

**PRECYZYJNE POMIARY DRGAŃ BUDOWLI PRZY UŻYCIU NAZIEMNEGO
RADARU INTERFEROMETRYCZNEGO**

**PRECISE STRUCTURE VIBRATION MEASUREMENT USING A GROUND-
BASED INTERFEROMETRIC RADAR**

**Jan Gocal¹, Adam Bałut¹, Rafał Kocierz¹, Przemysław Kuras¹, Łukasz Ortyl¹,
Tomasz Owerko¹, Agata Rączka², Michał Strach¹, Robert Szpyra²**

¹ Katedra Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa, Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie

² Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: interferometria radarowa, monitoring drgań, wibracje konstrukcji, wieże,
kominy, mosty i wiadukty

STRESZCZENIE: Monitoring długotrwałych przemieszczeń i odkształceń obiektów inżynierskich jest jednym z podstawowych zagadnień geodezji inżynierskiej. Jednakże obiekty o wydłużonym kształcie są dodatkowo narażone na występowanie ruchów szybkozmiennych, powodowanych czynnikami atmosferycznymi, sejsmicznymi i wynikającymi z eksploatacji. Szczególnie podatne na drgania są kominy, maszty i wieże oraz przęsła i pylony mostów, zwłaszcza wiszących. Specyfika pomiaru wibracji polega na zapewnieniu odpowiedniej częstotliwości rejestracji danych, dlatego klasyczne techniki geodezyjne, wykorzystywane do pomiaru powolnych ruchów, nie znajdują zastosowania w pomiarze drgań. Ponadto, badanie kinematyki obiektu powinno cechować się wysoką dokładnością oraz możliwością uzyskania obrazu zjawiska dla całego obiektu. Rozwój nowych technologii pozwala coraz lepiej prowadzić badania dynamiki konstrukcji inżynierskich. Duże możliwości posiada naziemny radar interferometryczny, innowacyjne urządzenie, działające w oparciu o technikę skokowej modulacji częstotliwości fali oraz interferometrii mikrofalowej. Dokładność pomiaru przemieszczeń względnych przy użyciu radaru osiąga niespotykane dotychczas wartości. Dodatkowo wysoka częstotliwość rejestracji oraz duży zasięg pomiaru pozwalają zaliczyć to urządzenie do najlepszych narzędzi monitorujących drgania. Artykuł przedstawia wyniki pierwszych w Polsce pomiarów drgań, wykonanych przy użyciu naziemnego radaru interferometrycznego IBIS, będącego własnością Wydziału Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie. Uzyskane rezultaty potwierdzają efektywność omawianej technologii w monitoringu drgań. Testy wykonano na kilku obiektach mostowych oraz wieżowych.

1. NAZIEMNY RADAR INTERFEROMETRYCZNY IBIS

W ostatnich latach możliwości prowadzenia monitoringu przemieszczeń i odkształceń obiektów inżynierskich oraz mas ziemnych poszerzyły się dzięki wykorzystaniu technik radarowych. Na rynku pojawił się innowacyjny system IBIS, opracowany przez włoską

firmę IDS. Nazwa systemu pochodzi od akronimu angielskiej nazwy: *Image by Interferometric Survey*.

Zasada działania systemu IBIS wykorzystuje trzy znane techniki radarowe:

- interferometrię mikrofalową, ang. *microwave interferometry* (IDS, 2008),
- skokową modulację częstotliwości fali, SFCW, ang. *stepped-frequency continuous wave* (van Genderen, 2003),
- radar z syntetyczną aperturą, SAR ang. *synthetic aperture radar* (Skolnik, 1990).

Połączenie tych technik pozwala na uzyskanie zasięgu oraz dokładności pomiaru przemieszczeń, nieosiągalnych przez dotychczas stosowane instrumenty.

System jest produkowany w dwóch wersjach:

- IBIS-S, wykorzystującej dwie pierwsze techniki radarowe,
- IBIS-L, której działanie opiera się na trzech wymienionych technikach.

1.1. Zastosowanie radaru IBIS-S

Podstawowe parametry urządzenia (IDS, 2008):

- częstotliwość fali: ok. 17 GHz (pasmo K_u),
- wykorzystywany zakres fali: do 300 MHz,
- częstotliwość rejestracji danych: do 200 Hz,
- zasięg pomiaru: do 1 km,
- dokładność pomiaru przemieszczeń: 0.1 mm,
- rozdzielczość: maksymalnie 0.5 m.

Instrument w wersji IBIS-S (rys. 1) może być stosowany do pomiaru przemieszczeń obiektów budowlanych (wysokich budynków, mostów, budowli wieżowych). Urządzenie zapewnia możliwość określenia zarówno ruchów powolnych, jak i krótkotrwałych ruchów szybkozmiennych. Pomiar nie wymaga bezpośredniego dostępu do obiektu. Istotną zaletą jest możliwość prowadzenia obserwacji z odległości do 1 km. Biorąc pod uwagę częstotliwość rejestracji danych, można mówić o praktycznie ciągłym zapisie przemieszczeń.



Rys. 1. System IBIS-S pod Mostem Powstańców Śląskich w Krakowie

Podczas pracy radar oświetla obiekt wiązką fal, które zostają rozproszone w miejscach, gdzie struktura obiektu jest niejednorodna. Dzięki wysokiej rozdzielczości urządzenia, wynikiem pomiaru jest obraz przemieszczeń wielu punktów odległych od siebie o minimalną wartość rzędu 0.5 m. Zastosowanie mikrofal pozwala na wykrycie ruchu każdego obserwowanego punktu z dokładnością 0.1 mm. Wysoka czułość urządzenia uzyskiwana jest dzięki zastosowaniu interferometrii, techniki wykorzystującej pomiar różnic faz fal odbitych od powierzchni obiektu.

1.2. Zastosowanie radaru IBIS-L

IBIS-L to system zaprojektowany z myślą o zdalnym pomiarze powolnych przemieszczeń z dokładnością rzędu dziesiątych części milimetra.

Zasada działania urządzenia bazuje na wykorzystaniu radaru interferometrycznego ze skokową modulacją częstotliwości fali (SFCW) oraz sztucznym zwiększeniu rozmiaru anteny dzięki zastosowaniu techniki SAR. Wynikiem pomiaru jest dwuwymiarowy obraz przemieszczeń.

Instrument znajduje zastosowanie w monitoringu terenu (np. osuwiska, zbocza, zapadliska, lodowce, lawiniska, tereny wulkaniczne) oraz wielkich konstrukcji (głównie tamy i zapory).

Głównymi zaletami urządzenia są (IDS, 2008):

- zasięg zdalnej pracy do 4 km,
- dokładność pomiaru przemieszczeń do 0.1 mm,
- otrzymanie dwuwymiarowego obrazu przemieszczeń na obszarze kilku km²,
- rozdzielczość odległościowa: 0.75 lub 1.5 m,
- uzyskanie pełnego obrazu przemieszczeń co kilka minut w czasie rzeczywistym.

2. WYNIKI POMIARU DRGAŃ BUDOWLI PRZY UŻYCIU RADARU IBIS-S

2.1. Wyznaczenie zmian położenia stalowej wieży o konstrukcji rurowej

Celem pierwszego przeprowadzonego pomiaru dynamicznego była rejestracja zmian położenia pod wpływem wiatru jednej z wież oświetleniowych, znajdujących się na Stadionie Miejskim im. H. Reymana w Krakowie. Wysokość obiektu wynosi ok. 45 m. Wieża posiada stalową, rurową konstrukcję nośną o przekroju zmniejszającym się wraz ze wzrostem wysokości. W górnej części obiektu zainstalowany jest zestaw reflektorów oświetleniowych. W dniu eksperymentu wiał dość silny wiatr, co pozwoliło na obserwację wahań wieży.

Rys. 2 przedstawia usytuowanie stanowiska obserwacyjnego względem obiektu. Na podstawie rys. 3 łatwo zauważyć, iż w polu „widzenia” radaru, do wysokości ok. 35 m, znajduje się zadaszenie trybuny stadionu. Przy pomocy bezzwierciadlanego tachymetru Leica TCRP1205 wyznaczono odległość stanowiska od elementów obiektu mogących silnie rozpraszać wiązkę radarową, co pozwoliło wykluczyć punkty nienależące do badanego obiektu, w tym zadaszenie trybuny.

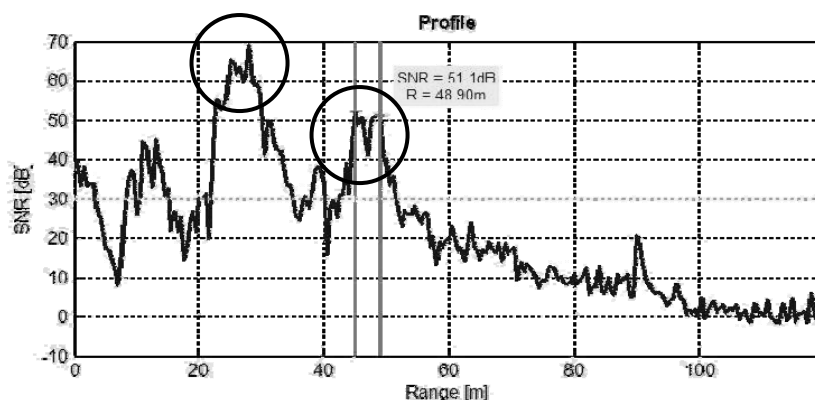
Podczas eksperymentu użyto anten nadawczo-odbiorczych o zysku 20 dBi. Na obiekcie nie instalowano elementów wzmacniających natężenie sygnału odbitego.



Rys. 2. Usytuowanie stanowiska radaru



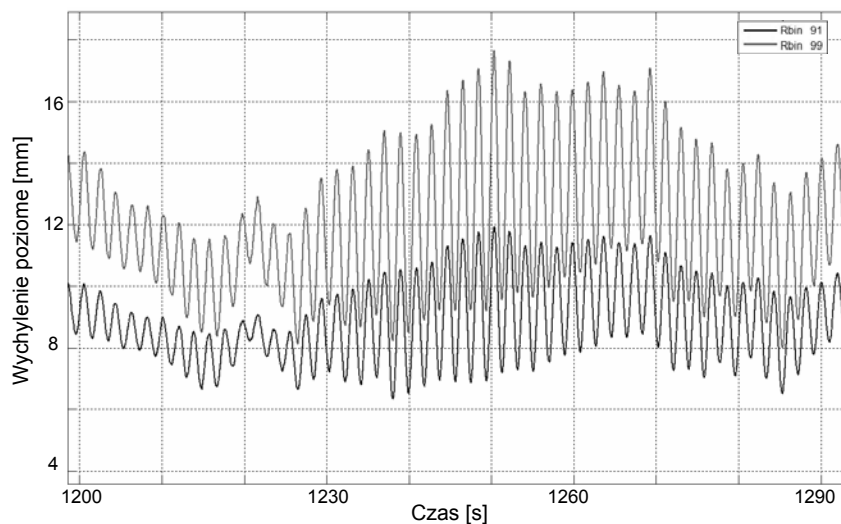
Rys. 3. Widok sceny oświetlanej przez radar IBIS-S



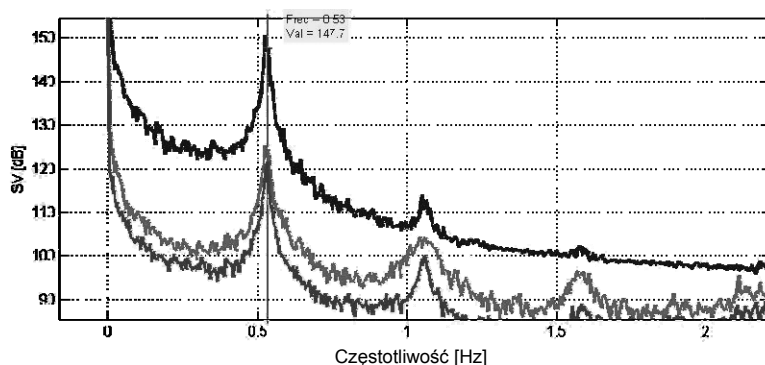
Rys. 4. Wybór punktów do analizy

Na rys. 4 przedstawiono profil radarowy sceny. Wykres przedstawia zależność natężenia sygnału odbitego od odległości między radarem a obserwowanym punktem. Natężenie sygnału wyrażone jest w decybelach i oznacza stosunek sygnału do szumu (ang. *SNR*, *signal to noise ratio*). W odległości 20÷30 m od radaru zaznaczono na wykresie punkty o bardzo silnym sygnale zwrotnym, jednak pochodzącym nie od obiektu, ale od zadaszenia trybuny. Prawym okręgiem na wykresie zaznaczono punkty należące do właściwego obiektu, znajdujące się w odległości 45÷50 m od radaru. Na podstawie wartości natężeń wybrano dwa punkty, których ruch poddano analizie.

Sesja pomiarowa trwała 36 minut. Wartości przemieszczeń punktów, znajdujących się w górnej części wieży (Rbin 91 oraz Rbin 99), nie przekroczyły 11 mm. Ruch tych punktów w przedziale czasu 1198÷1293 s przedstawia rys. 5. Łatwo stwierdzić zgodność w fazie wahań obu punktów oraz większe wartości przemieszczeń punktu znajdującego się wyżej (Rbin 99).



Rys. 5. Wykres drgań dwóch punktów reprezentujących obiekt

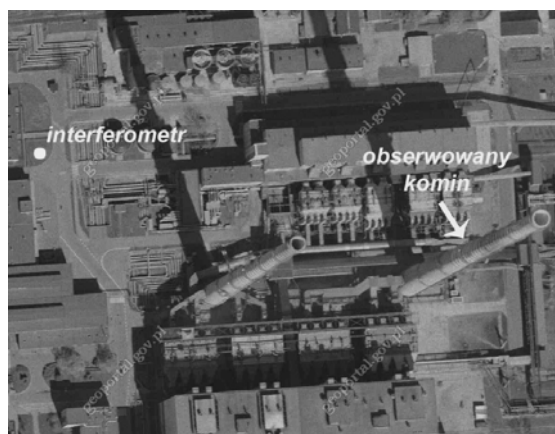


Rys. 6. Wykres częstotliwości drgań punktów wieży, wyznaczonych metodą FDD

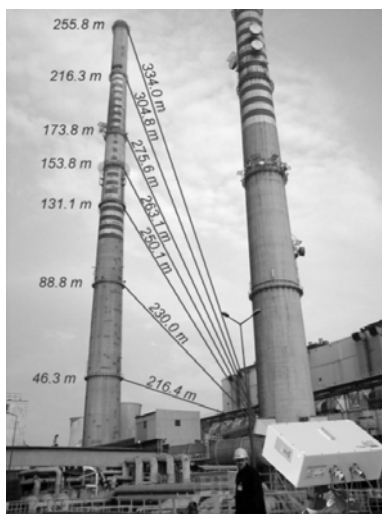
Bardzo wysoka częstotliwość próbkowania pozwala na wiarygodne wyznaczenie częstotliwości wahań obiektu. Zmiany położenia badanego obiektu poddano analizie przy użyciu metody FDD, ang. *Frequency Domain Decomposition* (Brincker *et al.*, 2000). Rys. 6 przedstawia rezultat wyznaczenia częstotliwości drgań badanej konstrukcji. Pod wpływem wiatru wieża wykonywała drgania o częstotliwości 0.53 Hz.

2.2. Badanie dynamiki wieloprzewodowego żelbetowego komina przemysłowego

Jednymi z ciekawszych obiektów pod kątem obserwacji drgań są wysokie kominy przemysłowe. Obiekty te podatne są na statyczne oraz dynamiczne działanie porywów wiatru, powodujących zmęczenie materiału. Istnieje możliwość kontroli stanu konstrukcji trzonu komina np. przez wyznaczenie częstotliwości jego drgań własnych oraz porównanie ich z wartościami teoretycznymi, a także z poprzednimi wyznaczeniami.



Rys. 7. Lokalizacja komina oraz stanowiska interferometru w czasie pomiarów testowych

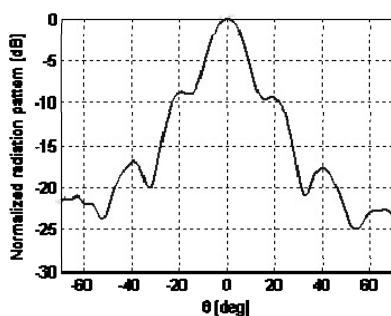


Rys. 8. Odległości między interferometrem a punktami naturalnymi komina

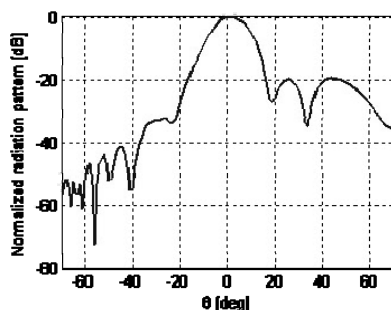
Różnice między tymi wartościami z różnych okresów pomiarowych mogą być wywołane właśnie pogorszeniem się stanu technicznego analizowanego obiektu.

Jednym z pierwszych obiektów, na którym testowano możliwości interferometru radarowego IBIS-S, był 260-metrowy wieloprzewodowy żelbetonowy komin przemysłowy w Elektrociepłowni Łęg w Krakowie (rys. 7). Ze względu na potrzebę zebrania jak największego materiału doświadczalnego pomiar wykonano dwa razy. Pierwszy pomiar zrealizowano z wykorzystaniem anten o zysku 23.5 dBi w porze nocnej (godzina 22:00), przy bezwietrznej pogodzie. Drugi pomiar wykonano dnia następnego o godzinie 13:00. Do pomiaru wykorzystano antenę o zysku 13.5 dBi (rys. 9 i rys. 10).

Na trzonie komina nie instalowano sztucznych punktów pomiarowych w postaci reflektorów rożkowych. Wykorzystano naturalne elementy w postaci galerii i anten znajdujących się na obiekcie. Dla potrzeb ich późniejszej identyfikacji na profilach radarowych wyznaczono ich położenie względem przyrządu przy pomocy tachymetru bezzwierciadlanego TCRP1205 firmy Leica (rys. 8).

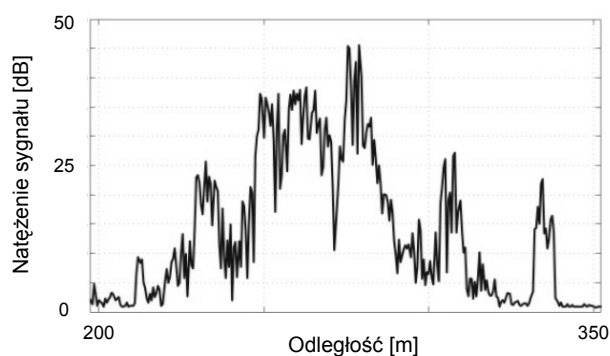


Rys. 9. Charakterystyka anteny o zysku 23.5 dBi

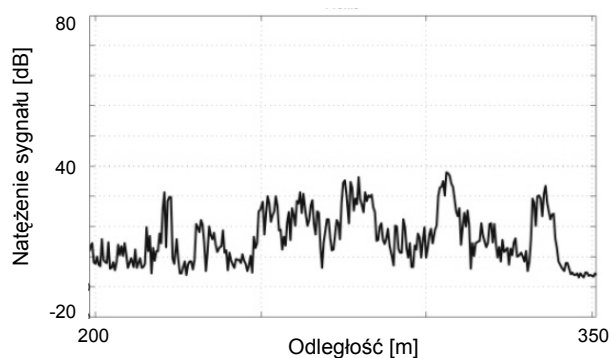


Rys. 10. Charakterystyka anteny o zysku 13.5 dBi

Jak można zauważyć na profilach, antena 13.5 dBi (rys. 12) charakteryzuje się znacznie niższym poziomem mocy sygnału w porównaniu do anteny 23.5 dBi (rys. 11). Jest to bardzo ważna informacja dla potrzeb wykonywania pomiarów w podobnych warunkach. Słabsza antena nie powinna być używana przy pomiarach obiektów oddalonych o więcej niż 200 m, ale będzie się lepiej nadawała do obserwacji obiektów bliższych lub gdy będzie możliwe wykorzystanie reflektorów rożkowych.

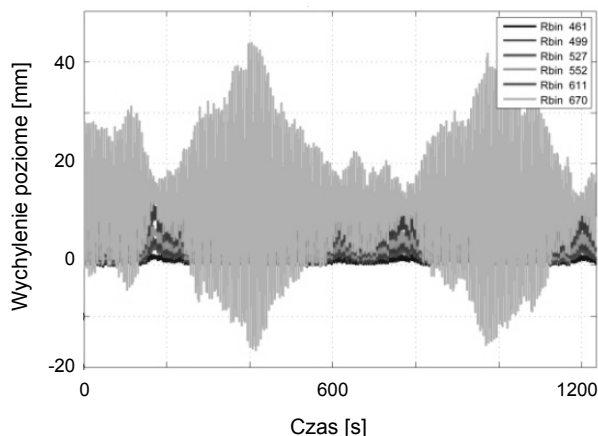


Rys. 11. Profil mocy sygnału dla anteny 23.5 dBi

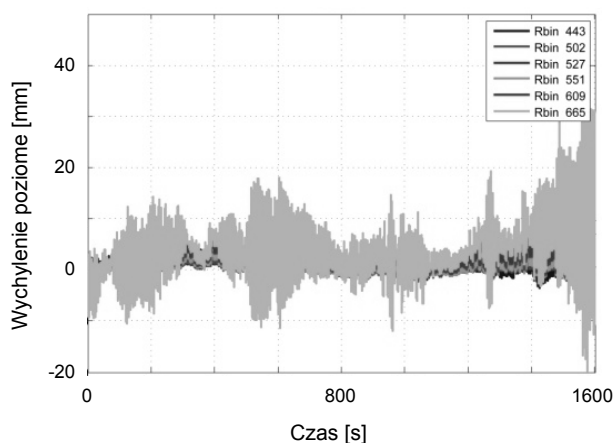


Rys. 12. Profil mocy sygnału dla anteny 13.5 dBi

Jednym z podstawowych wyników jest wykres przemieszczeń punktów trzonu komina w funkcji czasu. W pierwszym dniu amplituda drgań wynosiła 28 mm (rys. 13), a w ciągu obserwacji dnia drugiego zaobserwowano ruchy w zakresie ± 15 mm (rys. 14).



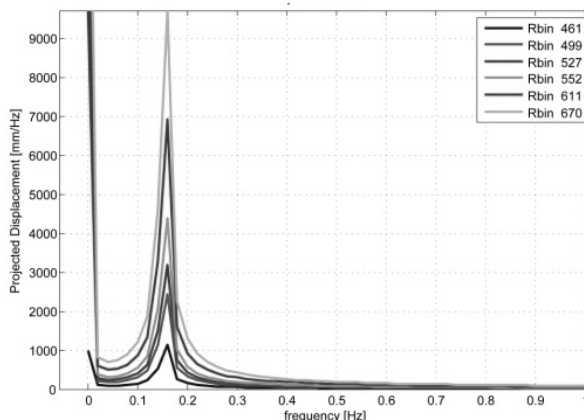
Rys. 13. Wykres przemieszczeń punktów komina – pomiar wykonany anteną 23.5 dBi



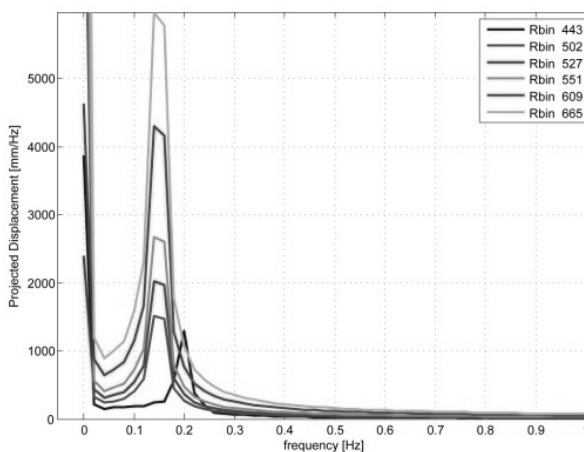
Rys. 14. Wykres przemieszczeń punktów komina – pomiar wykonany anteną 13.5 dBi

Wynikiem końcowym pomiaru przemieszczeń trzonu komina jest wyznaczenie częstotliwości jego drgań. Niezależnie od użytych anten oraz pory dnia analiza Fouriera wykazała, iż drgania występują z częstotliwością ok. 0.15 Hz (rys. 15 oraz rys. 16).

Wykonany pomiar świadczy o dużych możliwościach interferometru w badaniach szybkozmiennych przemieszczeń górnej części komina. Kolejne pomiary tego typu należy przeprowadzić przy silniejszych podmuchach wiatru ze stanowiska umieszczonego w kierunku podmuchu oraz poprzecznego – w celu wychwycenia wpływu wirów Karmana.



Rys. 15. Wykres częstotliwości drgań trzonu komina – antena 23.5 dBi



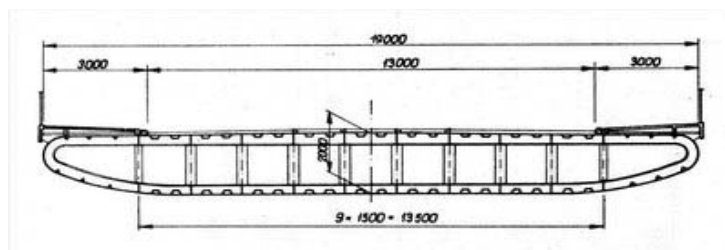
Rys. 16. Wykres częstotliwości drgań trzonu komina – antena 13.5 dBi

2.3. Badania eksperymentalne mostu stalowego

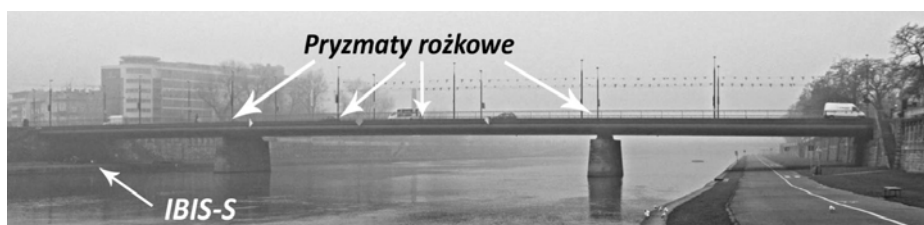
Most Powstańców Śląskich w Krakowie, wzniesiony w latach 70-tych ubiegłego wieku, oparty jest na dwóch podporach dawnego Mostu Krakusa posadowionych na kesonach. Most ma 148 metrów długości i 19 metrów szerokości. Długość przęsła pomiędzy filarami wynosi 68 m. Na moście w każdym kierunku prowadzi 1 pas ruchu samochodowego i torowisko tramwajowe, a po bokach znajdują się chodniki dla pieszych. Most jest konstrukcją stalową, powłokową z płytą ortotropową.

Obiekty powłokowe powstały w wyniku ewolucji konstrukcji skrzynkowych, których płaskie elementy łączone pod kątem poprzez spawanie zastąpiono elementami krzywymi. Dzięki temu uzyskano płynne przejście elementów jednego w drugi, charakteryzujące się

stopniowym rozkładem naprężeń oraz znacznym zmniejszeniem karbu konstrukcyjnego. Przekrój przez konstrukcję Mostu Powstańców Śląskich przedstawiono na rys. 17.



Rys. 17. Przekrój poprzeczny Mostu Powstańców Śląskich



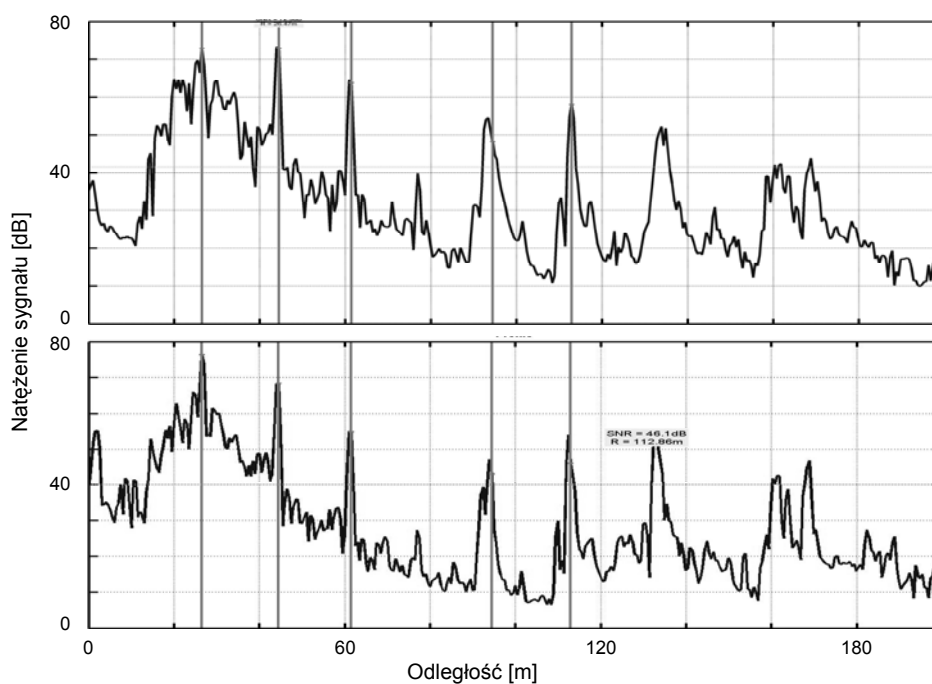
Rys. 18. Widok testowanego obiektu od strony wschodniej

Charakterystyczną cechą tych konstrukcji jest zastosowanie blach poszycia grubości $3\div 12$ mm jako podstawowego elementu nośnego uźebrowanego podłużnie i poprzecznie. Główne zalety konstrukcji powłokowych to: zdolność do przenoszenia znacznych obciążeń, połączenie blach poszycia za pomocą spoin czołowych z możliwością kontroli ich jakości, znaczna smukłość konstrukcji oraz opływowy kształt. Główne wady konstrukcji powłokowych: trudności w montażu, duży hałas przy obciążeniach użytkowych mostów, brak walorów estetycznych, podatność na drgania dynamiczne. Ostatnia cecha przesądziła za obraniem mostu jako celu badań testowych z zastosowaniem interferometru IBIS-S.

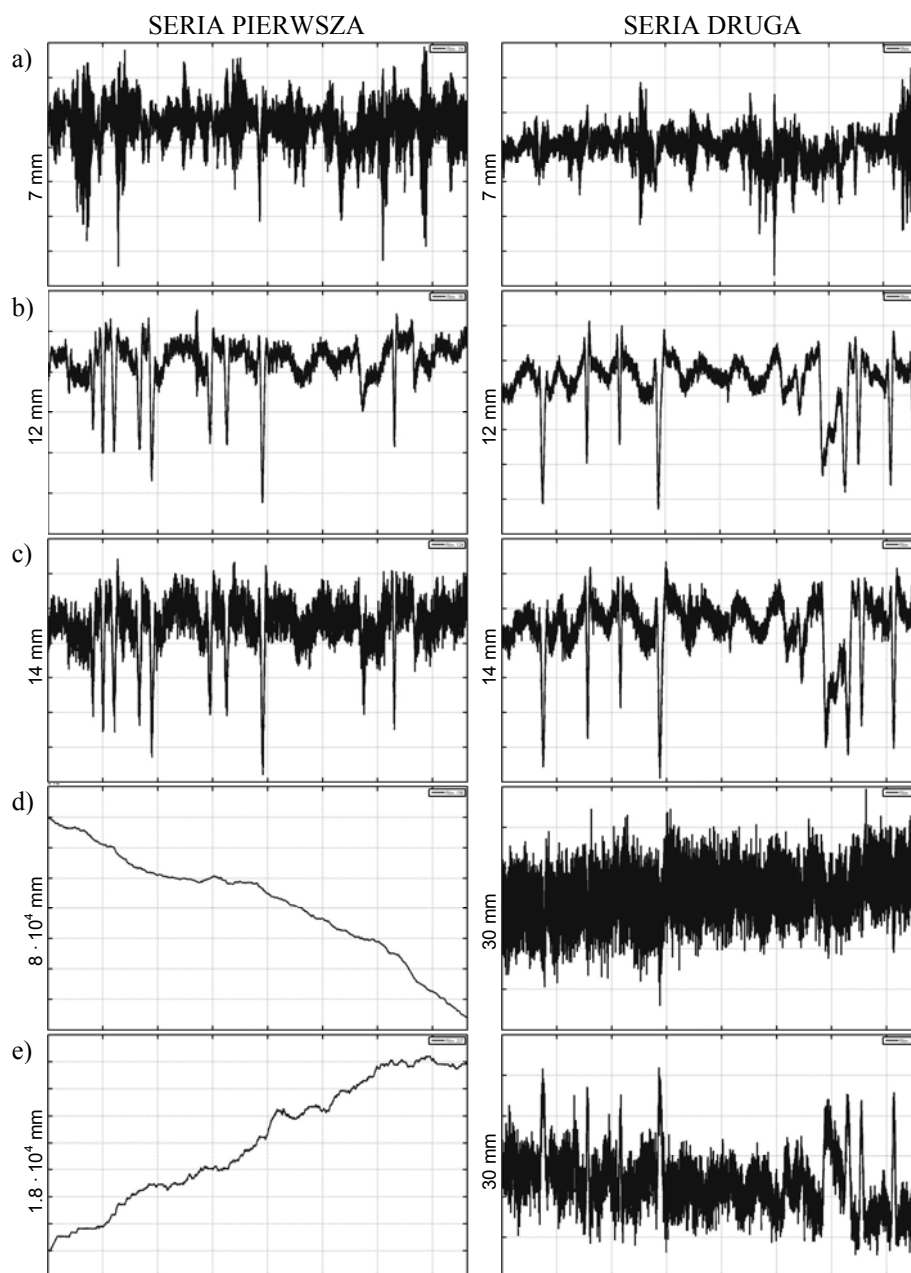
Stanowisko radaru zlokalizowano na południowym brzegu Wisły, od strony Podgórze. Reflektory mikrofalowe różkowe rozmieszczono w czterech charakterystycznych punktach wschodniej krawędzi mostu: nad filarem bliższym stanowiska instrumentu, w $1/4$ i w $1/2$ długości przęsła głównego oraz nad filarem dalszym (rys. 18). Dla potrzeb ich późniejszej identyfikacji na profilach radarowych wyznaczono ich położenie względem radaru przy pomocy tachymetru bezzwierciadlanego TCRP1205 firmy Leica.

Do emisji i odbioru mikrofal wykorzystano różki antenowe IBIS-H23 o najszerszej wiązce – ich kąt rozwarcia dla zysku -3 dB wynosi 38 stopni. Pomiary wykonano dwa razy, przy różnym ustawieniu głowicy radaru, tj. pionowym i poziomym. W przypadku obu ustawień głowicy radaru uzyskano podobny wynik mocy odbicia sygnału od pryzmatów różkowych (rys. 19). Dodatkowo na przedstawionym wykresie uwidaczniają się bardzo silne odbicia w obszarze poza odleglejszym filarem. Dalszej analizie poddano punkty odpowiadające pozycjom pryzmatów oraz jeden z punktów niesygnalizowanych o silnym odbiciu, występujący w odległości 112 m od instrumentu. Punkt ten znajduje się przed przyczółkiem od strony Kazimierza. Poniżej zestawiono wykres przemieszczeń pionowych na poszczególnych punktach obserwowanych, dla obu ustawień głowicy instrumentu, zarejestrowanych w 12.5-minutowym okresie każdy (rys. 20). Dla ułatwienia opracowania

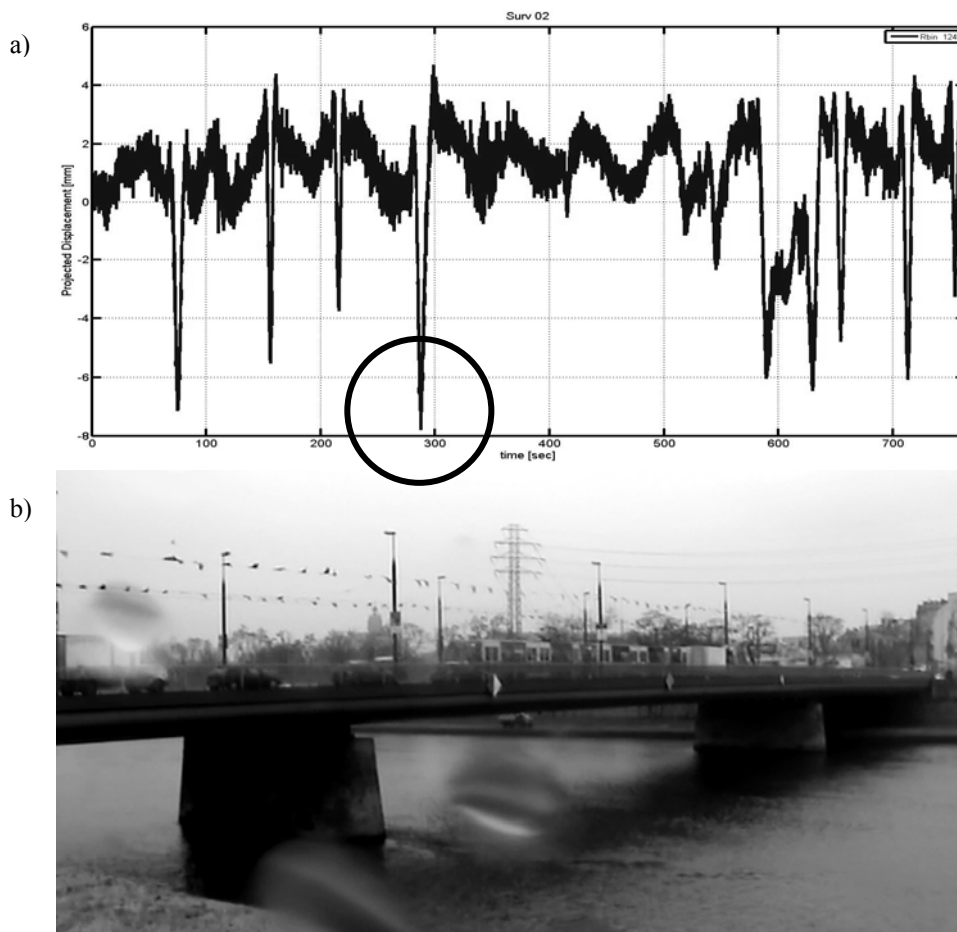
wyników pomiaru i właściwej interpretacji ugięć oraz drgań mostu, w obu przypadkach ruch komunikacyjny na moście rejestrowano kamerą cyfrową (synchronizacja czasów pracy kamery i radaru). Na podstawie zapisu filmowego i korelacji wyników z wykresem ugięć stwierdzono, że wyróżniające się przemieszczenia mostu związane są z najazdem tramwajów na płytę mostu (rys. 21). Największe wartości ugięć ujawniają się w środkowej części przęsła głównego i wynoszą 12 mm. Dla 1/4 jest to wartość rzędu 8 mm, a na filarze bliższym 5 mm. Wynik ten jest powtarzalny bez względu na ustawienie głowicy radaru. Na podstawie zestawionych wykresów widać, że przy poziomym ustawieniu głowicy radaru mniejsze są szумы wynikające z wibracji własnych pryzmatu. Dodatkowo ujawnia się konieczność wysoce stabilnego sposobu montażu pryzmatów. Świadczy o tym wykres zarejestrowany dla 1/4 przęsła, gdzie wykorzystywano reflektor o solidniejszym sposobie montażu niż na pozostałych punktach. Różnica ta uwidacznia dodatkowo czułość systemu IBIS-S w zakresie nawet bardzo drobnych, submilimetrowych wibracji. Niestety nie udało się uzyskać poprawnego wyniku dla czwartego pryzmatu umieszczonego na filarze dalszym. W przypadku pionowego ustawienia głowicy zapis jest kompletnie niejasny tak dla punktu na filarze, jak i na punkcie niesygnalizowanym. W przypadku ustawienia poziomego wynik jest lepszy, ale bardzo silnie zakłócony przez drgania własne.



Rys. 19. Profil mocy sygnału przy pionowym i poziomym ustawieniu głowicy radaru



Rys. 20. Zestawienie przemieszczeń pionowych na poszczególnych punktach obserwowanych: a) filar bliższy, b) 1/4 długości przęsła, c) połowa długości przęsła, d) filar dalszy, e) punkt niesygnalizowany. Oś pozioma – czas pomiaru o długości 750 s, jednakowy dla wszystkich punktów. Oś pionowa – zakres wykresu przemieszczenia.



Rys. 21. Efekt ugięcia przęsła mostu w 287. sekundzie pomiaru z głowicą w układzie poziomym (a), wywołanego przez przejazd 3-wagonowego tramwaju, zarejestrowany na rys. (b)

Przeprowadzona analiza Fouriera wykazała w obu przypadkach ustawienia głowicy, iż na punktach zamocowanych w mniej stabilny sposób, tj. na bliższym filarze i na środku przęsła głównego, ujawnia się częstotliwość drgań rzędu 7 Hz i 8 Hz. Efekt ten nie pojawia się na pryzmacie w 1/4 przęsła. W nim występują drgania o częstotliwości 1.5 Hz, które ujawniają się również, choć nie tak wyraźnie, na pryzmacie charakteryzującym środek przęsła. W przypadku ustawienia głowicy w pionie pojawia się dodatkowo częstotliwość drgań 0.6 Hz. Uzyskane wyniki skłaniają do podjęcia badań nad oceną rzeczywistych charakterystyk anten i optymalizacji pryzmatów rożkowych. Dodatkowo konieczne jest ponowne wykonanie eksperymentu z większą ilością reflektorów o stabilnym mocowaniu.

2.4. Badanie właściwości dynamicznych środkowego przęsła wiaduktu żelbetowego

Kolejnym obiektem wybranym do badań był żelbetowy, trójprzęsłowy wiadukt o długości 76 m, znajdujący się w ciągu drogi krajowej nr 28 w Świnnej Porębie. Każde jego przęsło tworzy płyta o długości 25 m i szerokości 16 m, wzmocniona wzdłużnie od spodu jedenastoma strunobetonowymi belkami. W miejscu łączenia płyt wiadukt jest podparty dwoma rzędami betonowych kolumn, po trzy w rzędzie, o wysokości 14 m każda. Obserwacje wykonano na środkowym przęsle. Reflektory mikrofalowe rozmieszczono w trzech charakterystycznych punktach południowej krawędzi przęsła: nad filarem, w 1/4 i w połowie długości płyty. Taki sposób mocowania wynikał z doświadczenia zdobytego w czasie pomiarów wykonanych na innych obiektach mostowych. Ogólny widok obiektu przedstawia rys. 22.



Rys. 22. Widok ogólny badanego wiaduktu

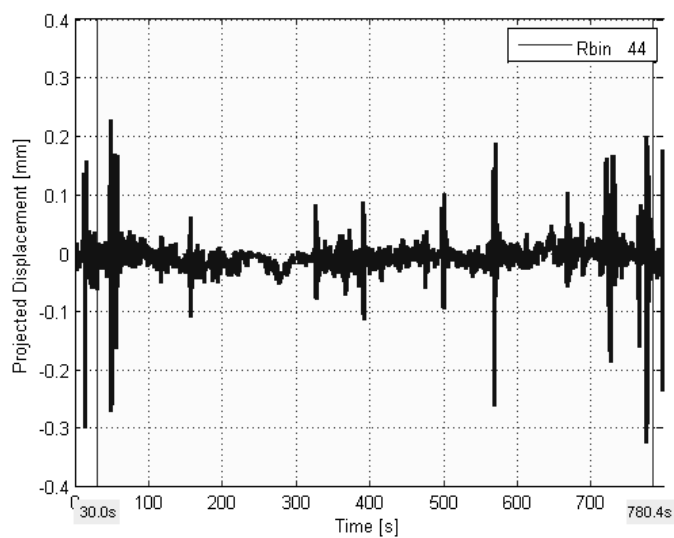
Wykorzystane w pomiarach standardowe reflektory o wysokości krawędzi 200 mm okazały się wystarczające: odbicia od ich powierzchni dały wyraźne, jednoznacznie identyfikowalne maksima w widmie mocy sygnału. Sposób mocowania reflektorów do pionowych podpór barierki, tuż nad płytą mostu, zapewnił przeniesienie szerokiego zakresu widma drgań płyty na reflektor. Staranne zbalansowanie każdego reflektora pozwoliło uniknąć zarówno nadmiernego tłumienia przenoszonych drgań płyty, jak i wzbudzenia niezależnych wahań własnych poszczególnych reflektorów. Widok ogólny i przyjęty sposób mocowania reflektora przedstawia rys. 23.

Wymiary obiektu i szczupłość miejsca w jego bezpośrednim otoczeniu spowodowały, że w czasie pomiarów głowica radaru była ustawiana w płaszczyźnie pionowej, zaś do emisji i odbioru mikrofal wykorzystano różki antenowe IBIS-H13 o najszerzej wiązce – ich kąt rozwarcia dla zysku -3 dB wynosi 38 stopni. Taki dobór elementów pozwolił objąć wszystkie trzy reflektory wiązką promieniowania o wysokiej, praktycznie jednorodnej mocy, co z kolei zapewniło praktycznie jednakową dokładność wyznaczeń drgań przęsła w obserwowanych punktach.

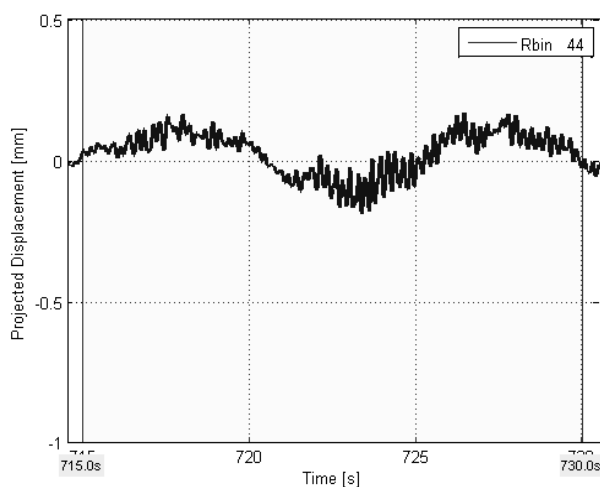


Rys. 23. Sposób zamocowania reflektora mikrofal

Przeprowadzone *in situ* testy wykazały, że częstotliwość próbkowania, równa 50 Hz, jest w przypadku badanego obiektu wystarczająca, gdyż nie stwierdzono mierzalnych amplitud dla drgań o częstotliwościach powyżej 10 Hz.

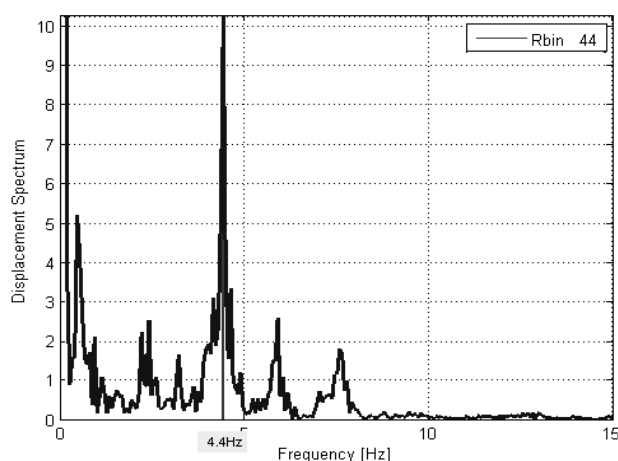


Rys. 24. Ugięcia centralnej części przęsła w okresie 12.5 minuty



Rys. 25. Piętnastosekundowa sekwencja ugięć centralnej części przęsła wywołana przejazdem kolumny samochodów ciężarowych

Sztywność konstrukcji badanego wiaduktu spowodowała, że wyraźne impulsy dawały jedynie powolne przejazdy wielkich ciężarówek. W tym przypadku średni czas przejazdu przez przęsło wahał się w granicach $2\div 3$ sekund, wywołując krótką falę ugięć o porównywalnym okresie i amplitudzie do 0.2 mm, oraz trwającą do 5 sekund sekwencję drgań o maksymalnej amplitudzie rzędu $0.05\div 0.10$ mm i stabilnej częstotliwości 4.4 Hz, które mogą być prawdopodobnie identyfikowane z drganiami własnymi przęsła. Rys. 24 przedstawia wartości ugięć środkowej części przęsła w ciągu jednego z zarejestrowanych okresów, trwającego 12.5 minuty. W tym czasie zarejestrowano cztery epizody ugięć rzędu 0.2 mm i sześć rzędu 0.1 mm. Szczególną uwagę zwraca przejazd kolumny czterech samochodów ciężarowych w okresie $715\div 730$ sekund, przedstawiony na rys. 25.

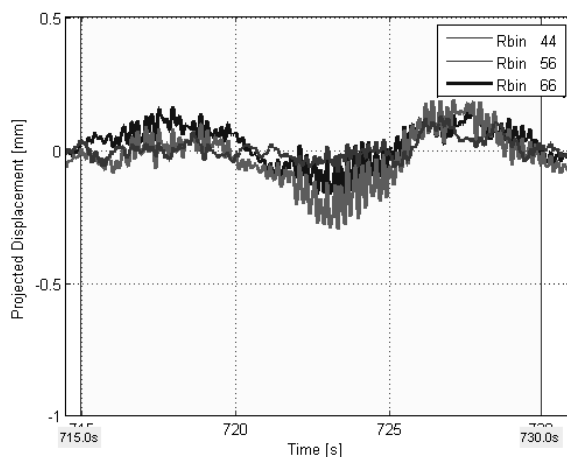


Rys. 26. Analiza widmowa drgań centralnej części przęsła wywołanych przejazdem kolumny samochodów ciężarowych

Mimo nieregularnego, sekwencyjnego wymuszenia częstotliwość 4.4 Hz jest wyraźnie obecna, jak to ilustruje rys. 26. Równie wyraźne jest pasmo subhercowych częstotliwości składowych, modelujących falę ugięcia. Można także wyróżnić kilka częstotliwości (2.4 Hz, 6.0 Hz i 7.5 Hz) o niewielkiej amplitudzie, być może artefaktów wynikających z ruchów reflektora, wymuszonych drganiami mostu.

Obraz przemieszczeń pionowych wszystkich trzech punktów przęsła, w których zainstalowano reflektory, przedstawia rys. 27. Zwraca uwagę charakterystyczny fakt, że najwyraźniejsze przemieszczenia pionowe wystąpiły w 1/4 przęsła (Rbin 56), a nie pośrodku (Rbin 44). Niewykluczone, że jest to wynik specyficznego sposobu obciążania wiaduktu przez kolumnę pojazdów, lub efekt złożenia specyficznych modów vibracji płyty.

Analizy przeprowadzone dla punktów Rbin 56 i Rbin 66 wykazały również, identycznie jak w przypadku Rbin 44 (rys. 26), dominację częstotliwości 4.4 Hz (choć w przypadku reflektora umieszczonego nad punktem podparcia przęsła – Rbin 66 nad filarem – jej amplituda jest wyraźnie niższa), co potwierdza hipotezę, iż jest to prawdopodobnie częstotliwość drgań własnych płyty przęsła.



Rys. 27. Zestawienie przemieszczeń pionowych obserwowanych punktów przęsła

Przedstawione przykładowe wyniki pomiarów ugięć i drgań sztywnej płyty przęsła wiaduktu mostowego ukazują, jak wiele informacji o właściwościach fizycznych badanego obiektu może dostarczyć precyzyjna obserwacja interferometryczna. Liniowy układ trzech reflektorów ogranicza zakres analizy, koniecznym jest rozszerzenie zakresu obserwacji również o reflektory umieszczone po przeciwnej stronie wiaduktu oraz zastąpienie przypadkowych obciążeń wymuszeniem o ściśle mierzalnym charakterze.

3. WNIOSKI

Zaprezentowane urządzenie posiada ogromne możliwości obserwacji zachowań dynamicznych wielkogabarytowych obiektów inżynierskich. Znacząca jest przede wszystkim wysoka częstotliwość rejestracji zmian położenia punktów. Przedstawione

przykłady potwierdzają, iż ona jest w zupełności wystarczająca do prowadzenia obserwacji drgań obiektów wysmukłych – wyznaczone częstotliwości drgań nie przekraczają 10 Hz. Dodatkowo wysoka dokładność umożliwia wychwycenie bardzo niewielkich zmian położenia konstrukcji.

Badania przeprowadzone na obiektach o wysokiej wiotkości dają satysfakcjonujące wyniki, pozwalające opisać ich reakcję na działanie czynników zewnętrznych. Wyraźne wahania o stałej częstotliwości obserwujemy dla wież i kominów. W przypadku mostów stwierdzamy znacznie słabsze drgania dla konstrukcji sztywnych (konstrukcje żelbetowe, stalowe) niż wiotkich (konstrukcje wiszące, podwieszane), jednak możliwy jest monitoring statyczny tych obiektów. Uzyskiwane wyniki mogą posłużyć m.in. do oceny stanu bezpieczeństwa obiektów budowlanych.

4. LITERATURA

Brincker R., Andersen P., Zhang L., 2000. Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition. *Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference*, San Antonio, s. 625-630.

van Genderen P., 2003. Multi-Waveform SFCW radar. *33rd European Microwave Conference*, Monachium, s. 849-852.

IDS. 2008: <http://www.idscompany.it>

Skolnik M.I., 1990. *Radar Handbook*. McGraw-Hill, rozdz. 21, s. 1-23.

Artykuł finansowany z badań statutowych AGH nr 11.11.150.005.

PRECISE STRUCTURE VIBRATION MEASUREMENT USING A GROUND-BASED INTERFEROMETRIC RADAR

KEY WORDS: radar interferometry, vibration monitoring, construction vibration, towers, chimneys, bridges and viaducts

SUMMARY: Monitoring of long-term displacements and deformations of engineering objects is one of the main problems of engineering surveying. However, objects of a slender shape are additionally exposed to fast-variable movements, caused by atmospheric, seismic and operation factors. Particularly susceptible to vibration are chimneys, masts and towers, and also spans and pylons of bridges, especially of suspension bridges. The specificity of vibration measurement is to ensure the appropriate frequency of recording data. Hence, classical surveying techniques used to measure slow movements are not applied to vibration measurement. In addition, the kinematics tests should be performed with a high accuracy and should enable obtaining the whole object deformation image. The development of new technologies makes it possible to better investigate engineering structures dynamics. It is the ground-based interferometric radar, an innovative device, operating on the basis of the stepped-frequency continuous wave modulation technique and the microwave interferometry that has a great potential as regards that investigation. The measurement accuracy of relative movements with the use of the radar amounts to unprecedented values. Moreover, high frequency of recording and a large range of measurement allow classifying this device among the best vibration monitoring tools. The article presents results of the first vibration measurements made in Poland using the IBIS ground-based interferometric radar, owned by the Faculty of Mining Surveying and Environmental Engineering of AGH University of Science and Technology. The effectiveness of the discussed technology in vibration monitoring is confirmed by the obtained results. Tests were performed on several bridge and tower structures.

Prof. dr hab. inż. Jan Gocał
e-mail: jangocal@agh.edu.pl
tel. +12 6174486

Dr inż. Tomasz Owerko
e-mail: owerko@agh.edu.pl
tel. +12 6172280

Dr inż. Adam Bałut
e-mail: abalut@agh.edu.pl
tel. +12 6172269

Agata Rączka
tel. +12 6174486

Mgr inż. Rafał Kocierz
e-mail: kocierz@agh.edu.pl
tel. +12 6172299

Dr inż. Michał Strach
e-mail: strach@agh.edu.pl
tel. +12 6172314

Mgr inż. Przemysław Kuras
e-mail: kuras@agh.edu.pl
tel. +12 6172279

Robert Szpyra
e-mail: oring1@o2.pl

Dr inż. Łukasz Ortyl
e-mail: lukasz.ortyl@agh.edu.pl
tel. +12 6172299