

Załącznik 2

AUTOREFERAT

DR INŻ. TOMASZ OWERKO

Spis treści

1. Imię i Nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowo-dydaktycznych.....	3
4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2014 r. poz. 1852)	4
4.1. Geneza i cele cyklu publikacji.....	8
4.2. Omówienie wyników badań własnych.....	11
4.2.1. Integracja, badania i rozwój różnych technologii pomiarowych do diagnostyki obiektów mostowych	13
4.2.2. Nowoczesne technologie pomiarowe – analiza i wdrożenie do badań obiektów inżynierskich pod obciążeniem próbnym oraz badaniach pod obciążeniem użytkowym, z uwzględnieniem obiektów mostowych różnego typu.....	21
4.2.3. Algorytmy obliczeniowe i ich optymalizacja do analizy danych reprezentujących dynamiczne zachowanie obiektu	33
4.2.4. Rozszerzenie możliwości technologii geodezyjnych na badania dynamiczne poprzez rozwój oprogramowania oraz algorytmów pomiarowych wraz z przedstawieniem rozwiązań konstrukcyjnych ułatwiających integrację danych pozyskiwanych różnymi technologiami pomiarowymi	38
4.2.5. Rozwój i implementacja algorytmów obliczeniowych pozwalających na integrację informacji pozyskiwanej w czasie badań pod obciążeniami z systemami monitoringu strukturalnego (SHM)	42
4.3. Podsumowanie.....	47
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych	50
6. Bibliografia.....	54

1. **Imię i nazwisko:** Tomasz Owerko

2. **Posiadane dyplomy i stopnie naukowe:**

A. Tytuł zawodowy magistra inżyniera w dyscyplinie geodezja i kartografia, specjalność geodezja inżynieryjno-przemysłowa, uzyskany na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie.

Praca magisterska pt.: „Ocena możliwości języka programowania GeoBASIC

dla tachymetrów elektronicznych firmy Leica”, obroniona 3.06.2005 r.

Opiekun naukowy: dr inż. Zdzisław Sobczyk.

B. Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie geodezja i kartografia, uzyskany na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie.

Praca doktorska pt.: „Ocena poziomu ufności norm ISO 17123 w aspekcie praktycznych wyników obserwacji”, obroniona 17.12.2009 r.

Promotor:

dr hab. inż. Alojzy Dzierżęga, prof. nadzw. AGH (AGH w Krakowie).

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Jan Gocał (AGH w Krakowie),

dr hab. inż. Bogdan Wolski, prof. nadzw. PK (Politechnika Krakowska).

C. Studia podyplomowe: Inżynieria Oprogramowania. Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH w Krakowie (2015-2016).

3. **Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowo-dydaktycznych:**

- Od 1.02.2008 do 31.01.2010 – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, asystent.
- Od 28.09.2011 do 30.09.2012 oraz od 1.11.2012 do 30.09.2016 – Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, adiunkt.
- Od 1.02.2010 – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, adiunkt.

Dodatkowo, od czerwca 2016, kierownik studiów podyplomowych „BIM – modelowanie i zarządzanie informacją o obiektach infrastruktury i procesach budowlanych”, realizowanych na Wydziale Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska w Krakowie (pierwsza edycja). Jestem pomysłodawcą i autorem programu ww. studiów.

Tomasz Owerko

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2014 r. poz. 1852)

Moim osiągnięciem naukowym jest: „**Zastosowanie, opracowanie oraz integracja technologii pomiarowych i obliczeniowych przydatnych do oceny stanu technicznego obiektów mostowych**” przedstawionych w cyklu publikacji oraz objętych ochroną jako wzory użytkowe.

W swoich badaniach koncentrowałem się nad rozszerzeniem podstaw technologicznych, pomiarowych i algorytmicznych geodezji inżynieryjno-przemysłowej w aspekcie poprawnej akwizycji danych pomiarowych, przetwarzania wyników oraz rozwoju adekwatnych metod obliczeniowych, dających podstawę do zwiększania informacji uzyskiwanej o wybranych typach obiektów inżynierskich. Swoje prace badawcze prowadziłem w oparciu o technologie, pozwalające na uzyskanie cyfrowej reprezentacji analogowego sygnału drgań mechanicznych obiektów inżynierskich. Wykorzystywałem w szczególności naziemną interferometrię radarową. Jako geodetę uprawnionego (zakres 1 oraz 4 w rozumieniu art. 42 Ustawy Prawo geodezyjne i kartograficzne) szczególnie interesują mnie prace związane z badaniami obiektów inżynierskich, które mają na celu zweryfikowanie stanu konstrukcji, a w konsekwencji ocenę ich bezpieczeństwa.

Ciekawą grupę konstrukcji, dla których badania odbiorcze są w znakomitej większości obligatoryjne przed oddaniem ich do użytkowania, stanowią obiekty mostowe. Pomiarowe rozwiązania technologiczne, które stosowałem podczas badań pod obciążeniami użytkowymi oraz próbnymi obejmują między innymi pomiary i analizy danych radarowych, integrację pomiarów radarowych oraz skaningu laserowego, systemów GNSS, programowalne tachymetry, wykorzystanie możliwości akwizycji danych pomiarowych z sensorów wbudowanych we współczesne, powszechnie dostępne telefony komórkowe, czy pomiary wykonywane technikami wizyjnymi. Do opracowania tego typu danych należy stosować odpowiednie, niestandardowe w geodezji algorytmy, pozwalające na uzyskiwanie istotnych informacji o badanym obiekcie. Moje badania obejmują zatem również rozwój warstwy obliczeniowo-algorytmicznej.

Należy podkreślić, że pomiary przemieszczeń, deformacji oraz monitoring obiektów inżynierskich na potrzeby badań naukowych prowadzony jest przez badaczy reprezentujących trzy niezależne nurty: środowisko konstruktorów, w szczególności o specjalności mostowej, naukowców rozwijających technologie i techniki SHM (ang. Structural Health Monitoring) oraz geodetów. Istotnym elementem moich badań była zatem współpraca z przedstawicielami każdego z tych trzech nurtów, a także możliwość konfrontowania wyników pomiarów i analiz, stanowiących istotny wkład w rozwój dyscypliny naukowej, którą reprezentuję. Moje badania, czynny udział w konferencjach międzynarodowych oraz publikacje odzwierciedlają zaangażowaną postawę wobec nauki. Poniżej przedstawiam wykaz publikacji, chronionych wzorów

użytkowych oraz zgłoszonego wynalazku. Każde osiągnięcie składowe ma przypisaną liczbę punktów zgodnie z komunikatem Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Uważam, że badania prowadzone w dyscyplinie technicznej, jaką jest geodezja inżynieryjno-przemysłowa, powinny cechować się również aspektami wdrożeniowymi, dlatego w niniejszym autoreferacie będę, między innymi, odwoływał się do pięciu pozycji – raportów z badań, których byłem kierownikiem, pokazujących praktyczne aspekty wdrożenia technologii pomiarowych i obliczeniowych, na potrzeby laboratoriów prowadzących badania obiektów mostowych oraz instytucji naukowych PAN-u.

Ponadto moje doświadczenie zdobyte w geodezji inżynieryjno-przemysłowej (geodezyjna obsługa dużych inwestycji kubaturowych w Polsce, geodezyjne pomiary przemieszczeń kluczowych obiektów hydrotechnicznych w Polsce południowej), fotogrametrii (realizacja międzynarodowych projektów fotogrametrii cyfrowej na rynek USA) oraz bezprecedensowe wdrożenia technologii interferometrii radarowej do badań dużych obiektów mostowych zaowocowały odbyciem stażu naukowego w ramach programu TOP 500 Innovators na Uniwersytecie Stanforda w USA (lipiec-wrzesień 2015). W zakresie merytorycznym byłem również recenzentem publikacji czasopisma Structural Health Monitoring (lista filadelfijska).

Publikacje oraz monografie:

1. Kohut P., Holak K., Uhl T., Krupiński K., **Owerko T.**, Kuras P., 2012. *Structure's condition monitoring based on optical measurements*. Key Engineering Materials; ISSN 1013-9826. 2012 vol. 518, s. 338–349.
punktacja: 10.000, Baza Web of Science, Udział w opracowaniu: 25%
Zakres merytoryczny udziału: Zaprojektowanie i wykonanie badań w terenie, analiza i opracowanie wyników w szczególności w zakresie interferometrii radarowej.
2. **Owerko T.**, Ortyl Ł., Kocierz R., Kuras P., Salamak M., 2012. *Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry – case study*. Bridge maintenance, safety, management, resilience and sustainability : proceedings of the sixth international conference : Stresa, Italy, 8–12 July 2012, ISBN: 978-0-415-62124-3.
punktacja: 10.000, Baza Web of Science, Udział w opracowaniu: 35%
Zakres merytoryczny udziału: Kierowanie pracami zespołu geodezyjnego, analiza i opracowanie danych radarowych (około 60% danych statycznych i około 40% danych dynamicznych, analiza profilu radarowego, wykonanie projektu obserwacji na podstawie projektu próbnego obciążenia
3. Kuras P., **Owerko T.**, Ortyl Ł., Kocierz R., Sukta O., Pradelok S., 2012. *Advantages of radar interferometry for assessment of dynamic deformation of bridge*. W: Bridge maintenance, safety, management, resilience and

sustainability : proceedings of the sixth international conference : Stresa, Italy, ISBN: 978-0-415-62124-3.

punktacja: 10.000 , Baza Web of Science, Udział w opracowaniu: 23%

Zakres merytoryczny udziału: Analiza i opracowanie danych radarowych (między innymi analiza widmowa), analiza stanu wiedzy.

4. **Owerko T.**, 2013. *Variation of frequency response of a cable-stayed bridge and calculation of the damping coefficient of selected vibration modes based on the data recorded with radar systems*. Geomatics and Environmental Engineering ; ISSN 1898-1135. 2013 vol. 7 no. 4, s. 79–86

punktacja: 5.000, Udział w opracowaniu: 100%

5. Kohut P., Holak K., Uhl T., Ortyl Ł., **Owerko T.**, Kuras P., Kocierz R., 2013. *Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements*. Structural Health Monitoring ISSN 1475-9217. — 2013 vol. 12 iss. 5–6 Special issue on Noncontact measurement technology for structural health monitoring, s. 411–429.

punktacja: 40.000, Lista Filadelfijska, , Baza Web of Science, IF=3,206, Udział w opracowaniu: 15%

Zakres merytoryczny udziału: zaprojektowanie eksperymentu docelowego, opracowanie wyników eksperymentu docelowego, statystyczne opracowanie wyników eksperymentu docelowego.

6. **Owerko T.**, 2013. *Analysis and measurement technology of testing displacements and vibrations of the arch bridge*. GeoConference on Informatics, geoinformatics

and remote sensing, conference proceedings. vol. 2, Geodesy and mine surveying ; Photogrammetry and remote sensing. ISBN: 978-619-7105-01-8.

punktacja: 10.000, , Baza Web of Science, Udział w opracowaniu: 100%

7. Gocał J., Ortyl Ł., **Owerko T.**, Kuras P., Kocierz R., Ćwiąkała P., Puniach E., Sukta O., Bałut A., 2013. *Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar*. Wydawnictwa AGH, 2013. ISBN: 978-83-7464-645-1.

punktacja: 25.000, Autor rozdziału 7: *Surveying of static displacements and vibrations of bridge structures*. Monografia w języku angielskim.

Udział w opracowaniu rozdziału 7: 100%.

8. **Owerko T.**, 2014. *Application of ground-based radar interferometry technique to bridge load testing*. Pomiary, Automatyka, Kontrola; ISSN 0032-4140. — 2014 vol. 60 nr 12, s. 1096–1099.

punktacja: 7.000, Udział w opracowaniu: 100%

9. **Owerko T.**, 2014. *Beat frequency detection of bridges using ground-based radar interferometry*. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*. ISSN 0032-4140. — 2014 vol. 60 nr 11, s. 1065–1068.
punktacja: 7.000, Udział w opracowaniu: 100%
10. **Owerko T.**, 2016. *Eliminating the problem of one-dimensionality of radar interferometry techniques for long-span slender bridge structures*. *Measurement Automation Monitoring*, Mar. 2016, no. 03, vol. 62, ISSN 2450-2855.
punktacja: 11.000, Udział w opracowaniu: 100%
11. **Owerko T.**, 2016. *Method of Prototyping Sensitive Dynamic Engineering Structures Supporting Automatic Information Regarding a Structure's Condition*. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. David Publishing Company. Vol. 10, number 8, August 2016.
Punktacja: brak, Udział w opracowaniu: 100%

Wzory użytkowe:

12. **Owerko T.**, Ortyl Ł., Kuras P., Kocierz R., 2016. *Reflektor do pomiaru przemieszczeń i odkształceń*. Opis ochronny wzoru użytkowego, Numer prawa wyłącznego: PL 68296 Y1, udzielony 2015-08-19, opublikowany 2016-03-31.
punktacja: 10.000, przyznane prawo ochronne. Udział w opracowaniu: 25%
Zakres merytoryczny udziału: Kierowałem pracami projektowymi, byłem pierwszym pomysłodawcą rozwiązania. Przeprowadziłem pierwszy eksperyment testowy. Optymalizowałem rozwiązanie i formułowałem zastrzeżenia patentowe.
13. Ortyl Ł., Kocierz R., Kuras P., **Owerko T.**, 2016. *Przenośne stanowisko do oceny dokładności pomiarów geodezyjnych*. Opis ochronny wzoru użytkowego, Numer prawa wyłącznego: PL 68505 Y1, udzielony 2015-10-13, opublikowany 2016-07-29.
punktacja: 10.000, przyznane prawo ochronne. Udział w opracowaniu: 25%
Zakres merytoryczny udziału: Optymalizowałem rozwiązanie i formułowałem zastrzeżenia patentowe.

Suma punktów MNiSW: 155

Dane bibliometryczne na podstawie bazy danych Thomson Reuters Web of Science:

Suma cytowań w bazie : 18.

Suma cytowań w bazie bez autocytowań : 15.

Liczba publikacji cytujących : 13.

Liczba publikacji cytujących bez autocytowań : 12.

h-index : 3.

Summary Impact Factor: 3,206.

Dane bibliometryczne na podstawie bazy danych Google Scholar:

Ilość cytowani w bazie: 78

h-index : 5

Przykłady wdrożenia technologii interferometrii radarowej i opracowanych metod obliczeniowych do badań obiektów inżynierskich przedstawiam na podstawie raportów z prac, w których pełniłem rolę kierownika oraz zgłoszenia patentowego wynalazku:

14. **Owerko T.**, 2016. *Sposób testowania konstrukcji obiektu*. Wniosek o udzielenie patentu na wynalazek w Urzędzie patentowym RP zarejestrowano 20.07.2016 pod numerem P.418028.
Punktacja: w trakcie rozpatrywania. Udział w opracowaniu: 100%
15. Raport z pomiarów próbnego obciążenia mostu M-4 nad rzeką Wisłą koło Kwidzyna w ciągu drogi krajowej nr 90 wykonanych metodą interferometrii radarowej. **Kierownik: Tomasz Owerko.**
16. Raport z wykonania pomiarów pod próbnym obciążeniem dynamicznym mostu przez Wisłę MA-91 w Grudziądzu metodą interferometrii radarowej. **Kierownik: Tomasz Owerko.**
17. Raport z pomiarów drgań przęsła mostu nurtowego podwieszonoego M-2 nad Brdą w Bydgoszczy w ciągu ul. Ogińskiego, wykonanych metodą interferometrii radarowej. **Kierownik: Tomasz Owerko.**
18. Raport pomiarowy z geodezyjnej kontroli konstrukcji teleskopu do obserwacji kosmicznego promieniowania gamma najwyższych energii IFJ PAN. **Kierownik: Tomasz Owerko.**
19. Raport z realizacji zlecenia „Analiza wyników badania przemieszczeń przęsła estakady głównej podczas obciążeń statycznych” dla estakady głównej i podwieszonoego w ciągu linii tramwajowej KST w Krakowie. **Kierownik: Przemysław Kuras i Tomasz Owerko.**

Powyższe prace były realizowane z afiliacją Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie (WGGiŚ AGH). Wobec powyższego dokumentacja znajduje się w archiwum WGGiŚ AGH, u odbiorców oraz stanowi załącznik do mojego wniosku habilitacyjnego.

4.1 Geneza i cele cyklu publikacji

Bezpieczne funkcjonowanie obiektu inżynierskiego jest uzależnione od wielu czynników. W pierwszej kolejności konstrukcja musi być zaprojektowana w poprawny sposób, to znaczy mieć wystarczające zapasy bezpieczeństwa. Typ ustroju nośnego i wymiary elementów konstrukcyjnych muszą odpowiadać zakładanej technologii wznoszenia obiektu oraz obciążeniom, jakie konstrukcja ma przenosić. Podczas etapu budowy obiekt musi zostać zrealizowany zgodnie z projektem lub uwzględniać zaakceptowane przez projektanta zmiany, wynikające na przykład z innych niż założone

warunków posadowienia obiektu lub przeprowadzonych w trakcie budowy programów naprawczych. Niezbędne dane wejściowe do oceny stanu konstrukcji uzyskuje się między innymi w wyniku pomiarów przemieszczeń i odkształceń prowadzonych w trakcie robót budowlanych, jak również bezpośrednio przed oddaniem obiektu do użytku, na przykład podczas badań pod obciążeniem próbnym. W czasie użytkowania danej konstrukcji informacje o stanie obiektu pochodzą na przykład z badań pod obciążeniem użytkowym. Pomiary takie są wykonywane podczas obciążenia statycznego obiektu inżynierskiego oraz w wyniku badań dynamicznych w szczególności w sposób zautomatyzowany przy zastosowaniu systemów monitoringu geodezyjnego i strukturalnego. Praca konstrukcji podczas prób oraz użytkowania może być zatem monitorowana za pomocą różnych technologii pomiarowych. Do pozyskiwania danych powszechnie stosowane są w szczególności techniki geodezyjne oraz inne instrumenty pomiarowe: niwelacja geometryczna, pomiary GNSS, pomiary kątowo-liniowe, akcelerometry, czujniki indukcyjne, radary interferometryczne i inne (Wang et al., 2014), (Vaghefi et al., 2012).

Podstawowym celem pomiarów rejestrujących odpowiedź konstrukcji na obciążenia statyczne według definicji z wytycznych krajowych (GDDKiA, 2008) jest sprawdzenie zachowania warunków geometrycznych. Mogą to być wartości ugięć przęseł mostowych, osiadania i obroty podpór oraz odkształcenia, a co za tym idzie naprężenia w elementach konstrukcyjnych. Wartości te pozwalają na sprawdzenie zarówno poprawności założeń przyjętych do modelowania pracy konstrukcji, jak i poprawności jej wykonania, oraz dają podstawę do wnioskowania o klasie nośności obiektu i dopuszczeniu go do użytkowania.

Na przestrzeni ostatnich kilkadziesiąt lat coraz większe znaczenie w ocenie stanu konstrukcji nabierają informacje pozyskane na podstawie badań dynamicznych. W ujęciu technologii pomiarowych klasyczne techniki geodezyjne, ze względu na niską częstotliwość próbkowania, nie są szeroko stosowane podczas badań dynamicznych. Uzupełnienie zbioru instrumentów pomiarowych o urządzenia rejestrujące zmiany dynamiczne jest zatem niezbędne, aby istotnie nie ograniczać możliwości wnioskowania o stanie obiektu.

Obecnie znakomita większość systemów i algorytmów SHM (ang. Structural Health Monitoring) opiera się na danych pomiarowych o wysokiej częstotliwości próbkowania (Wenzel, 2009). Warto dodać, że szereg ciekawych problemów pojawia się właśnie przy ocenie obiektów o wiotkiej konstrukcji. Mają one smukłe elementy nośne i w związku z tym są potencjalnie wrażliwe dynamicznie. Do tego typu obiektów zaliczamy między innymi maszty, wieże, kominy oraz obiekty mostowe. Dla takich konstrukcji interesujące są parametry dynamiczne charakteryzujące zachowanie obiektu jako całości: wielkości modalne, częstotliwości drgań własnych oraz odpowiadające im wielkości tłumienia. Ważne są też cechy sygnałów reprezentujących informacje o charakterze lokalnym. To na nich obecnie koncentrują się badania naukowców z całego świata, obejmując również możliwości lokalizowania uszkodzeń

lub ich detekcji. Wykorzystywane są do tego intensywnie obecnie rozwijane algorytmy uczenia maszynowego (Farrar i Worden, 2013).

Dla nowych obiektów mostowych oba istotne etapy, projektowy i wykonawczy, poprzedzające oddanie do użytkowania, są weryfikowane poprzez przeprowadzenie badań konstrukcji mostowych pod obciążeniami próbnymi. Co do zasady powinny one wpływać na przyjęty model obliczeniowy. W przypadku zastosowania konstrukcji nietypowych lub opartych na nowych typach materiałów konstrukcyjnych badania takie mogą stanowić podstawę do weryfikacji przeprowadzonych uprzednio analiz teoretycznych (GDDKiA, 2008). Wyniki takich badań są w szczególności traktowane jako podstawa do kalibracji modeli obliczeniowych opartych na analizach wykonanych metodą elementów skończonych. W szerokiej gamie źródeł informacji stanowiących podstawę diagnostyki obiektów mostowych to właśnie próbne obciążenia mostowe odgrywają szczególnie istotną rolę (Ryall, 2010).

Analogicznie, badania istniejących obiektów mostowych są niezbędnym elementem weryfikacji ich kondycji. W szczególności służą one do doświadczalnego sprawdzenia nośności obiektu mostowego lub sprawdzenia poprawności jego zachowania podczas użytkowania. W Polsce, zgodnie z wytycznymi Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA, 2008), doświadczenia takie mogą być przeprowadzone jako dedykowany eksperyment badawczy lub jako badania pod obciążeniem użytkowym.

Badanie dynamicznego zachowania obiektów inżynierskich, w szczególności obiektów mostowych, nie jest zadaniem łatwym. Stosowanie typowych metod służących do pomiarów drgań jest znacząco utrudnione ze względu na wysokie położenie względem ziemi ustroju nośnego. Ponadto niejednokrotnie najbardziej oczekiwane pomiary powinny być realizowane na najdłuższych, często niedostępnych do bezpośredniego pomiaru, przęsłach nurtowych, wysokich pylonach lub trudno dostępnych ustrojach wantowych. Ich realizacja przy użyciu tradycyjnych czujników indukcyjnych, ustawianych na statywach geodezyjnych bezpośrednio pod przęsłem jest więc całkowicie wykluczona. To dlatego do badań dynamicznych stosuje się techniki teledetekcyjne, między innymi takie, jak rozwiązania oparte na interferometrii radarowej czy systemach wizyjnych. Pozwalają one prowadzić pomiary w wygodny i bezpieczny sposób, z ominięciem utrudnień dostępowych do konstrukcji. Ważne jest jednak, aby interpretacja takich odczytów była poprawna, dlatego muszą być one analizowane za pomocą właściwych metod obliczeniowych. Wspomniane metody winny być zweryfikowane w odniesieniu do występujących w praktyce typów konstrukcji. W ostatnich latach duże znaczenie w badaniach obiektów narażonych na wzbudzenia dynamiczne nabrała naziemna interferometria radarowa. Metoda ta, mimo bardzo wielu zalet, do których należą między innymi wysoka częstotliwość rejestracji oraz pomiar wielu punktów konstrukcji jednocześnie w jednolitym układzie czasu i współrzędnych, nie jest pozbawiona mankamentów. Jej podstawowe ograniczenia wiążą się z jednowymiarowym charakterem pracy. Poprawna analiza

wyników pomiarów, w szczególności filtracja danych oraz ekstrakcja parametrów definiujących dynamiczny stan obiektu, jest kluczowa.

Dla zrealizowanych obiektów mostowych coraz częściej wykonuje się systemy monitoringu konstrukcji, w których sensorami pomiarowymi są między innymi instrumenty geodezyjne. Ponieważ współczesne instrumenty geodezyjne umożliwiają dostęp do poszczególnych sensorów programowo, poprzez API (ang. Application Programming Interface), możliwe jest ich zastosowanie do badań mających charakter dynamiczny poprzez zaimplementowanie właściwych algorytmów. Ponadto takie zoptymalizowanie metod wykonywania badań pod obciążeniem próbnym wydaje się konieczne, aby ich wyniki mogły zasilać informacją systemy monitoringu SHM. Ponieważ dyskretny sygnał cyfrowy rejestrowany podczas badań dynamicznych jest rejestrowany z dużą częstotliwością, może on służyć wyznaczeniu parametrów świadczących o potencjalnych uszkodzeniach konstrukcji. Opracowane algorytmy umożliwiają detekcję występowania defektów, a nawet ich lokalizację.

Problematyka badań konstrukcji jest bardzo interesująca z naukowego punktu widzenia, ponieważ wymaga wiedzy z kilku dziedzin: geodezji inżynierskiej, budownictwa, technik SHM oraz cyfrowego przetwarzania sygnału i programowania. Nie bez znaczenia jest również fakt, że obecnie obowiązujące przepisy, dotyczące badań i monitoringu obiektów mostowych, odbiegają nieco od istniejącego stanu techniki. Mam tu na myśli zarówno przepisy zawarte w ustawie Prawo budowlane oraz rozporządzeniach wykonawczych do tej ustawy, jak również w wytycznych Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad. Oba dokumenty, choć poprawne merytorycznie, nie uwzględniają olbrzymiego postępu w rozwoju metod obliczeniowych, algorytmów przetwarzania danych oraz rozwoju sprzętu pomiarowego, jaki dokonał się w ostatnich latach. I, co szczególnie zaskakujące, nie jest standardową praktyką, aby badania pod obciążeniami próbnymi w sposób istotny zasilały bazę wiedzy systemu monitoringu obiektu mostowego. Podobnie wyniki badań pod obciążeniami próbnymi nie są analizowane przez pryzmat algorytmów SHM, które mogłyby w sposób istotny pomóc w identyfikacji potencjalnego uszkodzenia konstrukcji.

4.2 Omówienie wyników badań własnych

Wszystkie badania obiektów inżynierskich oparte na pomiarach wielkości fizycznych są bezcennym źródłem informacji o aktualnym stanie obiektu. Badania odbiorcze w Polsce często obejmują obciążenia statyczne i dynamiczne. Obciążenia statyczne pomagają odpowiedzieć na pytanie, jaka jest sztywność konstrukcji oraz jak zachowują się podpory obiektu. Badania statyczne nie stanowią podstawowego nurtu przedstawionego cyklu publikacji, aczkolwiek są częścią omawianego dorobku.

Badania dynamiczne, zwłaszcza prowadzone z wykorzystaniem nowoczesnych technologii, zwiększają ilość i jakość informacji, jaką dysponujemy na temat obiektu. W szczególności szeregi czasowe, reprezentujące drgania mechaniczne, mogą być podstawą analizy i wyznaczenia globalnych charakterystyk dynamicznych obiektu:

postaci drgań oraz wartości tłumienia, jak również stanowić podstawę do wykrycia ewentualnych uszkodzeń, a nawet ich lokalizacji.

Można znaleźć wiele publikacji, omawiających problematykę badań obiektów mostowych, na przykład prace Bienia et al. (2008), Ołazka et al. (2014), Łazińskiego i Salamaka (2010), jednak w omawianym zakresie zaproponowałem szereg rozwiązań mających swoje źródło w interdyscyplinarnym podejściu do problemu ze szczególnym uwzględnieniem swojej dyscypliny naukowej. Powiązany tematycznie cykl publikacji i rozwiązań technicznych omawia w szczególności następujące zagadnienia:

- 1. Integracja, badania i rozwój różnych technologii pomiarowych do diagnostyki obiektów mostowych – publikacje 1, 5 oraz 6.**
- 2. Nowoczesne technologie pomiarowe – analiza i wdrożenie do badań obiektów inżynierskich pod obciążeniem próbnym oraz badaniach pod obciążeniem użytkowym, z uwzględnieniem obiektów mostowych różnego typu – publikacje 2, 3, 4 oraz 8.**
- 3. Algorytmy obliczeniowe i ich optymalizacja do analizy danych reprezentujących dynamiczne zachowanie obiektu – publikacje 7 oraz 9.**
- 4. Rozszerzenie możliwości technologii geodezyjnych na badania dynamiczne poprzez rozwój oprogramowania oraz algorytmów pomiarowych wraz z przedstawieniem rozwiązań konstrukcyjnych ułatwiających integrację danych pozyskiwanych różnymi technologiami pomiarowymi – publikacja 10, wzory użytkowe 12 oraz 13.**
- 5. Rozwój i implementacja algorytmów obliczeniowych pozwalających na integrację informacji pozyskiwanej w czasie badań pod obciążeniami z systemami monitoringu strukturalnego (SHM) – publikacja 11.**

Prezentowałem wyniki swoich badań i dyskutowałem na ich temat między innymi na konferencjach: FIG-IAG 1st Joint International Symposium on Deformation Monitoring (The Hong Kong Polytechnic University, listopad 2011, Hong Kong), FIG-IAG-ISPRS 2nd Joint International Symposium on deformation Monitoring (The University of Nottingham, wrzesień 2013, Nottingham, Wielka Brytania), FIG-IAG 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (Technische Universität Wien, Marzec 2016, Wiedeń, Austria), 7th International Symposium on Mobile Mapping Technology (SGP, czerwiec 2011, Kraków, Polska), 10. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie (Technischen Universität Bergakademie Freiberg, maj 2010, Freiberg, Niemcy), IABMAS – 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (Politecnico di Milano, lipiec 2012, Stresa, Włochy) oraz dzięki uprzejmości naukowców z Uniwersytetu Stanforda prof. A. Kiremidjian i prof. Fu-Kuo Chang, gościnnie na 10th International Workshop on Structural Health Monitoring (Stanford University, wrzesień 2015, Stanford, CA, USA).

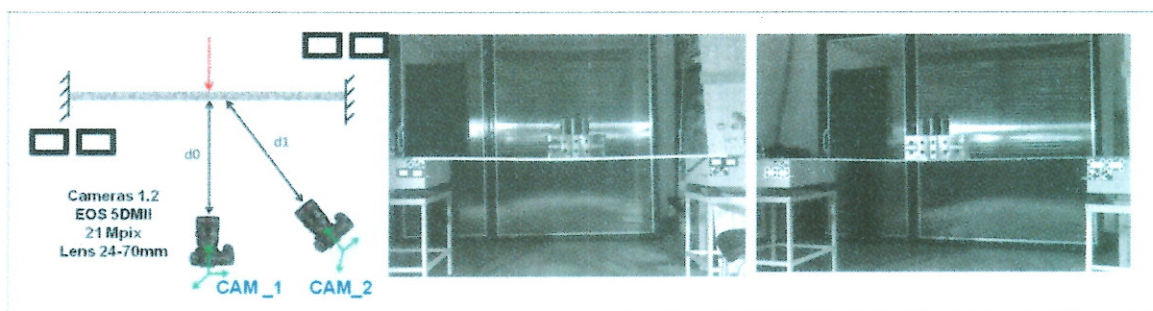
Ponadto wyniki moich badań były prezentowane między innymi podczas cyklu konferencji organizowanych przez Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej („Aktualne problemy w geodezji inżynierskiej”, „Geodezyjne systemy

pomiarowe dla budownictwa), na warsztatach Politechniki Wrocławskiej („Badania obiektów mostowych”, listopad 2013) czy VII Ogólnopolskiej Konferencji Mostowców (Politechnika Śląska, maj 2015, Wisła).

4.2.1 Integracja, badania i rozwój różnych technologii pomiarowych do diagnostyki obiektów mostowych

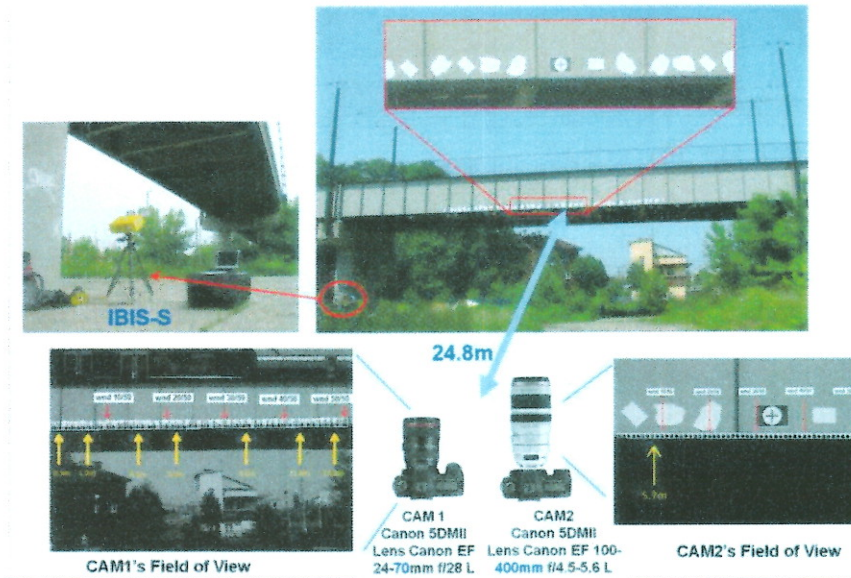
Pierwsza z publikacji pod tytułem „*Structure's condition monitoring based on optical measurements*” przedstawia kompleksowe porównanie dwóch bezkontaktowych technologii pomiarowych, które mogą być wykorzystywane do pomiarów obiektów mostowych. Praca stanowi efekt współdziałania naukowego z zespołem Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Celem publikacji jest wzajemna walidacja oraz sprawdzenie, czy w przypadku przeprowadzania pomiarów obiektów mostowych możliwe jest wzajemne uzupełnienie wyników pomiędzy badanymi systemami pomiarowymi. Jest to szczególnie ważne, z kilku powodów, dla obiektów mostowych takich jak wiadukty tramwajowe lub estakady. Po pierwsze, wraz ze wzrostem odległości pomiędzy pracującą jednostką radarową a punktem pomiarowym, ze względu na jednowymiarowy charakter pracy interferometru radarowego, dokładność wyznaczenia przemieszczenia pionowego prężyła spada. Mimo iż jednostka radarowa jest w stanie rejestrować zachowanie wielu punktów jednocześnie, jakość otrzymywanej informacji nie jest jednakowa na całej długości. Drugim ważnym aspektem, który był motywacją do tego badania, jest fakt, że jednostka radarowa ustawiona pod prężem, może nie zarejestrować kompletności postaci drgań skrętnych i jednoznacznie identyfikować wartości przemieszczeń potencjalnie występujących na podporach i przyczółkach.

W publikacji omówiono budowę oraz sposób pracy systemu wizyjnego. W pierwszej kolejności przedstawiono wykonane testy laboratoryjne, w których jako metodę porównawczą wykorzystano instrument Leica LaserTracker (Rys. 1). Pomiar zaprojektowano w ten sposób, aby obserwować 18 punktów kontrolnych.



Rys. 1 Testy laboratoryjne. Źródło: publikacja numer 1.

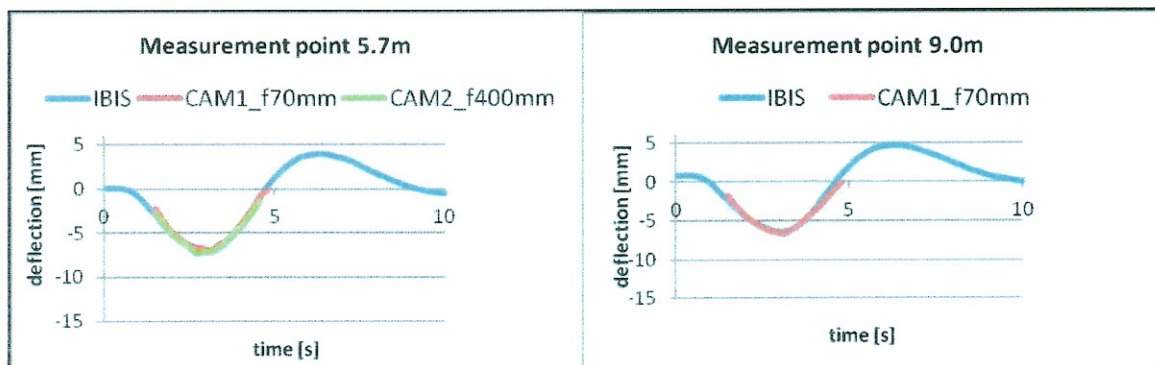
W wyniku porównania przemieszczeń stwierdzono, że maksymalna różnica pomiędzy opracowanym systemem wizyjnym (pierwsza z dwóch kamer) oraz systemem Leica wyniosła 0.174 mm, minimalnie 0.010 mm, przy średniej wartości różnic wynoszącej 0.063 mm. Dla drugiej kamery wyniki są podobne, wartość średnia różnic wynosi 0.064 mm.



Rys. 2 Ustawienie systemów pomiarowych (wizyjnego i radarowego) podczas pomiarów terenowych. Aparaty wyposażone były w różne obiektywy, odpowiadało im zatem różne pole widzenia. Źródło: publikacja numer 1.

Po tak obiecujących wynikach laboratoryjnych przystąpiono do przeprowadzenia badań na obiekcie mostowym. Test wykonano na wiadukcie tramwajowym. Pomiar został zaprojektowany w taki sposób, aby płaszczyzna obserwacji systemu wizyjnego oraz radarowego była wzajemnie prostopadła (Rys. 2). Pomiarowi podlegało 7 punktów na przęśle, a porównywano maksymalne ugięcie dla każdego z punktów. Dane pomiarowe zarejestrowano dla ośmiu przejazdów tramwaju. Minimalna różnica pomiędzy systemami pomiarowymi wynosiła 0.08 mm, a maksymalna sięgnęła 0.93 mm.

Ponieważ oba systemy rejestrowały zachowanie przęsła w sposób ciągły, możliwe było porównanie przemieszczeń punktów w dziedzinie czasu (Rys. 3).



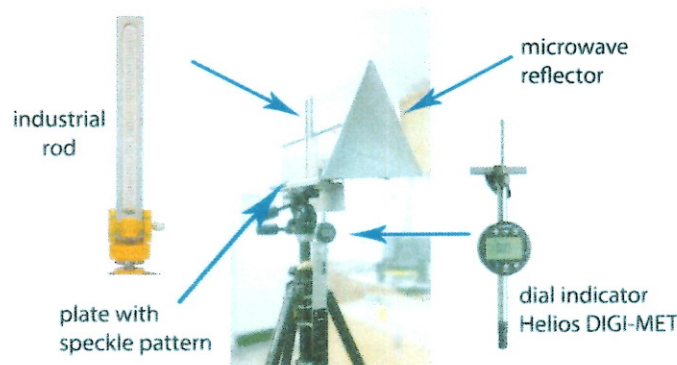
Rys. 3 Porównanie przemieszczeń w dziedzinie czasu. Źródło: publikacja numer 1.

W publikacji zweryfikowano zdolności pomiarowe systemu wizyjnego. Godny podkreślenia dla badań obiektów mostowych jest fakt, że pomiary mogą być wykonywane pod różnym kątem. Zgodność z systemem radarowym pozwala na wzajemne uzupełnianie wyników pomiarów, zwłaszcza że oba systemy rejestrują

zachowanie wielu punktów jednocześnie. Zatem zastosowanie obu systemów w tym samym czasie pozwala na identyfikację typu postaci drgań. W zakresie merytorycznym byłem odpowiedzialny za planowanie i wykonanie pomiarów oraz analizę rezultatów eksperymentu mostowego, w szczególności w zakresie interferometrii radarowej.

Merytoryczną kontynuację tych badań stanowią efekty prac przedstawione w publikacji pt. „**Monitoring of a civil structure’s state based on noncontact measurements**”. Należy zauważyć, że do badań konstrukcji można używać wielu technik pomiarowych. Niektóre z nich, takie jak GNSS (ang. Global Navigation Satellite Systems) czy LVDT (ang. linear variable differential transformer) są często i chętnie używane w badaniach, między innymi z powodu wiarygodności tych systemów. Występuje jednak niedogodność – niezbędne jest zamontowanie na badanym obiekcie czujników lub sensorów. Łatwo więc zauważyć, że dla przęsła nurtowego, dla którego prognozowane poprzez analizę modalną drgania cechują się niewielką amplitudą, żadna z tych technik nie będzie odpowiednia: GNSS cechuje się zbyt małą dokładnością, a LVDT będzie technicznie niemożliwe do zastosowania z przyczyn oczywistych (obecność przeszkody wodnej).

Eksperyment badawczy omawiany w publikacji został podzielony na trzy części. Pierwszą z nich były testy laboratoryjne przeprowadzone dla platformy, która stanowiła podstawę późniejszych testów terenowych (Rys. 4).



Rys. 4 Platforma testowa do badań laboratoryjnych. Źródło: publikacja numer 5.

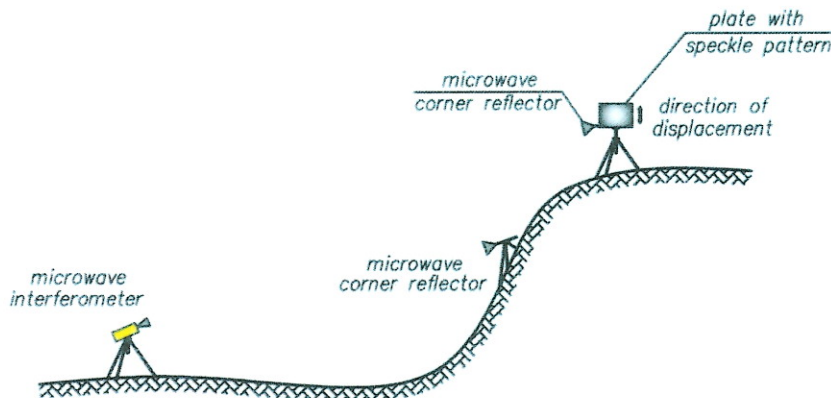
W szczególności istotne było zbadanie wzajemnej zgodności pomiarów, wykonywanych czujnikiem cyfrowym (Helios DIGI-MET) oraz niwelatorem precyzyjnym. Jako miarę zgodności użyto odchylenia standardowego różnic pomiarów (wzór 1):

$$\sigma_{\Delta} = \pm \sqrt{\frac{\Delta^2}{n}} = \pm 0.025 \text{ mm} \quad (1)$$

gdzie: Δ – wektor różnic przemieszczeń platformy zarejestrowany czujnikiem cyfrowym

i niwelatorem. Źródło: publikacja numer 5 (por. wzór (7) oraz tab. 1 w publikacji numer 5)

Przed przystąpieniem do pomiarów na obiekcie testowym wykonano pomiar symulacyjny w terenie. Test pomiarowy wykonano na wale ziemnym. Polegał on na jednoczesnym wykonywaniu zaplanowanych przemieszczeń pionowych uprzednio sprawdzonej platformy, której ruchy były kontrolowane za pomocą niwelatora, czujnika cyfrowego, radaru interferometrycznego oraz systemu wizyjnego. Szkic widoku z boku opisywanego eksperymentu przedstawia rysunek (Rys. 5).



Rys. 5 Szkic testu terenowego. Źródło: publikacja numer 5.

Wartości różnic przemieszczeń wyznaczonych podczas testu pokazują bardzo wysoką zgodność – niemianowany współczynnik korelacji pomiędzy wynikami różnych metod był wyższy niż 99.96%. Ze względu na bardzo wysoką zgodność wyników otrzymanych niwelatorem oraz czujnikiem cyfrowym średnia z ich odczytów była traktowana jako wartość referencyjna. Odchylenie standardowe różnic przemieszczeń wyznaczonych radarem i wartością referencyjną wynosił 0.378 mm, systemem wizyjnym i wartością referencyjną 0.506 mm oraz systemem wizyjnym i radarowym 0.561 mm.

Po tak obiecujących wynikach testów przeprowadzono eksperyment na obiekcie badawczym. W terenie osie kamer systemu wizyjnego nie były ustawione ściśle prostopadle do osi podłużnej obiektu mostowego. Elementy orientacji zewnętrznej zdjęć pozyskane za pomocą tachymetru były niezbędnym elementem umożliwiającym transformację wyników do układu obiektu (2):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -c_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie (x', y') to współrzędne na obrazie, c_k to stała kamery, (x, y, z) to współrzędne terenowe, natomiast M to macierz transformacji (3):

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos k \cos \varphi & -\cos \varphi \sin k & \sin \varphi \\ \sin \omega \sin \varphi + \cos \omega \sin k & -\sin \omega \sin \varphi \sin k + \cos \omega \cos k & -\sin \omega \cos \varphi \\ -\cos \omega \sin \varphi \cos k & \cos \omega \sin \varphi \sin k + \sin \omega \cos k & \cos \omega \cos k \end{bmatrix} \quad (3)$$

We wzorze (3) za pomocą ω , φ oraz κ oznaczono kątowne elementy orientacji kamery. W konsekwencji ugięcie przęsa może być wyrażone za pomocą wzoru (4):

$$\Delta Z = \frac{Y}{c_k} \Delta z \quad (4)$$

gdzie ΔZ – szukane ugięcie, Y – odległość terenowa od obiektu (wyznaczana wraz z innymi elementami orientacji zewnętrznej) oraz Δz – odpowiadająca, zarejestrowana składowa ugięcia na zdjęciu.

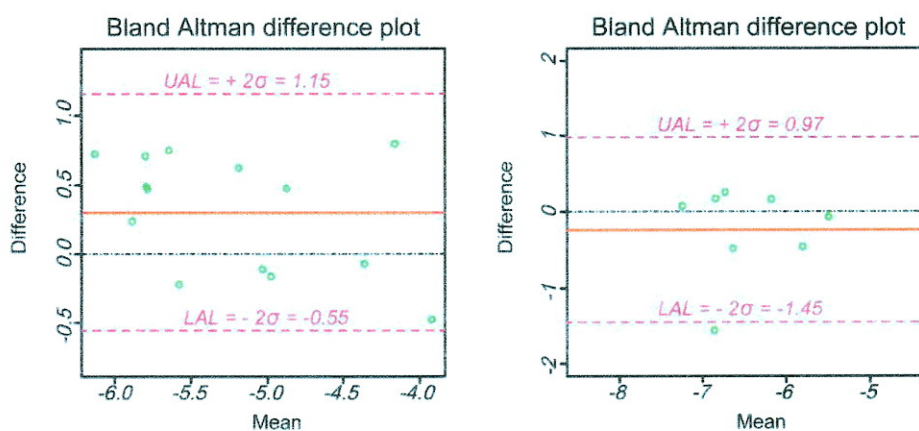
Przykład zestawienia wyników obejmuje tabela 1. Są to wyniki uzyskane w eksperymencie docelowym (na obiekcie mostowym).

Numer przejazdu	Metoda	Punkty pomiarowe (od początku przęsa) [m]										Δ_{min}	Δ_{max}	[mm]	
		7.5	10.6	11.2	11.7	13.9	14.5	15.0	17.1	17.6	20.8				
11	LD					-7.62									
	RI	-5.28	-6.42	-6.30	-6.78	-7.28	-7.17	-7.38	-6.24	-5.65	-4.09			-0.26	
	VB	-5.58	-6.85	-6.94	-7.02	-7.21	-7.17	-7.12	-6.66	-6.48	-5.06			0.97	
	Δ	0.30	0.42	0.64	0.24	-0.07	0.000	-0.26	0.42	0.83	0.97				
12	LD					-6.62									
	RI	-5.02	-6.07	-5.87	-6.33	-6.85	-6.76	-6.97	-5.88	-5.34	-3.98			-0.47	
	VB	-5.12	-6.21	-6.36	-6.44	-6.60	-6.53	-6.50	-6.08	-5.97	-4.78			0.80	
	Δ	0.10	0.14	0.49	0.11	-0.25	-0.23	-0.47	0.20	0.63	0.80				
13	LD					-6.72									
	RI	-4.95	-5.95	-5.81	-6.30	-6.39	-6.26	-6.46	-5.63	-5.01	-4.50			0.29	
	VB	-5.46	-6.46	-6.64	-6.77	-6.88	-6.82	-6.76	-6.34	-6.22	-5.00			1.20	
	Δ	0.51	0.549	0.83	0.47	0.49	0.56	0.30	0.71	1.21	0.50				
14	LD					-6.32									
	RI	-4.52	-5.40	-5.37	-5.80	-6.25	-6.16	-6.35	-5.41	-4.90	-3.87			-0.42	
	VB	-4.82	-5.73	-5.83	-5.86	-6.09	-5.93	-5.93	-5.54	-5.49	-4.47			0.60	
	Δ	0.30	0.33	0.46	0.06	-0.16	-0.23	-0.42	0.13	0.59	0.60				
15	LD					-6.82									
	RI	-5.16	-6.13	-5.94	-6.42	-6.92	-6.81	-7.01	-5.97	-5.39	-4.05			-0.36	
	VB	-5.38	-6.34	-6.43	-6.58	-6.75	-6.67	-6.65	-6.12	-6.04	-4.84			0.79	
	Δ	0.22	0.21	0.49	0.16	-0.17	-0.14	-0.36	0.15	0.65	0.79				

Tabela 1. Ugięcie 10 obserwowanych punktów (pierwsze ustawienie radaru). RI – system radarowy, LD – system pomiaru dalmierzem laserowym, VB – system wizyjny. Źródło: publikacja numer 5.

Duży testowy zbiór wyników został poddany wyczerpującej analizie statystycznej. Są one opisane szczegółowo w rozdziale 5.2 publikacji numer 5. W szczególności

przeprowadzono testy zgodności metody wizyjnej oraz radarowej za pomocą testu Blanda-Altmana. Rezultaty przedstawiono na Rys. 6.

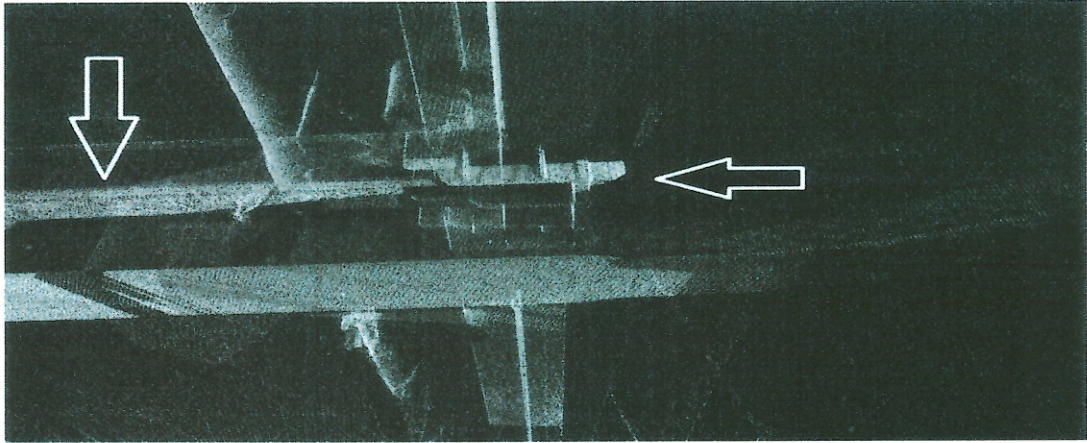


Rys. 6 Ocena zgodności systemu wizyjnego i radarowego testem Blanda-Altmana. Po lewej dla przykładowego przejazdu, po prawej dla maksymalnych ugięć. Źródło: publikacja numer 5.

Mój wkład w omawianą publikację polegał na opracowaniu transformacji systemu wizyjnego oraz przeprowadzeniu kompletnej statystycznej analizy wyników. Byłem mocno zaangażowany w planowanie poszczególnych eksperymentów oraz brałem udział w pracach terenowych.

Trzecia z publikacji, która merytorycznie dotyczy pierwszego zagadnienia, nosi tytuł „**Analysis and measurement technology of testing displacements and vibrations of the arch bridge**”. Jej istotą jest możliwość inwentaryzacji awarii, a w konsekwencji wykonanych programów naprawczych, wykrytych podczas budowy, za pomocą skaningu laserowego oraz przeprowadzenie monitoringu konstrukcji podczas badań pod obciążeniem próbnym. W takim przypadku, wraz z innymi danymi pomiarowymi, analiza wszystkich wyników stanowi podstawę do oceny, czy wiadukt został wykonany zgodnie z projektem, czy posiada założoną klasę nośności oraz czy wypełnia wymagania norm w szczególności PN-S-10050:1989 oraz PN-S-10040:1999. W omawianym obiekcie mostowym konstrukcję nośną stanowi jednoprzęsłowy łuk ze ściągiem z jazdą dołem, z zespoloną płytą pomostową. Funkcję ściągu spełniają belki podłużne pomostu. Ramiona łuku pochylone są do środka obiektu i opierają się za pośrednictwem łożysk na przyczółkach. Warto dodać, że obiekt zaprojektowano jako wiadukt klasy A w rozumieniu normy PN-S-10030:1985.

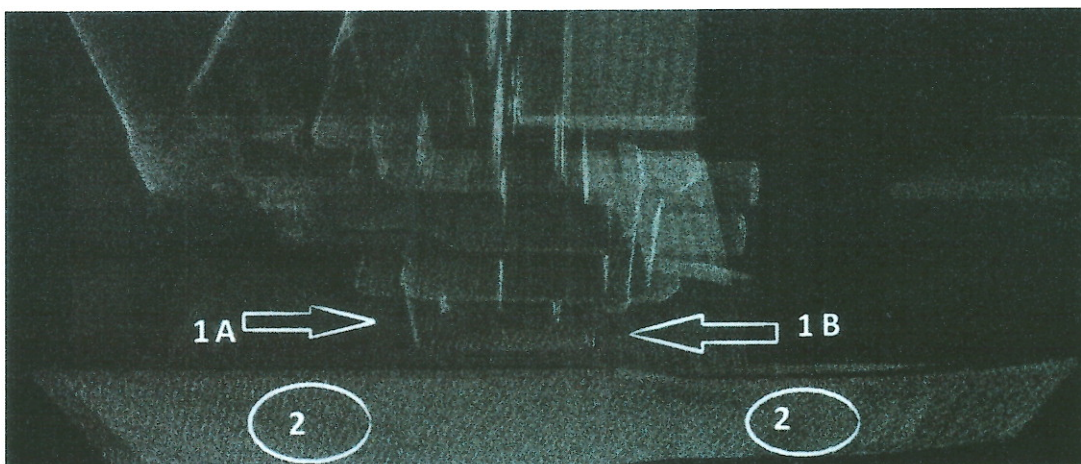
W badanym obiekcie mostowym przed testem zidentyfikowano wystąpienie deformacji łożysk i pęknięcia spoin łączących łożyska dźwigarów skrajnych, podłużnych ze łożyskami poprzecznymi. W związku z tym konstrukcja nośna została wzmocniona za pomocą sprężonych ściągu stalowych (Rys. 7).



Rys. 7 Sprężone ściągi stalowe oraz ich mocowanie (białe strzałki). Źródło: publikacja nr 6.

Obiekt mostowy był o tyle ciekawy, że prognozowane maksymalne ugięcie przęsła mogło sięgać 74 mm. W takich przypadkach dobrą praktyką jest realizowanie najazdu testowego dwuetapowo, aby stwierdzić, czy konstrukcja pracuje w zakresie sprężystym. Pomiary ugięć wykonano czujnikami indukcyjnymi, korzystając z faktu, że omawianym obiektem jest wiadukt. Niezależnie, podczas obciążenia przyczółków, weryfikowano osiadanie podpór za pomocą niwelacji geometrycznej. Publikacja wyczerpująco omawia wyniki. Warto nadmienić, że wobec maksymalnych przewidywanych teoretycznie ugięć na poziomie 73.5 mm stosunek ugięć trwałych do teoretycznych nie przekroczył 6%, natomiast stosunek ugięć sprężystych do teoretycznych nie przekroczył 88%. W drugim schemacie (obciążenie środka przęsła) prognozowane ugięcie teoretyczne uwzględniające osiadanie podpór miało wynieść maksymalnie 34.4 mm. W praktyce sięgnęło 31.7 mm, co oznacza, że ich stosunek ukształtował się na poziomie 92%. Stosunek ugięcia trwałego do całkowitego nie przekroczył 10%.

Podczas realizacji obiektu wykonano dwie sesje pomiarowe technologią skaningu laserowego. Celem pomiarów było uchwycenie stanu konstrukcji przed i po pełnym jej obciążeniu (Rys. 8).



Rys. 8 Zwiększona rozdzielczość skanowania kontrolowanych elementów konstrukcyjnych oraz elementy podlegające kontroli. *Źródło: publikacja numer 6.*

Jak wspomniano, ze względu na awarię zaistniała konieczność zamontowania dodatkowych, sprężonych ściąągów stalowych. Moim zdaniem w zakresie naukowym to właśnie użycie skanera i wyniki uzyskane za jego pomocą stanowią o wartości tej pracy.

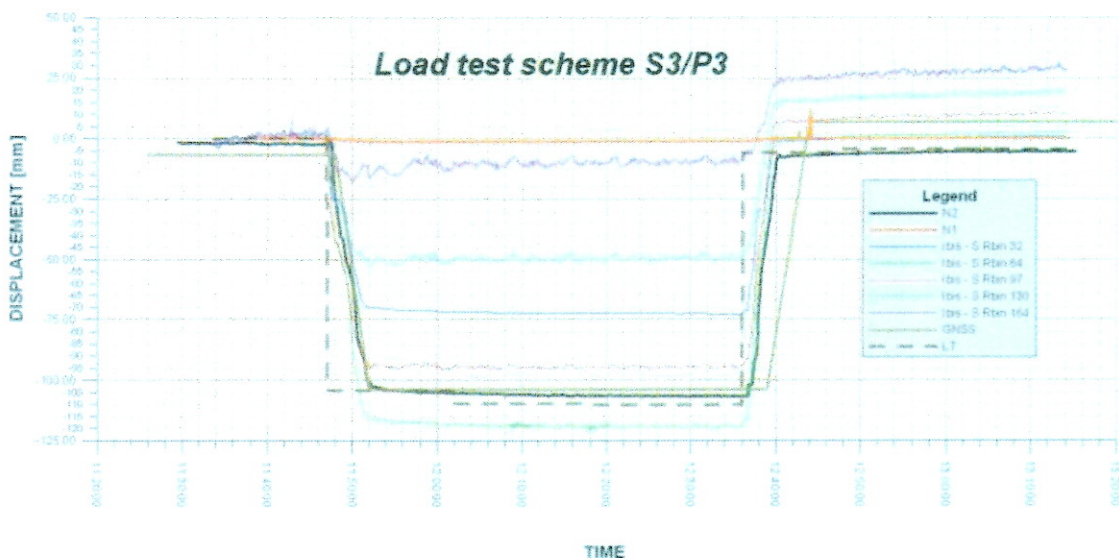
Połączone chmury punktów stanowią podstawę do oceny, czy następuje skręcenie poprzecznic (Rys. 8, (1A) and (1B)) oraz czy projektowane odległości pomiędzy elementami konstrukcyjnymi nie zmieniły się (Rys. 8, (2)). Rejestracja, czyli połączenie chmur punktów, pozwoliła na uzyskanie dokładności wzajemnego wpasowania tarcz wiążących na poziomie 1 mm. Dzięki zwiększonej rozdzielczości skanowania w rejonie badanej poprzecznicy (Rys. 8) możliwe było kontrolowane sprawdzenie wzajemnego położenia elementów konstrukcyjnych. Można to zademonstrować na przykładzie kontroli szerokości szczeliny dylatacyjnej po lewej stronie podłużnicy (Rys. 8, (1A)). W pomiarze pierwotnym wartość ta wynosiła 0.065 m, natomiast w pomiarze wtórnym 0.069 m. Po prawej stronie w pomiarze pierwotnym szerokość szczeliny wynosiła 0.040 m, natomiast w pomiarze wtórnym 0.036 m. W przeciwieństwie do lokalnych systemów monitoringu możliwa była jednoczesna kontrola skręcenia poprzecznicy (Rys. 8, (2)). W trakcie obciążenia konstrukcji nie wystąpiło jednak odkształcenie możliwe do zarejestrowania przy pomocy technologii skaningu laserowego. Pomiedzy pomiarem pierwotnym a wtórnym nie odnotowano również zmiany wzajemnych relacji geometrycznych ustroju nośnego (badane elementy pozostały w tych samych relacjach względem siebie).

W publikacji omawiane są również testy dynamiczne – w szczególności porównanie analizy widmowej z analizą modalną. W dalszej części autoreferatu odniosę się do pomiarów dynamicznych w sposób szczegółowy, dlatego w tym miejscu po dokładny opis odsyłam bezpośrednio do publikacji.

Podsumowując, w zagadnieniu numer jeden udowodniłem możliwość prowadzenia badań w oparciu o zaprojektowane systemy wizyjne oraz przeprowadziłem praktyczną weryfikację systemu radarowego. Wyczerpujące eksperymenty badawcze udowodniły możliwość stosowania systemu wizyjnego i radarowego jednocześnie w celu wzajemnej kontroli i uzupełniania zbioru wyników końcowych, stanowiących podstawę wnioskowania przy użyciu systemów monitoringu strukturalnego. Przedstawiłem, w jakim zakresie naziemny skaningu laserowy może być stosowany w badaniach obiektów mostowych.

4.2.2 Nowoczesne technologie pomiarowe – analiza i wdrożenie do badań obiektów inżynierskich pod obciążeniem próbnym oraz badaniach pod obciążeniem użytkowym, z uwzględnieniem obiektów mostowych różnego typu

Praktyczne zastosowanie nowej technologii do prac tak poważnych, jak badania obiektów mostowych, zawsze stanowi ciekawe wyzwanie inżynierskie. Rozwiązanie drugiego zagadnienia rozpocznę od omówienia publikacji pod tytułem „**Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry – case study**”. Publikacja omawia studium przypadku próbnego obciążenia mostu w ciągu obwodnicy miasta Zembrzyce. Badanym obiektem jest most podwieszony (wantowy), jednopylonowy, o sprężonej, belkowo-płytowej konstrukcji pomostu, podwieszonej za pomocą ciągów stalowych, ukształtowanych w formie wachlarza. Długość obiektu wynosi 244 metry. Rozpiętość przęsa nurtowego to aż 105 metrów. W trakcie badań zastosowano, a w konsekwencji porównano, kilka metod pomiarowych, w szczególności naziemną interferometrię radarową, system odbiorników satelitarnych GNSS, niwelację precyzyjną. W pierwszej części publikacji omówiono wyniki badań statycznych (Rys. 9).



Rys. 9 Wyniki przeprowadzonych badań statycznych. Źródło: publikacja numer 2.

Jak przedstawiono w publikacji, w schemacie numer jeden zostało obciążone przęsło pierwsze oraz trzecie, w schemacie numer dwa – drugie i czwarte, natomiast w schemacie numer trzy – jedynie najdłuższe przęsło nurtowe. Na Rys. 9 przedstawiono przykładowy wynik porównania metod pomiarowych w formie graficznej. Podczas prób statycznych stwierdzono:

- zgodności wyników uzyskanych radarem w określonym przedziale dokładności z innymi sprawdzonymi technologiami pomiarowymi,

- zwiększenie szumu pomiarowego dla punktów obserwowanych dalej od radaru,
a ściślej – cechujących się gorszą geometrią pomiarową.

Naziemna interferometria radarowa została porównana z innymi technikami również w zakresie wyników analizy widmowej uzyskiwanej na podstawie zarejestrowanych szeregów czasowych. Tabela 2 przedstawia porównanie wyników wyznaczonych wartości drgań własnych przęsła nurtowego na podstawie czujników indukcyjnych, radaru oraz analizy modalnej.

Numer postaci drgań	AM [Hz]	IBIS [Hz]	CI [Hz]
1	0.58	0.74	0.72
2	0.93	-	1.14
3	1.09	1.10	1.24
4	1.43	-	1.31
5	1.54	1.60	1.59
6	1.73	1.66	1.70
7	-	1.82	-
8	1.92	-	1.87
9	1.96	1.96	2.07
10	2.45	-	2.45
11	2.53	-	2.63
12	2.58	-	2.69
13	3.11	2.92	3.06
14	3.41	3.42	3.46
15	3.58	-	3.82

Tabela 2. Porównanie wyników wyznaczonych oraz obliczonych wartości drgań własnych. AM – analiza modalna, IBIS – system radarowy, CI – czujnik indukcyjny.

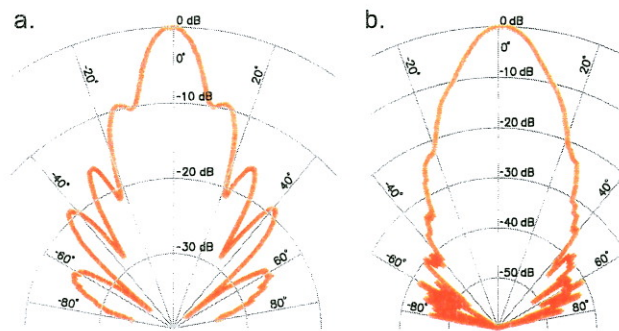
Źródło: publikacja numer 2.

W konsekwencji można zauważyć, że metoda radarowa daje dobre wyniki w zakresie badań statycznych i dynamicznych, jest szczególnie użyteczna dla przęseł nurtowych z uwagi na kryteria dostępu do konstrukcji. Szczególnie godne uwagi są wyniki pomiarów dynamicznych.

Jako kierownik badań w terenie i osoba opracowująca ich wyniki miałem przyjemność przedstawić rezultaty przyjętych rozwiązań na jednej z najistotniejszych konferencji dotyczących obiektów mostowych na świecie – IABMAS, w 2012 roku.

Druga z publikacji w tym zakresie jest zatytułowana „**Advantages of radar interferometry for assessment of dynamic deformation of bridge**”. Przedstawia zastosowanie naziemnej interferometrii radarowej do diagnostyki obiektu mostowego – wiaduktu kolejowego o kratownicowej konstrukcji stalowej. W omawianym przypadku doszło do uszkodzenia dźwigara, który następnie został naprawiony. Na badanym obiekcie drugi z dźwigarów podtrzymujących ten sam tok szynowy nie został uszkodzony. W omawianym przypadku technologia pomiarowa oraz jej wpływy na wynik diagnostyki ma istotne znaczenie. Publikacja kładzie nacisk również na technologiczne aspekty wykonywania obserwacji.

Z punktu widzenia technologii pomiarowej wykonywanie pomiarów radarem interferometrycznym o skokowej modulacji fali ciągłej wymaga uwzględnienia kilku czynników. Pierwszym z nich jest rodzaj anteny, która zostanie użyta podczas obserwacji. Można skorzystać z anten o budowie zapewniającej wąską charakterystykę zysku o dużej wartości lub antenę z szerokim zakresem zysku antenowego o mniejszej wartości stosunku sygnału do szumu w każdym z kierunków. Przykładowy rozkład zysku antenowego anteny, która była użyta w omawianych badaniach, przedstawia Rys. 10.



Rys. 10 Wykres zysku antenowego w płaszczyźnie poziomej i pionowej dla anteny użytej w teście. Źródło: publikacja numer 3.

Drugim ważnym elementem jest dobór właściwej częstotliwości próbkowania oraz rozdzielczości terenowej. Warto mieć na uwadze, co jest przedmiotem omawianej publikacji, że rozdzielczość terenowa, zasięg oraz możliwa do uzyskania częstotliwość próbkowania są wzajemnie powiązane.

Trzecim czynnikiem, o którym już wspomniałem w rozdziale 4.2.1, jest uwzględnienie faktu, że pomiarowi radarowemu podlega zmiana odległości między radarem a punktem pomiarowym, określanym jako range bin (Rbin). O ile jednostka radarowa nie jest ustawiona bezpośrednio pod przęstem, to na przykład interesujące nas pionowe drgania pomostu są efektem przemnożenia wyniku pomiaru bezpośredniego przez współczynnik projekcji, to jest stosunek odległości przestrzennej od radaru do wysokości punktu mierzonego (por. Fig 4 w publikacji numer 3).

Jak pokazano w publikacji, czujniki indukcyjne oraz pomiar radarowy dały zbieżne wyniki, w szczególności w punktach, dla których współczynnik projekcji był korzystny, a przyjmował on wartości w dosyć dużej rozpiętości: od 2.60 dla Rbin28 do 4.62 dla Rbin49. Dla zarejestrowanych szeregów czasowych obliczono gęstość widmową mocy PSD (ang. Power Spectral Density). Umożliwiło to porównanie widm uzyskanych czujnikami oraz radarem. Zgodność analizy widmowej została przedstawiona w tabeli 3.

Metoda	Radar interferometryczny		Czujnik indukcyjny	
Punkt pomiarowy (położenie)	1/3	1/2	1/3	1/2
Częstotliwość	1.875 Hz	1.875 Hz	1.821 Hz	1.839 Hz

Tabela 3. Porównanie wyników analizy widmowej dla obu metod. *Źródło: publikacja numer 3.*

Ten eksperyment badawczy pomógł sformułować następujące wnioski. Po pierwsze, metoda pomiaru z użyciem radaru interferometrycznego może być wykorzystywana do badania konstrukcji stalowych, mimo że są one nieprzyjazne z punktu widzenia pomiarów radarowych (wiele elementów ujawnia się na profilu radarowym, co utrudnia ich interpretację). Po drugie, potwierdzono zgodność wyników w stosunku do dobrze sprawdzonej metody czujników indukcyjnych. Po trzecie, w publikacji zwrócono uwagę na konieczność możliwie poprawnej rejestracji geometrii pomiaru i jej uwzględniania w wynikach pomiarów. Mój wkład w omawianą publikację polegał na analizie danych oraz obliczeniach. Nie uczestniczyłem w pomiarach terenowych.

Publikacja pod tytułem „**Variations of frequency response of a cable-stayed bridge and calculation of the damping coefficient of selected vibration modes based on the data recorded with radar systems**” ma charakter analityczny i obliczeniowy. Opiera się na danych pomiarowych uzyskanych podczas badania pod obciążeniem próbnym mostu wantowego w Zembrzycach.

Efektom prac obliczeniowych jest pokazanie zróżnicowania odpowiedzi częstotliwościowej dla badanego obiektu mostowego. Obszerna analiza obejmowała cztery punkty pomiarowe, odpowiadające belkom poprzecznym najdłuższego przęsła. Punkty te znajdowały się w odległości 11, 26.5, 42.5 oraz 59 metrów od jednostki radarowej (w profilu radarowym oraz tabeli odpowiadają im punkty pomiarowe – Rbin numer 22, 53, 85 i 118). Obciążenia dynamiczne realizowane były przez przejazdy ciężarówek, hamowanie oraz skok. Analizy prowadziłem w taki sposób, aby skupić się na pierwszych ośmiu postaciach drgań. Uzyskane przeze mnie wyniki obejmują tylko te wartości częstotliwości, które były możliwe do wykrycia w danym szeregu czasowym reprezentującym drgania swobodne (tabela 4).

Obciążenie				Wykryta częstotliwość [Hz]							
	Kier	Przejazd	Rbi	1	2	3	4	5	6	7	8
50 [km/h]	W	2	22	0.7	1.8	2.9					
	E		22		1.8	2.8	3.4				
	W		53	0.7	1.8	2.9					
	E		53		1.8	2.8	3.4				
	W		85	0.7	1.6	2.9					
	E		85				3.3				
	W		118	0.7	1.1	1.6	1.9	2.90			
	E		118		1.7	2.8	3.0				
	W		154	0.7	1.7	2.0	2.9				
	E		154	0.9		2.2	2.8				
70 [km/h]	W	1 (po prawej)	22	0.7	1.8	2.9	3.2				
	E		53	0.7			3.3				
	W		53	0.7			3.3				
	E		85	0.7							
	W		85	0.7							
	E		118	0.7		2.9					
	W		118	0.7							
	E		154								
hamowanie	E	1	22	0.7							
	W		22	0.7	1.8	2.9					
	E		22	0.7	1.6	1.8					
	E		53	0.7		1.9		3.32			
	W		53	0.7	1.8	3.3	6.6	10.0	13.3	16.6	20.0
	E		53	0.7	1.1	1.6	3.3	6.68			
	E		85	0.7					4.84		
	W		85	0.7		1.9					
	E		85	0.7	1.1	1.4	1.8		4.83		
	E		118	0.7	1.6						
	W		118	0.7	1.1	1.8					
	E		118	0.7	1.2	1.6	1.8	2.82	3.73		
	E		154				2.1	3.42			
	W		154	0.7	1.1	1.7	2.2				

Tabela 4. Zróżnicowanie częstotliwościowe odpowiedzi konstrukcji mostowej na różne typy wymuszeń. Podzbiór danych przedstawionych w publikacji źródłowej. Źródło: publikacja numer 4.

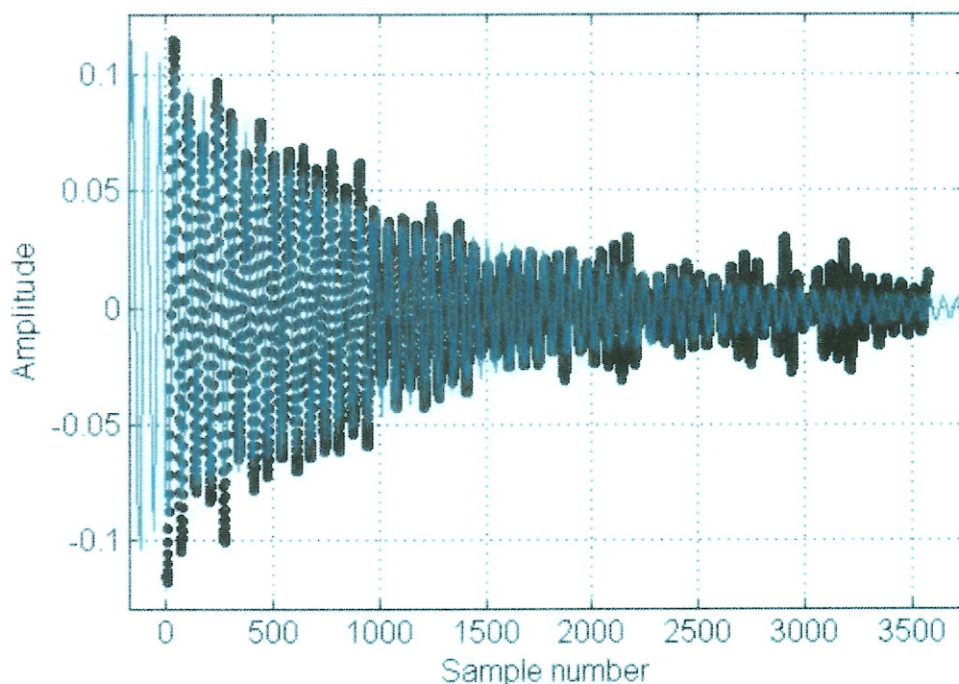
Warto zauważyć, że teoretycznie jeżeli tylko punkt pomiarowy (Rbin) nie wypada w węźle jednej z postaci drgań, to we wszystkich szeregach czasowych powinna być możliwa do wykrycia każda z czternastu postaci zidentyfikowanych w analizie modalnej. W konsekwencji przeanalizowano 776 szeregów czasowych, z których tylko 176 dawało podstawy do rzetelnego wnioskowania o postaciach drgań.

Całość analizy pozwoliła na uzyskanie trzech konstruktywnych wniosków. Po pierwsze, istnieje liczna grupa szeregów czasowych, która nie pozwoliła na wykrycie jakiegokolwiek częstotliwości. Niektóre wzbudzenia za pomocą ciężarówek nie wywołały wystarczającej odpowiedzi konstrukcji. Drugim ważnym wnioskiem jest fakt, że żaden z szeregów czasowych nie pozwolił na zarejestrowanie wszystkich postaci drgań przewidzianych teoretycznie. Po trzecie, czego należało się spodziewać, obliczone teoretycznie postacie drgań nie pokrywają się ściśle z tymi, które wynikały z przeprowadzonych badań. Powodem takiej sytuacji jest między innymi fakt, że model matematyczny użyty do analizy modalnej jest jedynie pewnym przybliżeniem rzeczywistej konstrukcji.

Po przejeździe każdego z samochodów ciężarowych most drgał swobodnie aż do pełnego wytłumienia. Oznacza to, że ruch wybranego punktu pomostu może być w dużym przybliżeniu opisany równaniem oscylatora tłumionego danego wzorem (5):

$$x(t) = A * e^{-\beta t} * \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

gdzie A to amplituda, β to współczynnik tłumienia, ω to częstość drgań, θ to przesunięcie fazy. Naturalnie wzór (5) opisuje przypadek idealny. W praktyce przykładowy szereg czasowy, poddany procesie filtrowania pasmoprzepustowego przyjmuje pewną postać ze względu na ograniczoną dokładność pomiaru oraz występujące szumy. Do oszacowania współczynnika β , a w konsekwencji wyznaczenia logarytmicznego dekrementu tłumienia dla danej postaci drgań, użyto w omawianej publikacji regresji nieliniowej metodą najmniejszych kwadratów (Rys. 11).



Rys. 11 Aproksymacja szeregu czasowego drgań tłumionych w domenie czasu. Źródło: publikacja numer 4.

W efekcie analiz w omawianej publikacji uzyskano informacje o ilości danych niezbędnych do wyznaczenia kompletu postaci drgań w warunkach rzeczywistych. Pozwala to poprawnie planować eksperymenty na podobnych obiektach, mając na uwadze miejsce i rodzaj sensorów pomiarowych, jakie planuje się stosować.

Ponadto przedstawiono propozycję estymacji parametrów tłumienia dla wybranych postaci drgań wraz z ich oceną dokładnościową. Jest to jeden dwóch sposobów, prezentowanych w omawianym cyklu publikacji, który może być używany w celu wyznaczenia logarytmicznego dekrementu tłumienia.

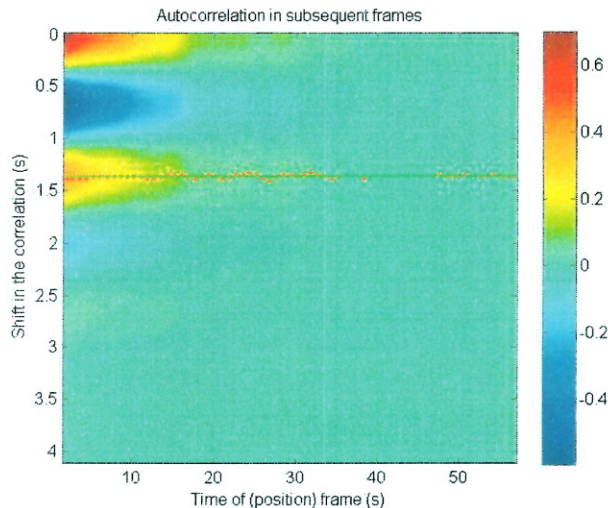
Zagadnienie numer dwa podsumowuje ważna moim zdaniem publikacja pod tytułem „***Application of ground-based radar interferometry technique to bridge load testing***”. Stanowi ona zestawienie doświadczeń, jakie zdobyłem kierując pracami realizowanymi na dużych obiektach mostowych podczas badań pod obciążeniami próbnymi. Miałem wtedy możliwość współpracy między innymi z laboratoriami akredytowanymi Aspekt z Jaworzna oraz CADmost z Gliwic. Publikacja powstała na bazie wdrożeń – opracowania numer 15, 16, 17 i 19.

W pracy zostały omówione doświadczenia na dwóch obiektach mostowych z przęsłami nurtowymi o konstrukcji wantowej oraz doświadczenia na dwóch mostach kablobetonowych (mostach sprężonych), jednym o konstrukcji typu extradosed, drugim o konstrukcji belkowej.

Pierwszy z obiektów mostowych został już przedstawiony przy okazji omawiania publikacji numer 2 – jest to most wantungowy o sprężonej, belkowo-płytkowej konstrukcji pomostu. Skupię się więc na wynikach przedstawionych w pracy.

Charakterystyczne w tego typu pomostach spore poprzecznic dają bardzo dobre odbicie fali radarowej, ujawniając się bardzo jednoznacznie na profilu radarowym – stosunek sygnału do szumu pozwala je jednoznacznie identyfikować. Nie zachodzi również niebezpieczeństwo nałożenia informacji pomiarowej z dwóch poprzecznic do jednego szeregu czasowego, ponieważ rozdzielczość terenowa była znacząco mniejsza co do wartości niż odległość między belkami. Podczas opracowania danych należy mieć na uwadze, że w scenie pomiarowej obecne są również, ułożone w formie wachlarza, wanty, co może skutkować obecnością ich składowych drgań własnych w analizie modalnej. Pierwszym praktycznym wnioskiem jest stwierdzenie, że nawet stosowanie anten o stosunkowo wąskim profilu radarowym może być niewystarczające do uniknięcia takiej sytuacji. Wobec tego należy eliminować nakładające się składowe drgań na etapie opracowania danych.

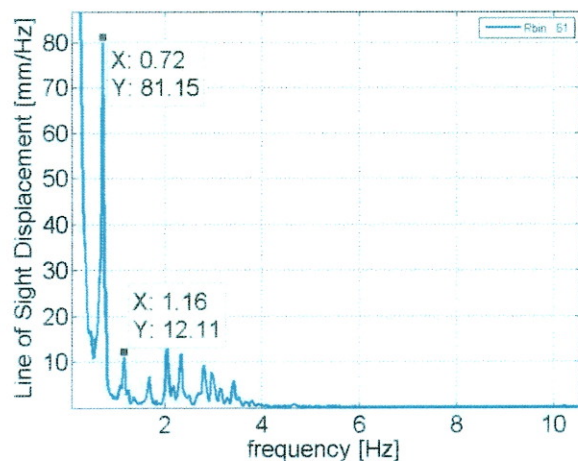
Sygnały zarejestrowane podczas eksperymentu mają dwie cechy: stosunkowo małą amplitudę oraz duże zaszumienie. Poprawna analiza cech dynamicznych konstrukcji jest możliwa, o ile sygnał zostanie poprawnie przefiltrowany. Na Rys. 12 przedstawiono analizę autokorelacyjną sygnału dowodzącą stabilności odpowiedzi częstotliwościowej przęsła nurtowego dla pierwszej postaci modalnej.



Rys. 12 Graficzna reprezentacja analizy autokorelacyjnej. Źródło: publikacja numer 8.

Jak pokazano w publikacji, amplituda drgań swobodnych jest znacząco mniejsza niż jeden milimetr, a więc zastosowanie radaru daje możliwość, ze względu na dokładność, poprawnej analizy danych. Obliczenia cech konstrukcyjnych muszą być odpowiednio odfiltrowane, gdyż drgania nie mają tak klarownej postaci, jak na przykład w konstrukcjach stalowych. Ponadto technologia radarowa pozwala na jednoczesną rejestrację zachowania wszystkich poprzecznic w reakcji na zadane obciążenie dynamiczne. W konsekwencji w jednolitym układzie czasu można rejestrować zachowanie całego przęsła oraz ustroju wantungowego.

Drugi z omawianych obiektów to most podwieszony „M-2” przez Brdę, w Bydgoszczy. Jest to obiekt podwieszony stalowy, zespolony z betonową płytą pomostową o długości 200 m. Badano przęsło nurtowe (główne). W związku z charakterem przeszkody, w miejscu przewidywanego największego ugięcia konstrukcji nośnej nie ma możliwości zastosowania tradycyjnej aparatury do pomiarów dynamicznych (Rys. 13). Przewidywane przemieszczenia pionowe od obciążenia przejeżdżającym w trakcie próby samochodem 32-tonowym wyniosły od ok. 1 do ok. 2 cm.



Rys. 13 Most na Brdzie (po lewej) z przykładem analizy widmowej (po prawej). Źródło: publikacja numer 8.

Wyczerpujący zbiór wyników zawarty jest w opracowaniu numer 17 „*Raport z pomiarów drgań przęsła mostu nurtowego podwieszono M-2 nad Brdą w Bydgoszczy w ciągu ul. Ogińskiego, wykonanych metodą interferometrii radarowej*”. Ze względu na objętość opracowania warto podkreślić dwa istotne wnioski, wynikające z przeprowadzonych obliczeń: występujące w niektórych zakresach częstotliwości dudnienia oraz długi w stosunku do innych konstrukcji okres tłumienia. Z punktu widzenia zastosowania interferometrii radarowej oraz analizy sygnałów pomiarowych warto zaznaczyć następujące wnioski dla tego typu konstrukcji:

- a) Bardzo dobry profil radarowy.
- b) Duża amplituda drgań wywołanych przejazdem wzbudzającym.
- c) Bardzo wyraźne drgania dynamiczne, możliwość występowania dudnień.
- d) Równomierne próbkowanie konstrukcji za pomocą radaru umożliwia obliczenia analizy widmowej klasycznymi algorytmami (FFT). Ponadto częstotliwość próbkowania jest na tyle wysoka, że nie występuje obawa o pojawienie się powielenia widmowego w analizowanym zakresie częstotliwości.

Trzecim z analizowanych obiektów jest most przez Wisłę w Kwidzynie w ciągu drogi krajowej numer 90. Szczegółowy raport pomiarowy z wyczerpującą analizą znajduje się w opracowaniu numer 15 „*Raport z pomiarów próbnego obciążenia mostu M-4 nad rzeką Wisłą koło Kwidzyna w ciągu drogi krajowej nr 90, wykonanych metodą interferometrii radarowej*”. Warto zaznaczyć, że w chwili badania most ten był jednym

z najdłuższych tego typu obiektów w Europie. Technologia extradosed łączy zalety mostu podwieszono-belkowego, sprężonego. Część kabli sprężających jest poprowadzona wewnątrz dźwigara, a pozostałe montowane są w układzie harfowym na specjalnych dewiatorach (Rys. 14).



Rys. 14 Jedno z przęseł nurtowych mostu w Kwidzynie. Kable sprężające poprowadzone poza przekrojem dźwigara przypominają ustrój wantowy. Źródło: publikacja numer 8.

W moich badaniach prowadziłem pomiary przęseł o rozpiętości od 130 do 204 metrów. Charakter konstrukcji powoduje, że należy się spodziewać znacznych ugięć zarówno w schematach obciążeń statycznych, jak i dynamicznych. Tabela 5 przedstawia przykładowe, zarejestrowane ugięcia podczas badań dynamicznych.

Kierunek jazdy	Prędkości				
	10 km/h	30 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h
W stronę miejscowości Kopytkowo	11.84 mm	10.63 mm	10.56 mm	10.74 mm	4.68 mm
W stronę miejscowości Kwidzyn	11.86 mm	11.79 mm	11.66 mm	11.84 mm	6.40 mm

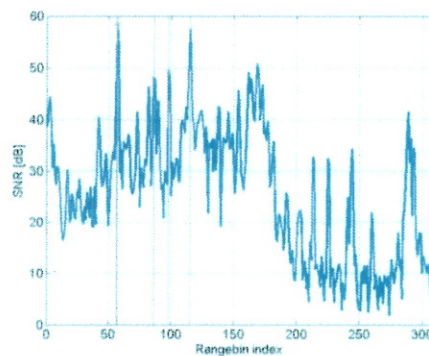
Tabela 5. Przykłady ugięć przęsła. Źródło: publikacja numer 8.

Dla efektywności i poprawności badań obiektów o podobnej konstrukcji istotne jest podkreślenie kilku wniosków:

- a) Bardzo dobry, jednoznaczny profil radarowy. Identyfikacja poszczególnych belek poprzecznych oraz want i pylonów nie stanowi dużego problemu.
- b) Amplituda drgań wywołanych przejazdem wzbudającym jest znacząca, ugięcie statyczne bardzo duże.
- c) Wyraźne drgania dynamiczne, możliwość występowania dudnień.

d) Występujące drgania cechuje mała amplituda (mimo iż są wyraźne). W szczególnych przypadkach są to wartości na poziomie czułości radaru.

Ostatnim doświadczeniem, które przedstawiłem w omawianej publikacji są wyniki badań przeprowadzonych na moście kablobetonowym. Badania dotyczyły najdłuższego przęsła belkowego w Polsce. Most przez Wisłę w Grudziądzu w ciągu autostrady A1 jest rekordowy z kilku powodów. Całkowita długość w osi skrajnych podpór przekracza 1950 metrów. Badane rekordowe przęsło nurtowe ma rozpiętość 180 metrów i jest najdłuższym tego typu przęsłem mostowym w Polsce (Rys. 15). Przy okazji warto dodać, że estakada dojazdowa o długości blisko 1 kilometra jest najdłuższą konstrukcją w Polsce zrealizowaną w technologii nasuwania podłużnego. Wyczerpujący raport pomiarowy wraz z analizą wyników znajduje się w dokumencie „Raport z wykonania pomiarów pod próbnym obciążeniem dynamicznym mostu przez Wisłę MA-91 w Grudziądzu metodą interferometrii radarowej”.



Rys. 15 Przęsło nurtowe mostu w Grudziądzu oraz jego profil radarowy. Źródło: publikacja numer 8.

Ponownie zwrócę uwagę na wnioski dotyczące radarowej technologii pomiarowej. Na takim obiekcie, w przeciwieństwie do wcześniej opisywanych, profil radarowy nie jest łatwy do analizy. Aby wykonać pomiary poprawnie, niezbędne jest umieszczenie na obiekcie reflektorów pomiarowych, ponieważ konstrukcja nie zapewnia jednoznacznego profilu radarowego. Ich ujawnienie się w profilu umożliwia analizę wyników. Z punktu widzenia interferometrii radarowej duże, ciężkie przęsła żelbetowe cechuje:

- a) Konieczność sygnalizacji reflektorami (nie występują belki poprzeczne ułatwiające interpretację sygnału radarowego).
- b) Ugięcie przęsła rzędu kilku mm (w omawianych badaniach nie przekroczyło 7 mm).
- c) Możliwość występowania tłumienia krytycznego konstrukcji, które znacząco utrudnia analizę zachowania dynamicznego.

Każda z prezentowanych konstrukcji mostowych charakteryzuje się innymi cechami z punktu widzenia mechaniki konstrukcji, co w naturalny sposób przenosi się na rodzaj i wartość materiału pomiarowego, możliwego do uzyskania techniką radarową. Szerokie opracowanie wyników wraz z analizami i materiałem pomiarowym znajduje się w powoływanych raportach.

Moje doświadczenia w testowaniu konstrukcji nie obejmują jedynie obiektów mostowych. Uzupelniam je badaniami związanymi z ciekawą, prototypową konstrukcją teleskopu. Pomiarowy i analityczny materiał źródłowy stanowi opracowanie pt. **„Raport pomiarowy z geodezyjnej kontroli konstrukcji teleskopu do obserwacji kosmicznego promieniowania gamma najwyższych energii IFJ PAN”**, którego byłem kierownikiem. Wyniki tych badań prezentowałem na konferencji FIG – Joint International Symposium on Deformation Monitoring 2016 w Wiedniu. Ponadto wyniki pomiarów i analiz były prezentowane przez naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk na konferencji International Cosmic Ray Conference (sierpień 2015, Haga, Holandia). W szczególności pragnę zwrócić uwagę na zastosowanie transformacji przestrzennych do wyznaczenia i analizy deformacji masztu prototypu teleskopu w zależności od kąta elewacji oraz azymutu obserwacji. Badania przedstawione w publikacjach konferencyjnych oraz powoływanym raporcie pomiarowym obejmują również analizy zachowania dynamicznego masztu oraz pomiar stałości bloku fundamentowego.

Ostatnim z przykładów praktycznych wdrożeń interferometrii radarowej do analizy zachowania obiektów stanowi praca zrealizowana podczas badań estakad tramwajowych w Krakowie. Opracowanie wyników eksperymentu badawczego pod tytułem **„Analiza wyników badania przemieszczeń przęseł estakady głównej podczas obciążeń statycznych dla estakady głównej i podwieszanej w ciągu linii i tramwajowej KST w Krakowie”** obejmuje wyznaczenie ugięć przęsła metodą interferometrii radarowej oraz za pomocą tachimetrów elektronicznych, jak również monitoring wychylenia górnej części pylonu podczas badania pod obciążeniem. Jest to jedyne z przedstawionych opracowań, w którym technologia radarowa została wykorzystana tylko do badań statycznych. W szczególności zawarte w niej obliczenia potwierdzają wyniki uzyskane uprzednio dla mostu w Zembrzycach. Pozwalają na sformułowanie tezy, że naziemna interferometria radarowa może być użyta do obserwacji przemieszczeń statycznych. Warto tu podkreślić, że poprawność wyników jest uwarunkowana między innymi przeprowadzeniem adekwatnych redukcji atmosferycznych (a nie tylko geometrycznych). Przykład takiej redukcji został przedstawiony w publikacji numer 7.

W omówionych działaniach pełniłem rolę kierownika, aktywnie uczestniczyłem w całości prac pomiarowych i obliczeniowych. Wyjątek stanowi ostatni przykład, gdzie byłem zaangażowany wyłącznie w prace obliczeniowe.

Podsumowując, w zagadnieniu numer dwa omówiłem, bazując na pierwszych w Polsce i jednych z pierwszych w Europie wynikach uzyskanych podczas badań odbiorczych, możliwości zastosowania naziemnej interferometrii radarowej do badań obiektów mostowych. Wnioski przedstawiłem na podstawie prac zrealizowanych na różnych typach konstrukcji mostowych. Przedstawiłem sposoby wykonywania obliczeń oraz porównanie z innymi technologiami pomiarowymi.

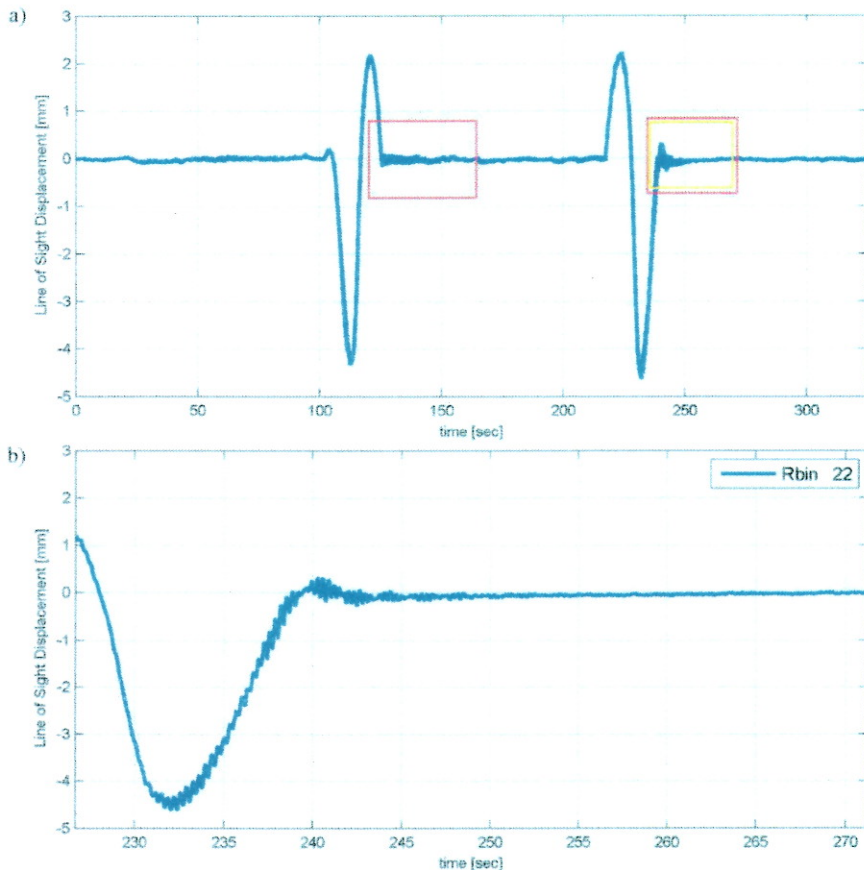
4.2.3 Algorytmy obliczeniowe i ich optymalizacja do analizy danych reprezentujących dynamiczne zachowanie obiektu

Doświadczenia związane z cyfrowym przetwarzaniem sygnału radarowego, a więc obliczeniami, które stanowią podstawę o wnioskowaniu na temat stanu konstrukcji mostowych, przedstawię na podstawie monografii pod tytułem „**Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar**”, w szczególności biorąc pod uwagę rozdział 7, oraz na podstawie publikacji pod tytułem „**Beat frequency detection of bridges using ground-based radar interferometry**”.

Pierwszym bardzo ważnym etapem jest ustalenie adekwatnej do potrzeb częstotliwości próbkowania. Należy mieć na uwadze, że zarejestrowany szereg czasowy jest dyskretny w czasie i amplitudzie (cyfrowy), a reprezentuje obraz rzeczywistego (analogowego) układu drgającego, ciągłego w czasie i amplitudzie. Aby poprawnie wnioskować, należy mieć na uwadze twierdzenie Kotelnikowa-Shannona.

Radary interferometryczne dają możliwość próbkowania dochodzącą do 200 Hz. Wynika stąd, że z powodzeniem możemy wnioskować o postaciach drgań, które mogą być niebezpieczne dla konstrukcji. W większości przypadków będą to częstotliwości nie przekraczające 25 Hz – ten przedział jest dla obiektów mostowych najbardziej interesujący, jeżeli celem eksperymentu jest przedstawienie globalnych cech konstrukcji. W tym zakresie pojawia się możliwość wystąpienia wzbudzenia obiektu mostowego przez czynniki naturalne i antropogeniczne, które mogą pokryć się z którąś z postaci drgań własnych. Badania, jakie przedstawiłem w monografii, opierały się, w zakresie obiektów nowych, o prace wykonane na opisywanym już wcześniej, w publikacji numer 2, moście w Zembrzycach. Radar próbował sygnał pomiarowy reprezentujący konstrukcję z częstotliwością 48.97 Hz. Ponadto obliczenia wykazały, że efektywne odchylenie standardowe okresu próbkowania wynosiło około $3 \cdot 10^{-4}$ ms (względnie jest to około 0.001%).

W konsekwencji udowodniłem, że można korzystać z algorytmów, które zakładają próbkowanie równomierne takie, jak algorytm szybkiej transformaty Fouriera. Dodatkowo w wyniku eksperymentu wykazałem, że parametry pomiarowe (rozdzielczość terenowa, częstotliwość pomiarowa oraz długości szeregów czasowych reprezentujących drgania) muszą uwzględniać odpowiednią rozdzielczość widmową wyniku.

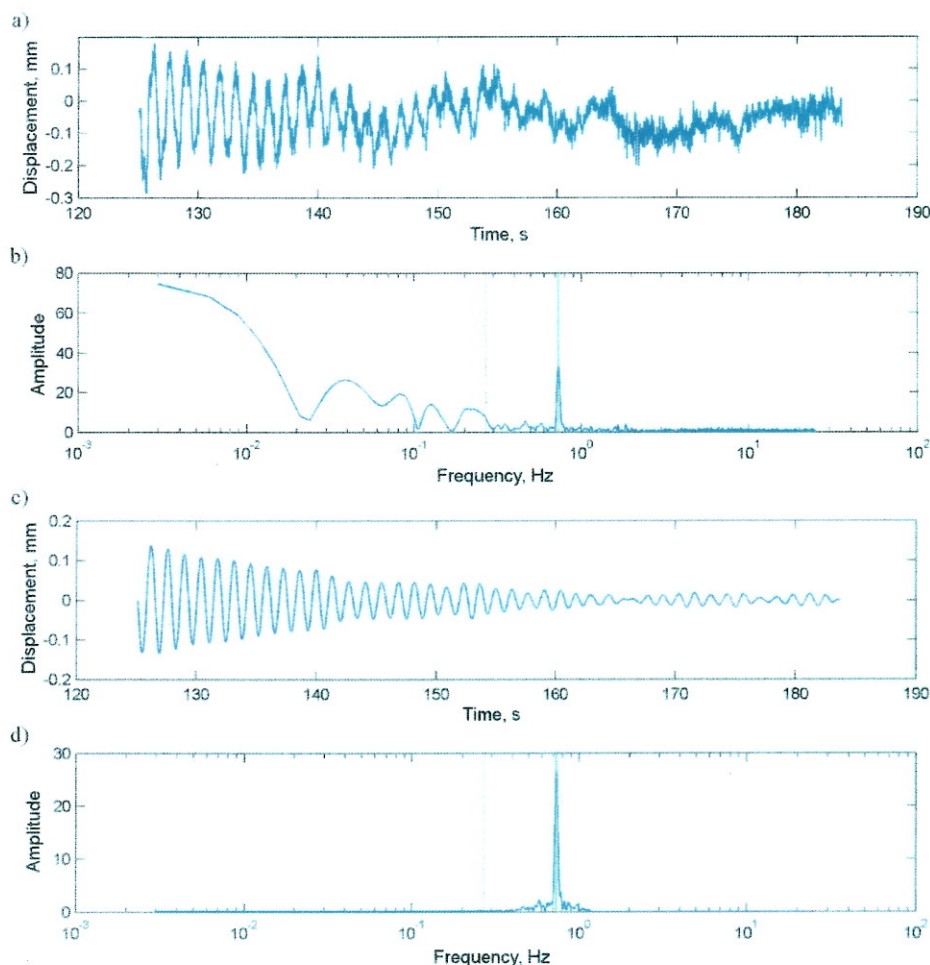


Rys. 16 Drgania belki poprzecznej przęsła nurtowego i jej tłumienie: a) dla dwóch najazdów z przeciwnych stron, b) widoczny efekt dudnienia na powiększonym fragmencie. Źródło: publikacja numer 7.

Przeprowadzone doświadczenia dowodzą, iż w zależności od konstrukcji stosunek wartości ugięcia pomostu do amplitudy drgań własnych może być różny. Na Rys. 16a widać reakcję pomostu mostu w Zembrzycach na najazd samochodów ciężarowych. Amplituda ugięcia wynosi kilka milimetrów, jednak dla potrzeb analizy widmowej istotna jest amplituda drgań. Czerwoną ramką oznaczono te fragmenty danych, które reprezentują drgania swobodne, a więc dane stanowiące podstawę do analizy drgań własnych konstrukcji. Na rysunku poniżej (Rys. 16b) widać efekt tłumienia konstrukcyjnego oraz dudnienia dwóch bliskich częstotliwości. To właśnie dla możliwości identyfikacji częstotliwości dudniących konieczna jest wystarczająca rozdzielczość pomiarowa w domenie częstotliwości. Szersze omówienie problemu identyfikacji częstotliwości dudniących obiektów mostowych przedstawiłem w publikacji numer 9. Zawiera ona przykłady dotyczące badań pod obciążeniami próbnymi oraz użytkowymi.

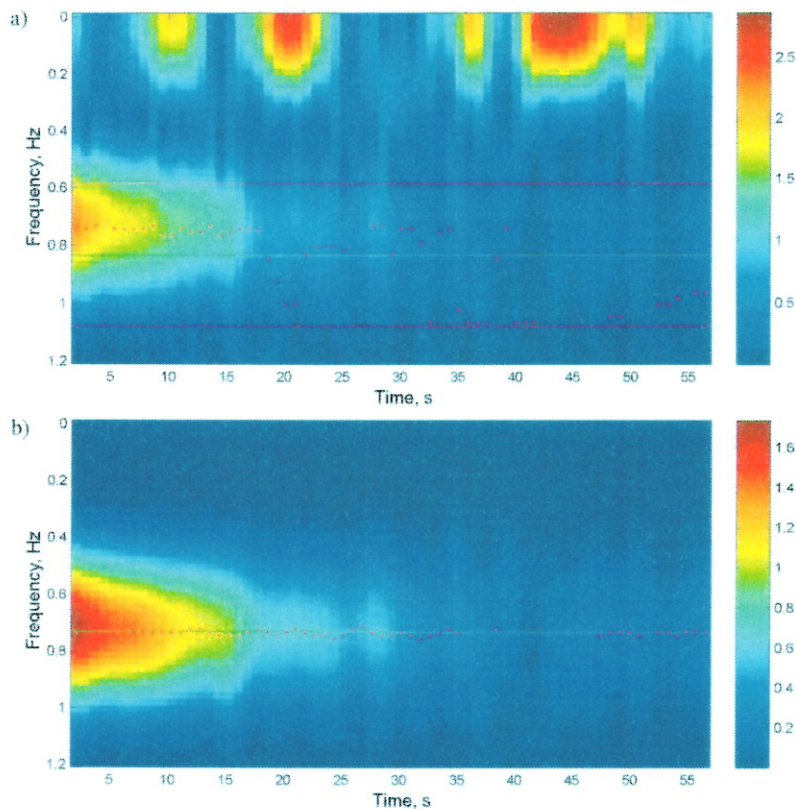
Ze względu na typ konstrukcji mostu w Zembrzycach nie należy oczekiwać klarownego sygnału pomiarowego (Rys. 17). Dodatkowo amplituda drgań jest niewielka (Rys. 17a oraz Rys. 17c). Jak pokazałem we wcześniejszych pracach, aby poprawnie analizować zachowanie konstrukcji konieczne jest poprawne filtrowanie

sygnału cyfrowego. Konstrukcja takiego filtra może odbywać się w sposób przedstawiony na Rys. 17b.



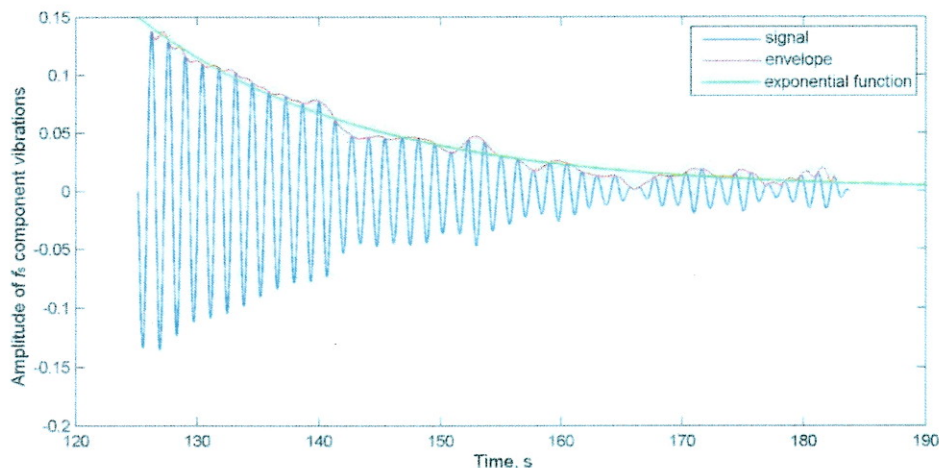
Rys. 17 Przetwarzanie sygnału pomiarowego wraz z analizą widmową w zakresie pierwszej postaci giętej: a) wynik pomiaru, b) widmo wyniku pomiaru, c) sygnał poddany filtracji górnoprzepustowej, d) widmo sygnału przefiltrowanego. Źródło: publikacja numer 7.

Badania pozwoliły również na określenie stałości odpowiedzi częstotliwościowej w czasie drgań swobodnych. Zadanie to zostało wykonane przy użyciu spektrogramu. Odpowiedź konstrukcji została podzielona na ramki danych o długości około 4.1 s i wzajemnym pokryciu rzędu 80%. Dla każdej z ramek wykonano analizę widmową (Rys. 18).



Rys. 18. Spektrogram dolnopasmowy sygnału pomiarowego częstotliwości odpowiadającej pierwszej postaci drgań mostu wraz z szerokością przedziału ufności wyznaczonej odpowiedzi częstotliwościowej: a) przed filtracją, b) po filtracji. Przedział ufności na rysunku (b) jest tak wąski, że praktycznie nie jest widoczny. Skala koloru jest proporcjonalna do rejestrowanej amplitudy. Źródło: publikacja numer 7.

W momencie, gdy stabilność odpowiedzi jest udowodniona obliczeniowo (Rys. 14b), można przystąpić do obliczeń mających na celu wyznaczenie prędkości tłumienia dla danej częstotliwości. W omawianej publikacji zastosowałem sposób estymowania dekrementu tłumienia na podstawie transformaty Hilberta (Shin i Hammond, 2008). Nie jest mi znane wcześniejsze zastosowanie takiego podejścia do analizy drgań obiektów mostowych. Dzięki temu obliczenia opierają się na całym zbiorze danych reprezentujących drganie swobodne. Dodatkowo, w przeciwieństwie do obliczeń realizowanych wprost z definicji, ten sposób nie opiera się na arbitralnie wybranych wartościach amplitudy. Do estymacji parametru tłumienia może być użyta dowolna funkcja celu, niekoniecznie arbitralnie metoda najmniejszych kwadratów, w szczególności może to być funkcja odporna na błędy. Ten sposób umożliwia również oszacowanie tłumienia, nawet jeżeli w szeregu czasowym występują częstotliwości dudniące (Rys. 19).



Rys. 19 Estymacja parametrów tłumienia. Sygnał pomiarowy na niebiesko, transformata Hilberta na czerwono oraz wpasowana funkcja wykładnicza (por. wzór 5) na zielono. Źródło: publikacja numer 7.

Dzięki zastosowaniu technik cyfrowego przetwarzania sygnałów wnioskowanie dotyczące obiektów mostowych jest znacznie efektywniejsze. Moim zdaniem geodezja inżynierska jako dyscyplina naukowa powinna w znacznie szerszym stopniu integrować i rozwijać algorytmy SHM z nowoczesnymi technologiami pomiarowymi oraz systemami monitoringu. Użycie do pomiarów radaru i zastosowanie adekwatnych metod obliczeń oraz wyznaczanie parametrów w sposób, który zaproponowałem, wydatnie zwiększa ilość i jakość informacji o badanym obiekcie w stosunku do metod obecnie powszechnie używanych. Aby jednak takie działanie umożliwić, pomiary i obliczenia muszą być dobrze i metodycznie zrealizowane.

W zagadnieniu numer trzy omówiłem opracowany sposób wykonywania obliczeń i analizy danych pozwalający na jak najefektywniejsze wykorzystanie materiału pomiarowego gromadzonego podczas badań obiektów inżynierskich. Przetworiłem również efektywność moich eksperymentów oraz zakres zgodności z analizami teoretycznymi.

4.2.4 Rozszerzenie możliwości technologii geodezyjnych na badania dynamiczne poprzez rozwój oprogramowania oraz algorytmów pomiarowych wraz z przedstawieniem rozwiązań konstrukcyjnych ułatwiających integrację danych pozyskiwanych różnymi technologiami pomiarowymi

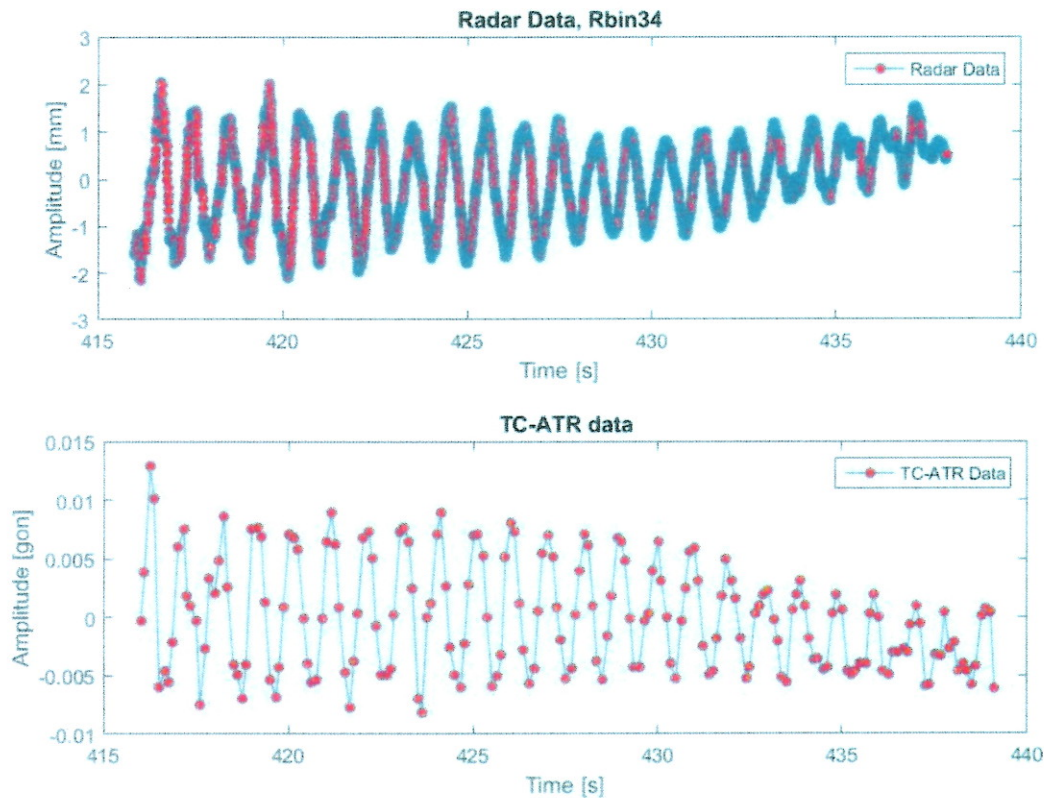
Jak wykazałem, naziemna interferometria radarowa może być z powodzeniem stosowana do badań obiektów mostowych. Równomierne próbkowanie w czasie, pomiar wielu punktów jednocześnie, jak również teledetekcyjny charakter pracy znacząco ułatwiają pozyskanie informacji stanowiących podstawę do określenia charakterystyki dynamicznej obiektu mostowego. Jednak, jak każda inna, ta technologia pomiarowa ma swoje cechy, które ograniczają jej zastosowanie. Jednowymiarowy charakter pracy jednostki radarowej powoduje, że jeżeli mamy do czynienia z obiektem o niezbyt korzystnej geometrii, wyniki mogą być dalekie od optymalnych. Zostało to pokazane między innymi w publikacji numer 7.

W publikacji pod tytułem „*Eliminating the problem of one-dimensionality of radar interferometry techniques for long-span slender bridge structures*” przedstawiłem rozszerzenie możliwości pomiarowych współczesnych tachymetrów elektronicznych, które z powodzeniem mogą być wykorzystane do eliminacji problemu jednowymiarowości radarów interferometrycznych. Omawiane zagadnienie obejmuje również rozwiązanie, dla którego uzyskałem, wraz ze współautorami, prawo ochronne Urzędu Patentowego RP „*Reflektor do pomiaru przemieszczeń i odkształceń*” (UP RP W.122987). Istota rozwiązania polega na współosiowym umieszczeniu reflektora do pomiarów dalmierzami elektrooptycznymi EDM, w tym na śledzeniu opartym na systemach typu Power Search, oraz reflektora radarowego. Dzięki temu oba urządzenia wykonują pomiar do dokładnie tego samego punktu.

Przykład implementacji systemu został wykonany dla tachymetru, który próbował śledzony sygnał – zmiany wartości kąta pionowego z częstotliwością 10 Hz. Przedstawiony w publikacji algorytm wykorzystuje śledzenie sygnału reprezentujące drgania pomostu za pomocą systemu typu ATR, bez pomiaru odległości dalmierzem EDM. Tak można uzyskać bardziej równomierny sposób próbkowania. Wynika on ze specyfiki obsługi poszczególnych sensorów przez system tachymetru. Z punktu widzenia obiektów mostowych zaprojektowany system pomiarowy nie znajdzie zastosowania jedynie dla krótkich, sztywnych przęseł np. mostów żelbetowych, ponieważ spodziewana amplituda drgań będzie tam niewielka. Zatem jedynym ograniczeniem systemu jest rozdzielczość matrycy systemów typu ATR. Implementacyjnie wdrożenie, na przykład dla tachymetrów marki Leica, polega na komunikacji za pomocą procedur RPC (ang. Remote Procedure Call) lub wykorzystaniu, podczas opracowania własnej aplikacji, bibliotek DLL (ang. Dynamic-link library, dostępnych w tym przypadku dla języków C++ lub VBA).

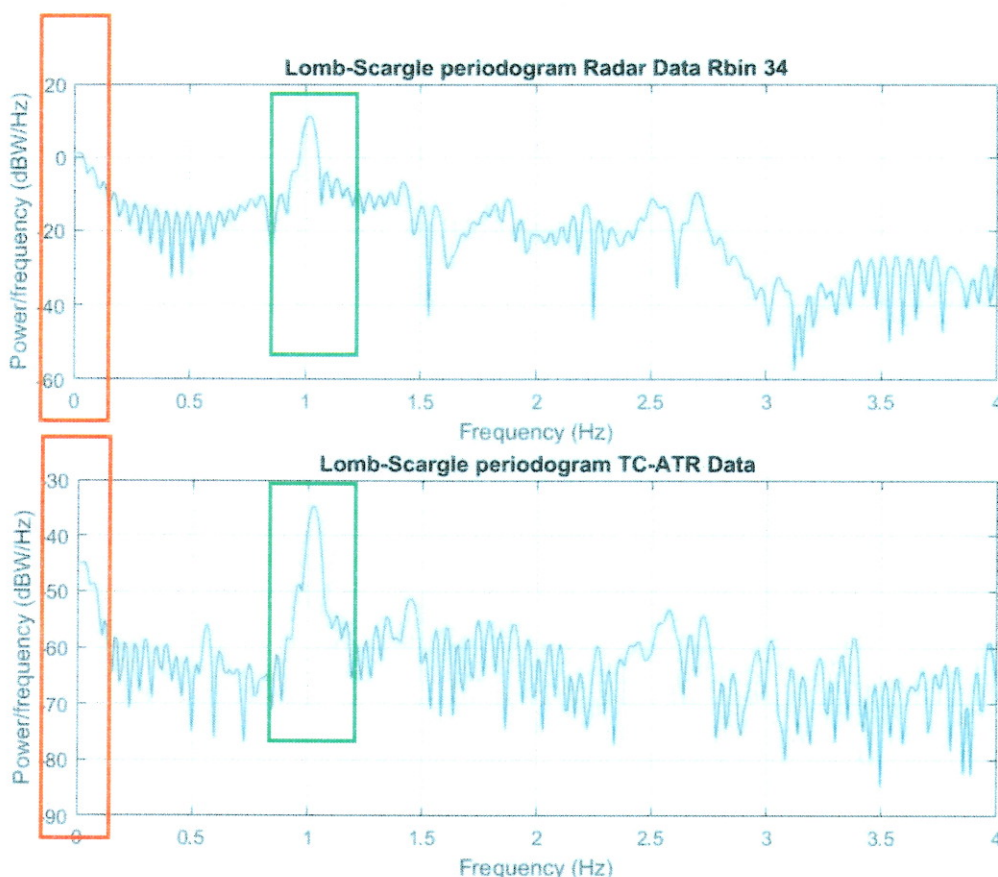
Test weryfikujący poprawność pracy wykonano na kładce dla pieszych. Jednoznaczność profilu radarowego uzyskano poprzez zastosowanie skaningu laserowego. Oznacza to, że elementy, które dały dobre odbicie fali radarowej, czyli mające wysoki stosunek sygnału do szumu na profilu radarowym, jednoznacznie

zidentyfikowano dzięki uzyskanej za pomocą skanera chmurze punktów. Dzięki zastosowaniu rozwiązania opisanego powyższym wzorem użytkowym miałem pewność dokładnej konfrontacji obu systemów pomiarowych – pomiar dotyczył dokładnie tych samych punktów (Rys. 20).



Rys. 20 Drganie pomostu pomierzone radarem (u góry) oraz proponowanym rozwiązaniem (u dołu). Źródło: publikacja numer 10.

Naturalnie oba systemy charakteryzują się bardzo różną częstotliwością próbkowania. Jak pokazano w publikacji, stosunek częstotliwości próbkowania F_s do ilości próbek N jest podobny dla obu systemów i wynosi odpowiednio 0.0455 Hz dla systemu radarowego oraz 0.0433 Hz dla systemu, który został opracowany. W omawianym przykładzie nie stosowano technik sztucznie zwiększających rozdzielczość widmową, takich jak uzupełnianie zerami. Aby zweryfikować, czy oba systemy rejestrują zachowanie sygnału, zbadałem, jak energia drgań konstrukcji jest rozproszona w poszczególnych częstotliwościach (Rys. 21).



Rys. 21 Widmowa gęstość mocy dla obu systemów pomiarowych. Źródło: publikacja nr 10.

Jak pokazano na Rys. 21, oba systemy zidentyfikowały częstotliwość około 1 Hz jako główną dla rejestrowanych drgań kładki (zielona ramka). Na czerwono zaznaczono stosunek mocy sygnału do częstotliwości. Ujawnia się tutaj przewaga systemu radarowego, niemniej jednak wyznaczona widmowa gęstość mocy jest analogiczna.

System radarowy próbuje drgania konstrukcji w sposób bardzo równomierny (względnie 0.5%). Pozwala to na estymację widmowej gęstości mocy na przykład przy użyciu estymatora Welcha (7) (Welch, 1967):

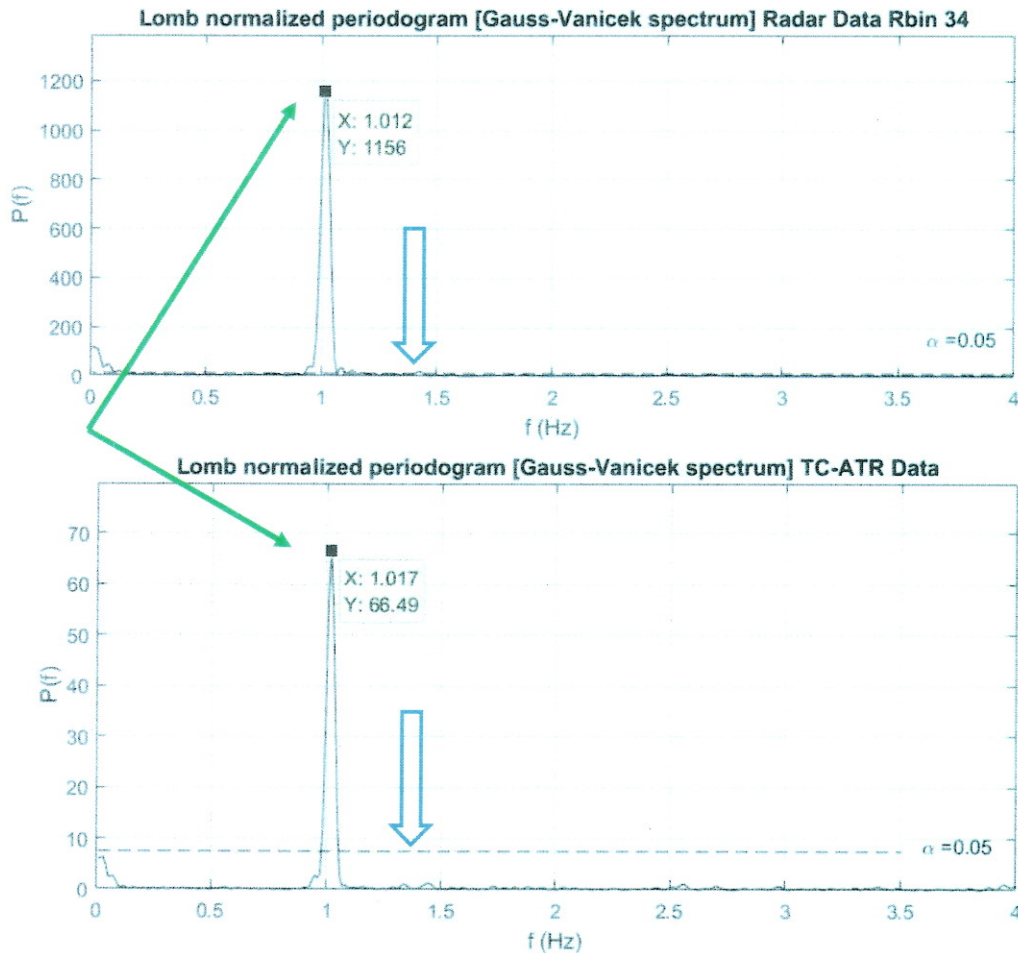
$$\hat{P}(f) = \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi f n} \right|^2 - \frac{1}{2\Delta t} < f \leq \frac{1}{2\Delta t} \quad (7)$$

gdzie: Δt – interwał próbkowania, N – liczebność próbek.

Proponowany system pomiarowy, mimo wyeliminowania pomiaru dalmierzem EDM, cechuje się nierównomiernością próbkowania na poziomie ± 25 ms (względnie w omawianym przykładzie 20%). Wyklucza to możliwość stosowania algorytmów o próbkowaniu jednolitym (np. FFT). Do opracowania danych użyłem zatem algorytmu LSSA (ang. Least-squares spectral analysis) (8), (Rys. 22), (Lomb, 1976).

$$P_{LS}(f) = \frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \frac{[\sum_{k=1}^N ((x_k - \bar{x}) \cos(2\pi f(t_k - t)))]^2}{\sum_{k=1}^N \cos^2(2\pi f(t_k - t))} + \frac{[\sum_{k=1}^N ((x_k - \bar{x}) \sin(2\pi f(t_k - t)))]^2}{\sum_{k=1}^N \sin^2(2\pi f(t_k - t))} \right\} \quad (8)$$

gdzie: \bar{x} – średnia z danych, σ – odchylenie standardowe, t – czas, f – częstotliwość



Rys. 22 Widmo częstotliwościowe uzyskane za pomocą algorytmu LSSA dla systemu radarowego oraz systemu proponowanego. Źródło: publikacja numer 10.

Uzyskana zgodność wyników jest na poziomie 0.005 Hz, ponadto w obu przypadkach zidentyfikowana częstotliwość drgań jest wyznaczona wyraźnie powyżej 5% poziomu istotności (zaznaczonego linią przerywaną oraz niebieską strzałką na wykresie).

Zaprojektowany i przetestowany system pomiarowy jest zgodny co do wyników z systemem radarowym. W publikacji efekty pracy podsumowałem czterema ważnymi wnioskami pokazującymi, kiedy proponowane rozwiązanie może być szczególnie przydatne:

a) Zachodzi uzasadnione podejrzenie, na podstawie konstrukcji mostu, że system radarowy będzie rejestrował przemieszczenia poziome oraz pionowe przęsła. W takim przypadku zastosowany system może proponowaną hipotezę zweryfikować eksperymentalnie.

b) Wymagana jest jednolita dokładność pozyskania informacji o widmie drgań całej konstrukcji przęsła, na przykład w celu rejestracji propagacji fali mechanicznej wzdłuż przęsła. Proponowany system może być wykorzystany jako uzupełnienie informacji dostarczanych przez system radarowy dla bardziej odległych celów.

c) Badana konstrukcja cechuje się dużą amplitudą drań, ale przesłonięcia horyzontu uniemożliwiają zastosowania systemów satelitarnych.

d) Badany obiekt drgający może być obserwowany jedynie z ograniczoną wizurą; w takim przypadku widmo radarowe uniemożliwi identyfikację interesującego nas punktu, więc pozostaje zastosowanie akcelerometrów lub proponowanego systemu – przykładem mogą być konstrukcje kratownicowe przęseł mostowych lub wież wyciągowych.

W zagadnieniu numer cztery przedstawiłem autorskie rozwiązanie pozwalające na wykonywanie badań obiektów mostowych za pomocą programowalnych tachymetrów. Może być ono użyte jako niezależne narzędzie badawcze lub stanowić uzupełnienie systemu radarowego.

4.2.5 Rozwój i implementacja algorytmów obliczeniowych pozwalających na integrację informacji pozyskiwanej w czasie badań pod obciążeniami z systemami monitoringu strukturalnego (SHM)

Podstawową motywacją podjęcia badań rozwiązujących ostatnie z przedstawianych zagadnień jest fakt, że obecnie w praktyce inżynierskiej badania obiektów mostowych pod obciążeniami mogą stanowić podstawę do projektu systemu monitoringu strukturalnego (SHM). Naturalnie powiązanie naukowe może też mieć charakter oddziaływania w przeciwnym kierunku. Wartości liczbowe z próbnego obciążenia, poddane analizie algorytmami SHM, pozwalają na wyciągnięcie znacznie bogatszych wniosków niż te, jakie uzyskuje się wykonując standardowe, przewidziane wytycznymi obliczenia. Dla nowych obiektów mostowych opracowany algorytm nierzadko pozwala na identyfikację, czy podczas obciążenia próbnego doszło do uszkodzenia konstrukcji. W odniesieniu do obiektów użytkowanych może mieć zastosowanie do identyfikacji pojazdów, które na przykład ze względu na zbyt duży ciężar (obciążenie ponadnormatywne) doprowadziły do uszkodzenia lub awarii obiektu mostowego. W perspektywie naukowej rozwiązanie stanowi rozwinięcie kierunku badań, jakie rozpocząłem podczas stażu na Uniwersytecie Stanforda.

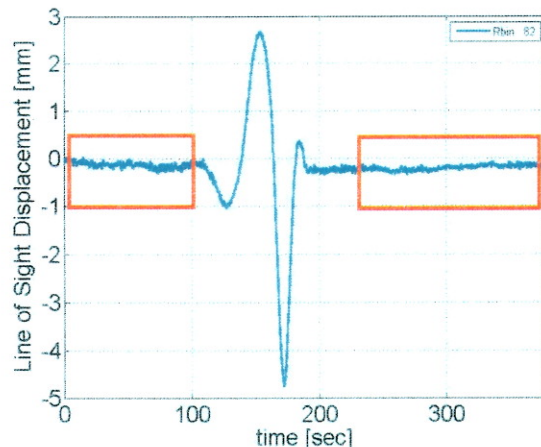
Rozwiązanie jako metoda zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego RP z wnioskiem o ochronę patentową. Wynalazek jest w trakcie rozpatrywania – „*Sposób testowania konstrukcji obiektu*”. Wniosek o udzielenie patentu na wynalazek zarejestrowano w urzędzie 20.07.2016 pod numerem P.418028. Następnie, po konsultacji z rzecznikiem patentowym, moje rozwiązanie przedstawiłem w publikacji „*Method of Prototyping Sensitive Dynamic Engineering Structures Supporting Automatic Information Regarding a Structure's Condition*”.

Pierwszym etapem pracy jest poprawne, wynikające z przeprowadzonej uprzednio analizy modalnej, rozmieszczenie czujników drgań. Istotne jest, aby zarejestrowane szeregi czasowe pozwalały na poprawną analizę konstrukcji. Proponowany algorytm może pracować na danych z dowolnego źródła (radaru interferometrycznego, systemu opisanego w paragrafie 4.2.4, akcelerometrów, czujników indukcyjnych itd.). Ja wdrożenie testowe wykonałem programując w języku MATLAB. Dane pozyskiwałem zdalnie, z akcelerometru, poprzez sieć bezprzewodową.

Zarejestrowane dane dekomponuje się w dziedzinie czasu na trzy grupy. Pierwszą grupę stanowią dane mające charakter sygnału stacjonarnego. W pozyskanym sygnale pomiarowym będą się one znajdowały w części poprzedzającej wymuszenie oraz po ustaniu drgań swobodnych konstrukcji wywołanych wymuszeniem. Drugą grupę stanowią dane reprezentujące reakcję konstrukcji (na przykład przemieszczenia przęsła). Ta grupa danych może być wykorzystana między innymi do obliczenia współczynnika przewyższenia dynamicznego. Mój algorytm bezpośrednio nie korzysta z tej grupy obserwacji. Trzecią grupę danych stanowi ta część szeregu czasowego, która reprezentuje drgania swobodne konstrukcji (po zjeździe środków obciążających z obserwowanego przęsła).

W publikacji przedstawiłem w pierwszej kolejności, w jaki sposób efektywnie wyznaczać logarytmiczny dekrement tłumienia, nawet w przypadkach, które są obarczone występowaniem częstotliwości dudniących. Możliwość wykonania regresji (dowolnego rodzaju) oscylatora tłumionego (będącego modelem tłumiącej się konstrukcji) w zbiór reprezentujący logarytm transformaty Hilberta pozwala na bardzo wiarygodną ocenę pracy obiektu. Sposób zaprezentowany w publikacji jest w szczególności odporny na wpływy, związane z okienkowaniem cyfrowego sygnału pomiarowego.

Druga, istotniejsza część prezentowanego algorytmu, dotyczy identyfikacji uszkodzeń mogących wystąpić podczas badań. Jeżeli dochodzi do uszkodzenia konstrukcji, wówczas zmieniają się cechy statystyczne sygnału pomiarowego. Istota algorytmu opiera się na analizie danych z pierwszej grupy – są zaznaczone na Rys. 23 za pomocą czerwonej ramki. Warty podkreślenia jest fakt, że te dane w standardowym podejściu podczas analiz pomiarów z badań pod obciążeniem próbnym i użytkowym traktowane były do tej pory jako szum pomiarowy i nie stanowiły podstawy do jakiegokolwiek wniosku.



Rys. 23 Dane pomiarowe wykorzystane do detekcji uszkodzeń. Źródło: publikacja numer 11.

Ja w swoim rozwiązaniu skorzystałem z metody opierającej się na wpasowaniu w szereg czasowy modelu ARMA (ang. autoregressive moving average), której postać jest dana wzorem (9):

$$x_{ij}(t) = \sum_{k=1}^p a_k x_{ij}(t-k) + \sum_{k=1}^q b_k e_{ij}(t-k) + e_{ij}(t) \quad (9)$$

gdzie: $x_{ij}(t)$ to znormalizowany sygnał pomiarowy, a_k oraz b_k to k -ty współczynnik komponentu AR (komponent autoregresji) i MA (komponent średniej ruchomej), p i q to rzędy modeli procesów AR oraz MA, a $e_{ij}(t)$ to wartość resztkowa. Na podstawie wartości współczynników AR i MA możliwe jest obliczenie znanego z literatury przedmiotu parametru DSF (ang. Damage Sensitive Feature) (Wenzel, 2009), danego wzorem (10):

$$DSF = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2}} \quad (10)$$

gdzie a_i to współczynniki estymowane na podstawie wzoru (9) z szeregu czasowego. Algorytmy tej grupy w sposób wyczerpujący opisane są w między innymi w pracach prof. Anne Kiremidjian (Nair, Kiremidjian, Law, 2006), u której podczas stażu na Uniwersytecie Stanforda konsultowałem początkowe implementacje.

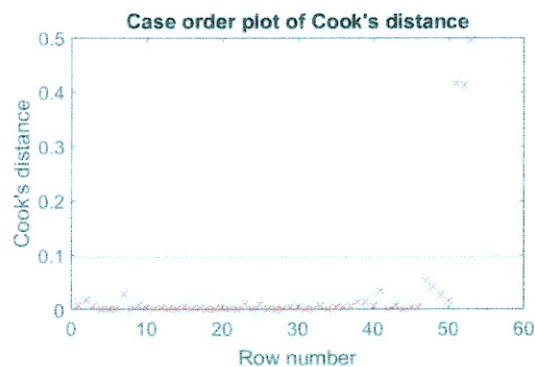
Jeżeli podczas wzbudzenia konstrukcji doszło do uszkodzenia, wartości współczynników DSF prawdopodobnie będą się znacząco różnić. Zidentyfikowanie uszkodzenia obiektu można wyznaczyć obliczając wartości DSF przed i po wymuszeniu. Jeżeli wartość oczekiwana współczynnika DSF przed wymuszeniem znacząco się różni się od wartości wyznaczonej po wymuszeniu, dochodzi do detekcji uszkodzenia. Takie podejście, prezentowane w publikacjach innych autorów (Wenzel, 2009), z punktu widzenia badania obiektów mostowych, ma dwa mankamenty:

- a) Konieczne jest zebranie odpowiednio licznej próbki reprezentującej zachowanie obiektu po wzbudzeniu, tak by istotność statystyczna testu była zachowana na odpowiednio wysokim poziomie.
- b) Opisana technika obliczeniowa nie może być szeroko stosowana do testów obiektów mostowych pod obciążeniem użytkowym, gdzie pomiędzy wzbudzeniem obiektu może nie być wystarczająco dużo czasu na zebranie odpowiedniej ilości danych do przeprowadzenia t-testu (badanie istotnej statystycznie różnicy dwóch zbiorów danych), służącego realizacji współczynnika DSF.

W mojej publikacji zaproponowałem weryfikację, czy realizacja ograniczonej liczby parametrów DSF znacząco odbiega od ich średniej realizacji. Zdecydowałem się na wykorzystanie analizy regresji w oparciu o odległość Cooka (Cook, 1977) danej wzorem (11):

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^n (y_j - y_{j(i)})^2}{pMSE}, \quad (11)$$

gdzie y_j to j -ta wartość wpasowana, $y_{j(i)}$ to j -ta wartość wpasowana, bez uwzględnienia i -tej obserwacji, MSE to błąd średniokwadratowy, p to numer współczynnika w modelu regresji.



Rys. 24 Detekcja uszkodzenia z ograniczoną ilością danych po wzbudzeniu. Źródło: publikacja numer 11.

Linia przerywana na Rys. 24 prezentuje standardowo przyjmowaną wartość progową – trzykrotną wartość średniej odległości Cooka. W przykładzie przedstawionym w omawianej publikacji zaledwie kilka realizacji współczynnika DSF po wymuszeniu pozwala na detekcję uszkodzenia.

Zaproponowana we wniosku patentowym oraz publikacji metoda obliczenia obejmuje całościowo sposoby prototypowania konstrukcji inżynierskich. Zgodnie z wnioskami zaprezentowanymi w publikacji numer 10 oraz wnioskiem o ochronę wynalazku jego podstawowe założenia oraz cechy są następujące:

- a) Dekompozycja zarejestrowanego sygnału reprezentującego drgania obiektów mostowych na trzy grupy w domenie czasu. Pierwsza grupa zawiera dane przed wymuszeniem oraz po ustaniu drgań swobodnych i technicznie jest to grupa sygnałów stacjonarnych z systemów liniowych. Druga to odpowiedź konstrukcji (na przykład ugięcie przęsła). Trzecia grupa to ta część sygnału, która reprezentuje drgania swobodne obiektu wywołane wymuszeniem.
- b) Dekompozycja sygnału w dziedzinie częstotliwości, w szczególności filtrowanie sygnałów filtrami pasmoprzepustowymi, które umożliwiają efektywniejszą analizę widmową. Szerokość oraz zakres pasma jest wynikiem analiz wykonanych metodą elementów skończonych.
- c) Widmo amplitudowe jest porównywane z analizą wykonaną metodą elementów skończonych poprzez obliczenie szybkiej transformaty Fouriera, jeżeli próbkowanie było wykonane równomiernie, lub algorytmami LSSA, jeżeli założenie o równomierności próbkowania nie może być spełnione przez system pomiarowy.
- d) Tłumienie konstrukcji jest reprezentowane poprzez logarytmiczny dekrement tłumienia. Obliczenie jego wartości nie opiera się na zastosowaniu klasycznego podejścia polegającego na porównaniu kilku wybranych, sąsiednich amplitud, ale na obliczeniu transformaty Hilberta – a więc uzyskaniu obwiedni sygnału tłumionego (całościowe podejście do wyznaczania dekrementu). Następnie dla logarytmu obwiedni liczona jest regresja liniowa na przykład metodą najmniejszych kwadratów. Obliczony współczynnik tłumienia pozwala na estymację logarytmicznego dekrementu tłumienia z całego sygnału, nawet jeżeli w konstrukcji występują dudnienia.
- e) Identyfikacja potencjalnych uszkodzeń konstrukcji w wyniku wzbudzenia jest realizowana na podstawie współczynników DSF. Odpowiedź na pytanie, czy uszkodzenie zaszło, jest udzielana na podstawie odległości Cooka, a nie porównania wartości średnich w próbach. Efektem takiego zabiegu jest możliwość oceny w czasie rzeczywistym wpływu wzbudzenia na uszkodzenia w obiekcie, również podczas badań pod obciążeniem użytkowym.

W publikacji pokreśliłem również, że istotne jest, aby dane zasilające algorytm w zakresie sygnałów stacjonarnych były analizowane pod kątem ich adekwatności. Obliczenia i wnioskowanie o stanie konstrukcji musi poprzedzać weryfikacja założeń, w szczególności sprawdzenie, czy wartości reszt modelu ARMA mają jednakowy rozkład normalny oraz czy są niezależne. Podczas obliczeń ważnymi parametrami są między innymi rząd modelu ARMA oraz długości okien danych.

W zagadnieniu numer pięć przedstawiłem autorski sposób prowadzenia badań oraz analizy wyników, który pozwala na osiągnięcie w efektywniejszy sposób wyników przewidzianych aktualnie obowiązującymi przepisami, a ponadto daje możliwość detekcji potencjalnie występujących uszkodzeń podczas badań. Algorytm pozwala na prowadzenie badań zarówno dla obiektów nowych, jak również poddanych bieżącej eksploatacji.

4.3 Podsumowanie

Prowadzenie badań obiektów inżynierskich, które są narażone na oddziaływania dynamiczne, jest istotnym zagadnieniem w świetle oceny ich bezpieczeństwa. Rozwój technologii pomiarowych i obliczeniowych stwarza możliwości uzyskania pełniejszej oraz bardziej precyzyjnej oceny stanu obiektu. Uważam za istotne, aby w miarę możliwości sprawdzone technologie i metody obliczeniowe stopniowo uzupełniać o nowe sposoby, a w konsekwencji zwiększać ilość informacji uzyskiwanych o obiekcie, zarówno podczas badań odbiorczych, jak też w trakcie diagnostyki i użytkowania.

W pierwszej publikacji pod tytułem „*Structure's condition monitoring based on optical measurements*” jako oryginalne osiągnięcie można wskazać pierwszą pełną przeprowadzoną na obiekcie mostowym wzajemną walidację systemów pomiarowych: radarowego oraz wizyjnego. Te doświadczenia stanowią podstawę do późniejszych wdrożeń podczas badań obiektów mostowych. Efektywnie, w warunkach praktycznych, wykonano kompletny test systemu wizyjnego oraz poddano ocenie zgodność pomiarów ugięć konstrukcji przęsła badanego wiaduktu za pomocą obu systemów. Wynikiem tych doświadczeń było pierwsze zastosowanie w Europie Środkowej naziemnej technologii radarowej do badań obiektu mostowego pod obciążeniem próbnym, przedstawione w publikacji pod tytułem „*Investigation of displacements of road bridges under test loads using radar interferometry – case study*”. Jest to w pełni oryginalna publikacja, prezentująca porównanie wyników uzyskiwanych kilkoma metodami w badaniu mostu o konstrukcji podwieszanej. Przedstawione, bezprecedensowe w Polsce, wyniki badań obejmują testy podczas obciążeń statycznych, jak również dynamicznych. W tej publikacji nacisk został położony na weryfikację i zebranie jak największej ilości doświadczeń, tak aby w konsekwencji technologię radarową można było zastosować jako równoprawną podczas badań odbiorczych. Weryfikacja dokładności ugięć statycznych została przeprowadzona między innymi w oparciu o obserwacje satelitarne oraz niwelację precyzyjną. Ponadto zidentyfikowałem, jakie mogą być różnice w ocenie wartości częstotliwości modalnych mostu, wyznaczonych na podstawie analizy teoretycznej, pomiarów czujnikami indukcyjnymi oraz radarowymi.

Trzecia z prezentowanych publikacji „*Advantages of radar interferometry for assessment of dynamic deformation of bridge*” przedstawia pierwsze zastosowanie techniki radarowej do badań diagnostycznych obiektów mostowych, w których, po zidentyfikowaniu uszkodzenia, przeprowadzono program naprawczy. Ponadto przedstawione wyniki są pierwszymi doświadczeniami realizującymi pomiar dla obiektu mostowego o konstrukcji stalowej. W publikacji pokazano ważną zależność rezultatów pomiędzy powszechnie stosowanymi do badań mostowych czujnikami indukcyjnymi a radarem interferometrycznym. W konsekwencji pozwoliło to w kolejnych badaniach na stosowanie radaru dla przęseł nurtowych. Wskazano praktycznie, że uwzględnienie geometrii pomiaru dla systemu radarowego jest istotne. Ponadto pokazano czułość identyfikacji składowych harmonicznym drgań konstrukcji stalowej.

W czwartej publikacji pod tytułem „*Variation of frequency response of a cable-stayed bridge and calculation of the damping coefficient of selected vibration modes based on the data recorded with radar systems*” opracowano bardzo bogaty zbiór danych uzyskanych podczas badań mostu w Zembrzycach. Publikacja stanowi podstawę do identyfikacji niezbędnej ilości testów pomiarowych koniecznych do uzyskania pełnej informacji o praktycznie występujących postaciach drgań. Obszerne obliczenia obejmowały wyniki drgań czterech poprzecznic we wszystkich schematach dynamicznych przewidzianych projektem próbnego obciążenia. W sumie z 776 analizowanych wektorów danych zaczerpnięto wyliczenia decydujące o tym, jaki typ obciążeń dynamicznych pozwala na uzyskanie najpełniejszej informacji o stanie obiektu oraz ile eksperymentów jest potrzebnych, aby uzyskać reprezentację wszystkich postaci drgań dla całego przęsła. Ponadto w publikacji przedstawiono przykład estymacji parametrów tłumienia dla przęsła nurtowego dwoma niezależnymi algorytmami. Warto wskazać, że materiał źródłowy dla tych obliczeń stanowią dane zawierające silny szum pomiarowy o amplitudzie drgań około 0.1-0.2 mm.

Kolejna, piąta publikacja pod tytułem „*Monitoring of a civil structure's state based on noncontact measurements*” jest oryginalnym, wyczerpującym opracowaniem dotyczącym porównania dwóch systemów pomiarowych. Przeprowadzone badania obejmują trzy niezależne eksperymenty składające się na nietuzinkowy eksperyment badawczy. Przedstawiona została optymalizacja systemu wizyjnego oraz kompletne opracowanie wyników laboratoryjnych, testowy pomiar terenowy oraz wykonanie i analiza pomiarów próbnych prowadzonych dla wiaduktu. Przeprowadzone pomiary bazowały na doświadczeniach zdobytych podczas prac opisanych w publikacji numer 1. Zrealizowanym osiągnięciem naukowym jest empiryczny dowód na możliwość zastosowania obu opisywanych systemów pomiarowych dla prac prowadzonych z zakresu diagnostyki zdrowia konstrukcji mostowej.

Szosta z przedstawionych publikacji pod tytułem „*Analysis and measurement technology of testing displacements and vibrations of the arch bridge*” w szczególności obejmuje omówienie możliwości zastosowania naziemnego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu uszkodzeń obiektu mostowego poddawanego badaniom. Przeprowadzone prace badawcze zostały zaprojektowane i przeprowadzone na łukowym obiekcie mostowym o zespolonej konstrukcji pomostu. Oryginalne osiągnięcie polega na praktycznej weryfikacji postawionej hipotezy o możliwości kontroli wartości dylatacji wzdłuż podłużnicy (weryfikacja pozytywna) oraz możliwości kontroli skręceń poprzecznic (weryfikacja negatywna). Ponadto na podstawie analizy widmowej przeprowadzonej dla danych pozyskanych czujnikami indukcyjnymi zweryfikowano wartości obliczone teoretycznie. Zatem w świetle osiągnięcia naukowego zyskano trzy istotne efekty. Pierwszy to informacje, jakie części ustroju nośnego mogą być identyfikowane za pomocą skanowania laserowego w zakresie kontroli położenia i kształtu podczas badań odbiorczych. Drugi efekt dotyczy wskazania praktycznej rozbieżności między sprawdzoną w środowisku konstruktorów metodą pomiarową czujnikami indukcyjnymi a obliczeniami teoretycznymi, trzeci zaś

unaocznia, jaka może być rozbieżność w identyfikacji postaci drgań pod wpływem różnego typu wzbudzenia.

Rozdział siódmy monografii pod tytułem: „**Determination of displacement and vibrations of engineering structures using ground-based radar**” jest w pełni oryginalnym opracowaniem prezentującym w sposób kompleksowy technologię oraz opracowane metody obliczeniowe niezbędne do zastosowania systemu radarowego do badań obiektów mostowych pod obciążeniem próbnym oraz badań pod obciążeniem użytkowym. Przedstawiłem analizę wpływu geometrii na dokładność pomiaru ugięć przęseł mostowych, praktycznie zweryfikowałem ocenę zgodności z metodami o ugruntowanej pozycji w środowisku geodetów oraz przedstawiłem analizę profilu radarowego. W oparciu o zarejestrowane dane wykonałem filtrację danych, a następnie identyfikację postaci drgań obiektu mostowego. Uzyskane szeregi czasowe wykorzystałem do sprawdzenia, czy odpowiedź w domenie częstotliwości jest stała. Po pozytywnym zweryfikowaniu tej hipotezy przedstawiłem metodę wyznaczania parametru tłumienia w oparciu o transformatę Hilberta. Przedstawiłem również przykład identyfikacji postaci drgań, w szczególności dla obiektu, którego potencjalna awaria ujawnia się w postaci częstotliwości dudniących.

Ósma publikacja pod tytułem „**Application of ground-based radar interferometry technique to bridge load testing**” stanowi syntezę doświadczeń zebranych podczas pierwszych w Polsce i jednych z pierwszych w Europie oryginalnych badań obiektów mostowych zrealizowanych za pomocą naziemnej interferometrii radarowej. Opierając się na przytoczonych obszernych raportach pomiarowych, omówiłem cechy poszczególnych konstrukcji mostowych z perspektywy badań przeprowadzonych radarem. Publikacja obejmuje doświadczenia zdobyte na czterech dużych obiektach mostowych, z których każdy charakteryzuje się inną konstrukcją. Dwa z nich to mosty z przęsłami nurtowymi o konstrukcji wantowej, a kolejne dwa to mosty kablobetonowe. W publikacji zademonstrowano przykłady uzyskanych wyników, dając szeroki obraz zastosowania nowatorskiej techniki w części pomiarowej oraz podczas analizy uzyskanych danych.

W publikacji numer 9 pod tytułem „**Beat frequency detection of bridges using ground-based radar interferometry**” skoncentrowałem się na możliwościach związanych z prowadzeniem pomiarów na rzecz diagnostyki obiektów mostowych. Jedną z przesłanek potencjalnie występującej awarii są dudnienia częstotliwości. Publikacja omawia zjawisko w sposób teoretyczny oraz pokazuje jego identyfikację dla dwóch obiektów poddanych badaniu. Uzyskana rozdzielczość widmowa pozwala na identyfikację częstotliwości dudniących odległych w domenie częstotliwości o 0.31 Hz dla badań pod obciążeniem użytkowym oraz 0.05 Hz dla badań pod obciążeniem próbnym. Jak pokazano, identyfikacja mogła być przeprowadzona, mimo iż wartość amplitudy drgań swobodnych nie przekraczała 0.3 mm. Jako oryginalne osiągnięcie naukowe w tej publikacji można wskazać ocenę możliwości identyfikacji dudnień obiektów mostowych w warunkach praktycznych za pomocą interferometrii radarowej.

Przedostatnia z prezentowanych publikacji pod tytułem „*Eliminating the problem of one-dimensionality of radar interferometry techniques for long-span slender bridge structures*” oraz powiązany z nią wzór użytkowy stanowią w pełni oryginalne rozwiązanie, nad którym pracowałem od 2013 roku. Nietuzinkowym osiągnięciem naukowym jest sposób wykonywania pomiarów i obliczeń, a w konsekwencji rozwiązanie problemu słabej geometrii punktów przeszła obiektu mostowego, odległego od jednostki radarowej. Uzyskane wyniki są zgodne z otrzymanymi za pośrednictwem radaru, jednak zdecydowanie bardziej dostępne ze względu na fakt, że platformę pomiarową stanowi tachymetr.

Ostania, jedenasta z przedstawionych publikacji pod tytułem „*Method of Prototyping Sensitive Dynamic Engineering Structures Supporting Automatic Information Regarding a Structure's Condition*” jest w pełni autorską propozycją sposobu przeprowadzania badań obiektów mostowych. Pozwala na efektywne, uwzględniające postęp technologiczny w zakresie sprzętu pomiarowego oraz dostępnych algorytmów, wyznaczanie parametrów dynamicznych badanej konstrukcji. Przedstawia skuteczniejszy niż dotychczas stosowany sposób wyznaczania parametrów tłumienia konstrukcyjnego obiektu inżynierskiego. Ponadto pozwala na analizę danych nie tylko reprezentujących niestacjonarną część sygnału pomiarowego, ale również część stacjonarną, dając możliwość identyfikacji potencjalnie pojawiającego się uszkodzenia podczas badań – takie podejście do badania obiektów mostowych jest w pełni oryginalne. Obiekty mostowe, dla których badanie wykonywane jest pod obciążeniem użytkowym, pozwalają na identyfikację tych wymuszeń, które doprowadziły do uszkodzenia, nawet jeżeli czas pomiędzy kolejnymi wymuszeniami jest krótki.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

W swoich badaniach prowadziłem również prace związane z zastosowaniem nowoczesnych technologii pomiarowych do inwentaryzacji oraz analizy zachowania środowiska przyrodniczego. Kierowałem pracami zespołu, który wykonał, we współpracy

z Instytutem Geografii PAN, pierwszą powojenną mapą batymetryczną Czarnego Stawu Gąsienicowego w polskich Tatrach Wysokich. Praca obejmuje badania dna zbiornika (sondowanie batymetryczne) oraz otaczającego stoku wykonane za pomocą skaningu laserowego. Rezultat badań został przedstawiony w publikacji:

- Owerko T., Kwartnik-Pruc A., Kocierz R., Kuras P., Ortyl Ł., Długosz M. 2013. *Geomorphometric monitoring of active slopes and their impact on post-glacier lake in the Tatra Mountains*. SGEM: GeoConference on Informatics, geoinformatics and remote sensing, vol. 2, Geodesy and mine surveying, Photogrammetry and remote sensing. Sofia, ISBN: 978-619-7105-01-8, s. 245–252.

Szczególnie cieszy fakt, że działanie to zapoczątkowało szereg pomiarów prowadzonych przez inne uczelnie oraz instytuty badawcze na stawach tatrzańskich.

Tomen Owerko

Batymetryczne prace badawcze prowadziłem również dla rzek. Doświadczenia z inwentaryzacji profilu podłużnego przełomu Dunajca omawiałem podczas konferencji Mobile Mapping Technology w 2011 roku. To dokonanie naukowe jest również efektem współpracy z IG PAN:

- **Owerko T.**, Kuras P., Kocierz R., Soja R., 2011. *Integration of surveying measurement techniques for bathymetric measurements in a river gorge*. International symposium on Mobile Mapping Technology. Cracow, 13–16 June 2011, ISBN: 978-83-61576-15-0. s. 51–52.

Prace, którymi kierowałem, związane z pomiarami batymetrycznymi były realizowane również dla rzeki Wisły jako śródlądowej drogi wodnej. Przykład badań wykonanych na potrzeby projektu obiektu mostowego przedstawiłem w publikacji:

- **Owerko T.**, Ortyl Ł., Kwartnik-Pruc A., Ćwiąkała P. 2011. *Integracja technologii geodezyjnych na przykładzie pomiarów batymetrycznych*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi. ISSN 1732-5587. 2011 nr 4, s. 21–29.

W zakresie prac realizowanych na potrzeby inwentaryzacji środowiska naturalnego uczestniczyłem również w zastosowaniu skaningu laserowego w inwentaryzacji jaskiń:

- Kwartnik-Pruc A., Kuras P., Kocierz R., Ortyl Ł., **Owerko T.** 2013. *The possibility of using remote sensing techniques in geometric surveying of caves*. SGEM: GeoConference on Informatics, geoinformatics and remote sensing.vol. 2, Geodesy and mine surveying, Photogrammetry and remote sensing. Sofia, ISBN: 978-619-7105-01-8. s. 479–486.

Przed uzyskaniem tytułu doktora nauk technicznych, w trakcie studiów doktoranckich oraz po obronie moje zainteresowania obejmowały wyznaczanie dokładności instrumentów geodezyjnych, w szczególności zgodnie z normą ISO 17123. Efektem tych prac są następujące publikacje:

- **Owerko T.** 2009. *Badanie dokładności instrumentów RTK GNSS w oparciu o standard ISO 17123-8*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, ISSN 2083-2214. 2009 vol. 19,s. 341–350.
- **Owerko T.**, Kuras P., Szafarczyk A. 2010. *Comparison of the effectiveness of automatic targeting, using systems of ATR type, with manual targeting, based on full test procedure ISO 17123-3*. Geomatics and Environmental Engineering ; ISSN 1898-1135. 2010 vol. 4 no. 1/1, s. 107–113.
- **Owerko T.** 2010. *Analizyczne porównanie metod pomiarowych na przykładzie testu Blanda-Altmana*. Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii pod red. Jana Drzymały i Wojciecha Ciężkowskiego. Wrocław, ISBN: 978-83-7493-518-0. s. 63–68.
- **Owerko T.**, Strach M., 2009. *Examining coherence of accuracy tests of total station surveying and geodetic instruments based on comparison of results of*

complete test procedures according to ISO 17123. Reports on Geodesy, ISSN 0867-3179. 2009 no. 2, s. 291–299.

- **Owerko T.** 2008. *Terenowa baza testowa ISO 17123-3. Zagadnienia interdyscyplinarne w górnictwie i geologii*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 122. ISSN 0324-9670, nr 51. s. 165–173.

Moje badania obejmowały również rozwój oraz integrację technologii pomiarowych. Przedmiotem prac były między innymi technologia RTK GNSS (testowe wdrożenie serwera poprawek NTRIP) oraz badania związane z technologią termowizyjną (byłem odpowiedzialny za modelowanie i obliczenia):

- **Ćwiąkała P., Owerko T.** 2012. *Determination the accuracy of TELPOD SVP 45 resistive sensors as tools for measuring the relative displacement of points*. Geomatics and Environmental Engineering, ISSN 1898-1135. 2012 vol. 6 no. 3, s. 25–33.
- **Owerko T., Kuras P.** 2008. *Dystrybucja poprawek RTK GNSS za pomocą protokołu NTRIP*. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej nr 122. Konferencje, ISSN 0324-9670, nr 51. s. 174–184.
- **Wróbel A., Wróbel A., Kiślewicz T., Ortyl Ł., Kwartnik-Pruc A., Szafarczyk A., Owerko T.** 2011. *Ilościowe określanie cieplnych właściwości przegród budowlanych z wykorzystaniem techniki termograficznej*. Pod red. Aliny WRÓBEL. Kraków, Wydawnictwa AGH, 2011. ISBN: 978-83-7464-393-1
- **Ortyl Ł., Owerko T.** 2010. *Pomiary inwentaryzacyjne sieci uzbrojenia terenu Geodezja inżynieryjno-przemysłowa*, Cz. 3, Jan Gocał. Wydawnictwa AGH, 2010. ISBN: 978-83-7464-327-6.
- **Owerko T., Ortyl Ł., Gałązka P.** 2011. *Remote control and management of GPS reference station*. Aktualne problemy w geodezji inżynieryjnej : X konferencja naukowo-techniczna dedykowana pamięci prof. dr hab. Stanisława Pachuty : 24–25.03.2011, Warszawa–Białobrzegi. Komitet Geodezji PAN, Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej, Stowarzyszenie Geodetów Polskich. ISBN: 978-83-61576-14-3. s. 70

W swoich pracach badawczych nie koncentrowałem się jedynie na obiektach mostowych. Prowadziłem również prace związane z monitoringiem, pomiarem deformacji oraz pomiarem przemieszczeń różnych obiektów inżynierskich: wież, masztów, kominów przemysłowych oraz zapór.

- **Owerko T., Ortyl Ł., Kuras P., Kocierz R.** 2012. *Wykorzystanie skaningu laserowego do wyznaczania deformacji stalowych wież telekomunikacyjnych*. Pomiary, Automatyka, Kontrola. ISSN 0032-4140. 2012 vol. 58 nr 12, s. 1087–1090.
- **Kuras P., Ortyl Ł., Owerko T., Kocierz R., Kędzierski M., Podstolak P.** 2016. Analysis of effectiveness of steel chimneys vibration dampers using surveying methods. Joint International Symposium on Deformation Monitoring, kwiecień 2016, FIG, IAG, TU Wien.

- Kuras P., **Owerko T.**, Szafarczyk A. 2010. Applicability of ground-based microwave interferometer on the example of an industrial chimney located on the mining area. Geokinematischer Tag des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. ISBN: 978-3-86797-099-0. s. 249–258.
- Kocierz R., Kuras P., **Owerko T.**, Ortyl Ł. 2011. Assessment of usefulness of radar interferometer for measuring displacements and deformations of dams. Proceeding of the Joint international symposium on Deformation monitoring. Hong Kong, China.
- **Owerko T.**, Ortyl Ł., Kocierz R., Kuras P. 2012. Novel technique of radar interferometry in dynamic control of tall slender structures. Journal of Civil Engineering and Architecture ; ISSN 1934-7359. 2012 vol. 6 no. 8, s. 1007–1013.

Do mojego dorobku naukowego zaliczam również udział merytoryczny, jako wykonawca lub główny wykonawca w następujących grantach badawczych:

1. Wykonawca w projekcie badawczym: "Opracowanie zasad wyznaczania drgań i przemieszczeń budowli inżynierskich z wykorzystaniem interferometrii radarowej." N N526 158838.
2. Grant promotorski o numerze N N526 243135 : "Ocena poziomu ufności norm ISO 17123 w aspekcie praktycznych wyników obserwacji", miejsce realizacji: Akademia Górniczo-Hutnicza. Charakter udziału: Główny wykonawca.
3. Wykonawca w projekcie badawczym: "Warunki stosowalności skanerów laserowych w inwentaryzacji, wizualizacji i monitoringu obiektów przemysłowych i górniczych", NR KBN 4T12E 05829.
4. Wykonawca w projekcie badawczym: "System informacji o zbiorach archiwalnych dotyczących eksploatacji górniczych na terenie Polski". Nr KBN 4T12E 05828. Charakter udziału: Wykonawca.
5. Wykonawca w projekcie badawczym: "Wykorzystanie zintegrowanego systemu GPR-GPS w procesie uzupełniania treści map tematycznych struktur podpowierzchniowych", nr KBN 4 T12 048 27. Czas trwania: 03.11.2004-02.11.2007.
6. Wykonawca w projekcie badawczym: „Opracowanie zasad ilościowego określania właściwości cieplnych przegród budowlanych z wykorzystaniem techniki termowizyjnej”, MNiSW NN 526119133. Czas trwania: 08.11.2007 – 07.11.2010. Charakter udziału: Wykonawca.
7. Wykonawca w projekcie "Nowoczesne metody rozpoznawania podłoża gruntowego" finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Skarb Państwa - Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w ramach programu krajowego RID Rozwój Innowacji Drogowych. RID OT1-1E/PIG-AGH-PW, Czas trwania 01.12.2015 – 31.01.2018.

Tomasz Owerko

Bibliografia

- Bień J., Adamcewicz S., Zwolski J., Rawa P., Banakiewicz A. 2008. *Badania wschodniej konstrukcji Nowego Mostu Warszawskiego we Wrocławiu*. Mosty stalowe: projektowanie, technologie budowy, badania, utrzymanie, Seminarium, Wrocław, 27-28 listopada 2008. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, s. 287-298
- Cook R. D. 1977. *Detection of Influential Observations in Linear Regression*. Technometrics. American Statistical Association. 19 (1): 15–18.
- GDDKiA 2008. *Zalecenia dotyczące wykonania badań pod próbnym obciążeniem drogowych obiektów mostowych*. Załącznik do Zarządzenia Nr 35 Generalnego Dyrektora Dróg Karowych i Autostrad, Warszawa.
- Farrar C.R., Worden K. 2013. *Structural health monitoring. A machine learning perspective*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, United Kingdom. ISBN: 978-1-119-99433-6.
- Nair, K. K., Kiremidjian, A. S., Law, K. H. 2006. *Time Series-Based Damage Detection and Localization Algorithm with Application to the ASCE Benchmark Structure*. Journal of Sound and Vibration 291: 349-68.
- Lomb, N. R. 1976. *Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data*. Astrophysics and Space Science. Vol. 39, 1976.
- Łaziński P., Salamak M. 2010. *Działalność katedry dróg i mostów w badaniach mostów pod próbnym obciążeniem*. Inżynieria i Budownictwo, 5-6/2010, s. 300-303
- Olaszek P., Janas L., Salamak M., Matysek A. 2014. *Badania porównawcze przyspieszeń i przemieszczeń konstrukcji mostowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym*. Drogownictwo 10/2014, s. 339-343.
- PN-89/S-10050 Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Wymagania i badania.
- PN-S-10040:1999 Obiekty mostowe. Konstrukcje betonowe żelbetowe i sprężone. Wymagania i badania.
- PN-85/S-10030 Obiekty mostowe. Obciążenia.
- Ryall M.J. 2010. *Bridge Management. 2nd Edition*. Elsevier, Amsterdam, pp. 177-203.
- Shin K., Hammond J.K. 2008. *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*. John Wiley & Sons Ltd, ISBN 978-0-470-51188-6.
- Vaghefi K., Oats R.C., Harris D.K., Ahlborn T.M., Brooks C.N., Endsley K.A., Roussi C., Shuchman S., Burns J.W., Dobson R. 2012. *Evaluation of Commercially Available Remote Sensors for Highway Bridge Condition Assessment*. Journal of Bridge Engineering, 17(6): 886-895.
- Wang M.L., Lynch J.P., Sohn H. 2014. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures Volume 2: Applications in Structural Health Monitoring*. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials: Number 56. ISBN 978-1-78242-242-6

Tomek Łaziński

Welch, P. D. 1967. *The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms*. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, AU-15 (2): 70–73,

Wenzel H. 2009. *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-03173-5.

Tamen Audio