i stałych.

7. PLANY NA PRZYSZŁOŚĆ

W najbliższej przyszłości planowane są następujące projekty pomiarowe:

1. Zintegrowany system pomiarowy: GNSS+inklinometr+stacja meteo na 300 m kominie w Ciepłowni Kawęczyn (Warszawa).
2. System oceny wpływu warunków atmosferycznych na stan geometryczny konstrukcji budynku Warsaw Trade Tower w Warszawie o wysokości 185 m.
3. Integracja systemów SHM (Structural Monitoring System) oraz BMS (Building Management System).

8. PODZIĘKOWANIA

Autorzy pragną podziękować p. dr. Adamowi Bartnickiemu za umożliwienie wykonania testów na tymczasowej przeprawie mostowej. Niniejsza publikacja jest częścią projektu badawczego MNiSW, grant nr 1649/B/T00/2010/40.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Prószyński W., Kwaśniak M.: *Podstawy geodezyjnego wyznaczania przemieszczeń. Pojęcia i elementy metodyki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, stron: 212, ISBN: 83-7207-629-4, Warszawa 2006.
- [2] Helz R. L.: *Monitoring Ground Deformations from Space*. US Geological Survey Fact Sheet, 2005-773-227/11054.
- [3] Landau H., Vollath U., Chen X.: *Virtual Reference Stations Versus Broadcast Solutions in Network RTK – Advantages and Limitations*. 2003.

- [4] Bond J., Chrzanowski A., Kim D.: *Bringing GPS into harsh environments for fully automated deformation monitoring*. Springer-Verlag, 2007.
- [5] Chrzanowski A., Wilkins F.: *Accuracy evaluation of geodetic monitoring of deformations in large open pit mines*. Proceedings of the 12th FIG symposium on deformations measurements Baden, Austria, 22-23 May 2006.
- [6] Rutledge D.R., Meyerholtz S.Z., Brown N. E., Baldwin C. S.: *Innovation: Dam Stability. Assessing the performance of a GPS Monitoring System*. GPS World, 2006.
- [7] Breuer P. Chmielewski T., Górsi P., Konopka E.: *The Stuttgart TV Tower – displacement of the top caused by the effects of Sun and wind*. Engineering Structures, 2008, pp. 2771-2781.
- [8] Nickitopoulou A., Protopsalti K., Stiros S.: *Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises*. Engineering Structures Vol. 28, 2006, pp. 1471-1482.
- [9] Tamura Y.: *Wind Induced Damage to Buildings and Disaster Risk Reduction*. Proceedings of the APCWE-VII, Taipei, Taiwan, 2009.
- [10] Ni Y.Q., Xia W.Y. Liao and J.M. Ko: *Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower*. Structural Control and Earth Monitoring, 2009.
- [11] Roberts G., Brown C., Meng X.: *Using GPS to Monitor the Forth Road Bridge, Shaping the change*. Proceedings of the XXIII FIG Congress, Munich, 2006.
- [12] Hide C., Blake S., Meng X., Roberts G., Moore T., Pack D.: *An investigation in the use of GPS and INS sensors for structural health monitoring*. Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, University of Nottingham, 2005.
- [13] Cazzaniga N.E., Pinto L., Bettinali F., Frigerio A.: *Structural monitoring with GPS and accelerometers the chimney of the power plant in Piacenza*. Proceedings of the 12th FIG symposium on deformations measurements Baden, Austria, 22-23 May 2006.
- [14] Meng X., Roberts G., Dodson A.: *Detecting bridge deformations with GPS and triaxial accelerometers*, Engineering Structures, Vol. 29, 2007, pp. 3178-3184.
- [15] Cosser E.: *Bridge deflection monitoring and frequency identification with single frequency GPS receiver*. Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy, University of Nottingham, 2003.
- [16] Chmielewski T., Breuer P., Górsi P., Konopka E.: *Monitoring of tall slender structures by GPS measurements*. Wind and Structures, 2009, pp. 401-412.
- [17] Beshor R., Kijewski-Correa T., Kochly M., Kareem A.: *Full-scale monitoring of wind induced response of tall buildings*. Proceedings of the 4th World conference on structural control and monitoring, 2006.
- [18] Chen. G., Herring T.A. and King R.W. (1998): "TRACK software manual". MIT, 1998.
- [19] Wrona M.: *GNSS Application for Structural Monitoring Systems, Recent Advantages in research on environmental effects on buildings and people*. Polish Association for Wind Engineering, 2010, pp. 463-472.
- [20] Figurski M., Gałuszkiewicz M., Wrona M.: *A bridge deflection monitoring with GPS. Artificial Satellites*, Journal of Planetary Geodesy, Vol. 42 No. 4, 2007, pp. 229-238.
- [21] Kalman R.: *A New Approach to Linear Filtering and prediction Problems*, Transactions of the ASME. Journal of Basing Engineering, vol. 82, March, 1960.