

## MULTIMODALNE POMIARY DRGAŃ STRUNY

Marta STEFANIAK, Witold NOSOROWSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki  
tel.: 58-347-19-67 e-mail: mars@multimed.org

**Streszczenie:** W artykule zostały przedstawione badania drgań struny zrealizowane przy użyciu szybkich kamer wizyjnych, mikrofonu oraz akcelerometru. Obiektem badań były instrumenty muzyczne. Opisano zjawiska zachodzące w instrumencie podczas tworzenia się i wydobywania z niego dźwięku. Celem pracy było zbadanie różnic w wynikach otrzymanych poprzez pomiary wykonane z użyciem zróżnicowanych reprezentacji obrazowych i sygnałowych. Zaproponowano sposób pobudzania instrumentu, który pozwolił na wykonywane badań w sposób powtarzalny. Opisano metodologię wykonanych pomiarów oraz algorytm do analizy pomiarów wykonanych metodą optyczną, który umożliwił przetworzenie zarejestrowanego obrazu na sygnał foniczny. Na koniec zaprezentowano otrzymane wyniki z wszystkich modalności oraz wnioski z analiz.

**Słowa kluczowe:** szybka kamera, gitara, struna, drgania.

### 1. WPROWADZENIE

W gitarach akustycznych pobudzone struny przenoszą drgania na pudło rezonansowe, które wytwarza fale akustyczne. Następnie fale akustyczne odbierane są jako dźwięk. Energia kinetyczna struny zmienia się na energię kinetyczną w strukturze gitary. Duża powierzchnia gitary pozwala na przeniesienie energii kinetycznej z wnętrza gitary do powietrza w postaci fal ciśnienia. Ciśnienie wytworzone w otaczającym powietrzu jest proporcjonalne do poruszającej się powierzchni. Gitara akustyczna wytwarza dźwięk zarówno poprzez emitowanie go z płyty rezonansowej (fale rozchodzą się promieniście) w sposób podobny do głośnika, jak i przez emitowanie go z otworu rezonansowego, czyli poprzez wyprowadzanie powietrza znajdującego się w gitarze w drgania z częstotliwością rezonansową. Płyta wierzchnia gitary jest cienką płytą, typowo 2,5 mm o wzmocnionej strukturze na wewnętrznej powierzchni. Zazwyczaj boki wykonane są z cieńszego drewna, aby ułatwić uginanie się powierzchni. Struktura ta jest wystarczająco elastyczna, aby wibrować w odpowiedzi na drgające struny [1]. Bardzo istotnym elementem gitar akustycznych jest otwór rezonansowy, ponieważ emituje on dźwięk oraz działa jako element strojący powietrze wewnątrz gitary [2]. Powietrze wewnątrz korpusu ma swoją masę oraz sztywność, które wpływają na dynamiczną reakcję instrumentu. Pudła rezonansowe odpowiadają za barwę i głębię dźwięków. Wibrujące struny za pomocą mostka w sposób mechaniczny przekazują energię do drewnianych części gitary. Powoduje to wibracje struktury instrumentu, a następnie emisję dźwięku i pobudzenie powietrza wewnątrz gitary.

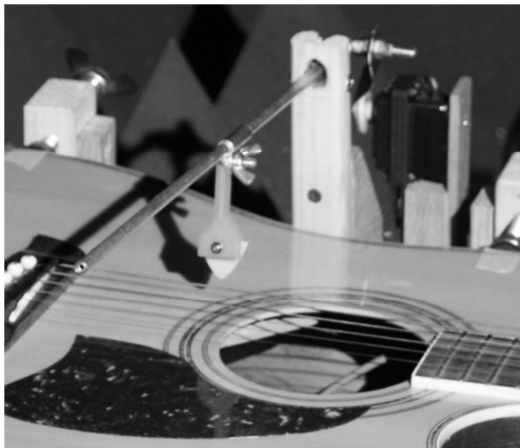
Podobnie jak każda inna struktura, gitara również posiada swoje częstotliwości rezonansowe, czyli takie które będą mocniej wzmacniane. W przypadku strun te częstotliwości będą w przybliżeniu równe całkowitym wielokrotnościom najniższej częstotliwości, nazywanej częstotliwością podstawową. Drgająca struna przekazuje energię kinetyczną do korpusu gitary, który drgając wzbudza powietrze wewnątrz pudła rezonansowego. Struna gitarowa bardzo dobrze przechowuje energię, jednak z ledwością promieniuje jakikolwiek dźwięk, zasadniczo bez pudła rezonansowego byłaby ona ledwo słyszalna. Wynika to z faktu, że struna drgając w jednym kierunku odpycha cząsteczki powietrza na bok tworząc obszar ujemnego ciśnienia, który redukuje promieniowanie dźwięku do otoczenia. Dzięki pudłu rezonansowemu dźwięk drgającej struny jest słyszalny [3]. Energia ze struny jest przekazywana na płytę wierzchnią i mostek, a te następnie przekazują ją na płytę spodnią, ożebrowanie oraz powietrze wewnątrz pudła. Dźwięk jest promieniowany przez otwór rezonansowy i płytę wierzchnią. Gitarę można rozpatrywać jako układ połączonych ze sobą elementów drgających [4].

### 2. POMIARY MULTIMODALNE

#### 2.1. Wykorzystany sprzęt

Do wykonania dokładnych pomiarów potrzebny był uchwyt do gitary umożliwiający utrzymanie instrumentu nieruchomo podczas całego pomiaru, jednocześnie koniecznym było umożliwienie przymocowania do uchwyty stworzonego ramienia do pobudzania struny. Ze względu na pomiary drgania płyty wierzchniej uchwyt nie mógł dotykać górnej części gitary. W tym celu przygotowano dedykowany statyw do gitary utrzymujący instrument poprzez ściśnięcie boków instrumentu.

Opracowano zautomatyzowany sposób pobudzania struny, aby uzyskać możliwie powtarzalne pobudzenia struny podczas każdego pomiaru. Wykorzystano serwomechanizm firmy Hitec oraz mikrokontroler ATmega8L, który sterował silnikiem ramienia. Do ramienia została zamocowana kostka gitarowa, która pobudzała strunę ruchem naśladującym szarpnięcie struny ludzką ręką. Na rysunku 1 przedstawiono wygląd ramienia do pobudzania strun.



Rys. 1. Ramię do pobudzania strun gitarowych

## 2.2. Badane instrumenty

Do przeprowadzonych badań wybrano trzy gitary akustyczne o różnych kształtach pudła rezonansowego, zbadane zostało drganie otwartej struny E<sub>6</sub>, której częstotliwość wynosi 82,407 Hz [5]. Dwie z nich to identyczne modele tego samego producenta o korpusach typu Dreadnought, jednak jeden z nich posiada wycięcie w pudle rezonansowym, pozwalające na dostęp ręki do wysokich progów (ang. Cutway) [6]. Natomiast trzeci instrument posiada korpus typu Jumbo, który jest znacząco większy od korpusu typu Dreadnought.

Badane gitary akustyczne:

- gitara 1 - Oscar Schmidt OG2CE,
- gitara 2 - Oscar Schmidt OG2,
- gitara 3 - T.Burton J-0-BS.

## 2.3. Układ pomiarowy

Do pomiarów wykorzystano stację roboczą z takimi elementami jak: Framegrabber; karta przetworników a/c; macierz dysków. Do przechwytywania sygnałów użyto oprogramowania: HL Grab, NI MAX. Do rejestracji sygnałów użyto: mikrofon B&K 4189-A-021 typ 2671; akcelerometr B&K 4514-B; 2 szybkie kamery Basler acA2000-340kc; obiektywy VS LD35 z pierścieniami Goyo Optical EXT-ULSET o długości 10mm. Na rysunku 2 przedstawiono rozmieszczenie elementów układu pomiarowego podczas rejestracji sygnałów.



Rys. 2. Rozmieszczenie elementów układu pomiarowego

Szybkie przemysłowe kamery pozwoliły na rejestrację drgań wybranych punktów mierzonego przedmiotu. W celu poprawnej rejestracji sygnałów korpusy kamery musiały być ustawione prostopadle do struny. Mając widok z dwóch kamer możliwa była rekonstrukcja położenia przestrzennego struny. Rejestrując obraz z tylko jeden kamery nie jest widoczna składowa ruchu prostopadła do osi kamery. Mikrofon został umieszczony na oddzielnym statywie i skierowany prostopadle do miejsca na strunie, które było rejestrowane przez kamery. Odległość mikrofonu od struny wynosiła około 10 cm. Wykorzystywany mikrofon jest przeznaczony do precyzyjnych pomiarów pola swobodnego, w warunkach gdzie wymagany jest mikrofon o dużej czułości. Akcelerometr umieszczono na mostku po stronie pobudzanej struny. Mostek przenosi drgania struny na pudło rezonansowe, przez co oscylowania w tym właśnie miejscu powinny być większe niż na samym pudle. Koniecznym było, aby oświetlenie było zasilane stałym prądem, ponieważ prąd zmienny powoduje migotanie, które byłoby widoczne na zarejestrowanym obrazie. Wybrano dwa punktowe źródła oświetlenia, które umożliwiły uzyskanie skupionego, bardzo jasnego światła.

## 2.4. Metodologia pomiarów

Pomiary zostały wykonane w komorze bezchłowej, ze względu na konieczność zachowania jak najbardziej zbliżonych warunków otoczenia podczas wszystkich pomiarów oraz aby wyeliminować niepożądane dźwięki z otoczenia. Gitara została umocowana nieruchomo w dedykowanym statywie. W celu włączenia generatora do obsługi kamer użyto program NI MAX. Generator służył do przekazywania impulsów z wyznaczoną częstotliwością do kamer, które odbierały sygnał i rejestrowały klatki obrazu z ustawioną częstością. Skorzystano z programu HL Grab służącego do przechwytywania sygnałów obrazu, dźwięku i danych z akcelerometru. Program ten został stworzony w katedrze Systemów Multimedialnych przez pracowników tej katedry. Rejestrowano pliki wideo o długości 10 sekund, co dało około 40000 klatek obrazu z każdej kamery. Wykorzystywany program zapisywał pliki dźwiękowe o długości 10 sekund oraz dane z akcelerometru o tej samej długości trwania. Wybrano taką długość trwania, aby zarejestrować dźwięk łącznie z fazą wybrzmiewania dźwięku instrumentu. Zarejestrowano zbiór sygnałów powstałych z 3 gitar akustycznych z czego każdą z gitar przebadano 3 krotnie, aby móc wyeliminować ewentualnie powstałe nieprawidłowości podczas rejestracji i uśrednić wyniki pomiarów.

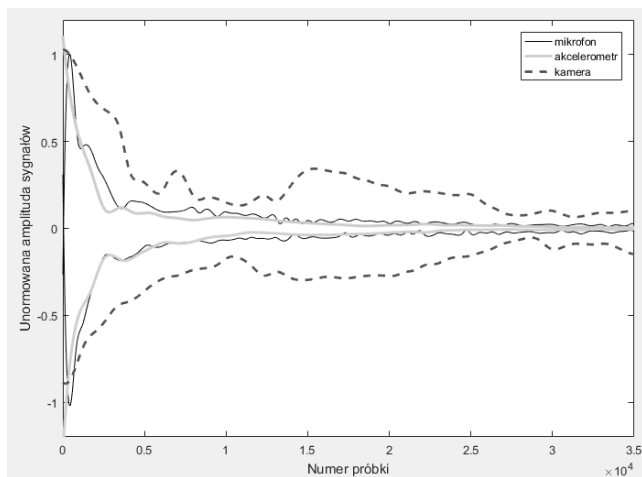
## 3. ALGORYTM ANALIZY POMIARÓW

Celem analizy obrazu było przygotowanie nagrań audio na podstawie obrazu zarejestrowanego przez dwie szybkie kamery. W tym celu należało przetworzyć nagranie wideo, aby otrzymać przebieg drgania struny. Skrypt uruchamiany w środowisku obliczeniowym MATLAB przetwarzał dane zapisane w formacie bezstratnym i wykrywał drganie struny w nagraniu. Skorzystano z metodologii przetwarzania sygnałów, które zostały zaprezentowane i opisane w artykule dotyczącym wykorzystania szybkich kamer do rejestracji drgania strun [7]. Uzyskane przebiegi dały obraz przedstawiający w jaki sposób struna drgała z uwzględnieniem trzech płaszczyzn. Dzięki temu obrazowi odtworzono dźwięk drgającej struny, który posłużył do porównania z pozostałymi zarejestrowanymi sygnałami.

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW

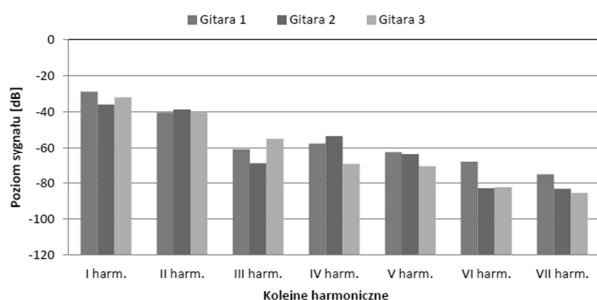
Celem badań było określenie różnic pomiędzy badanymi instrumentami oraz przydatności zaproponowanych metod do badań zjawisk zachodzących w gitarach podczas powstawania i emisji dźwięku.

Na rysunku 3 przedstawiono obwiednie sygnałów zarejestrowanych przy pomocy różnych modalności. Na osi y przedstawiona została amplituda unormowana dla każdego sygnału z osobna, natomiast oś x reprezentuje kolejne próbki sygnału. Obserwując przebieg obwiedni można zauważyć, że obwiednia sygnału z kamery ma zbliżony kształt do obwiedni sygnału z akcelerometru. Tylko na widmie sygnału z mikrofonu można wyróżnić fazę ataku.



Rys. 3. Obwiednie sygnałów zarejestrowanych przy pomocy różnych modalności dla gitary 3

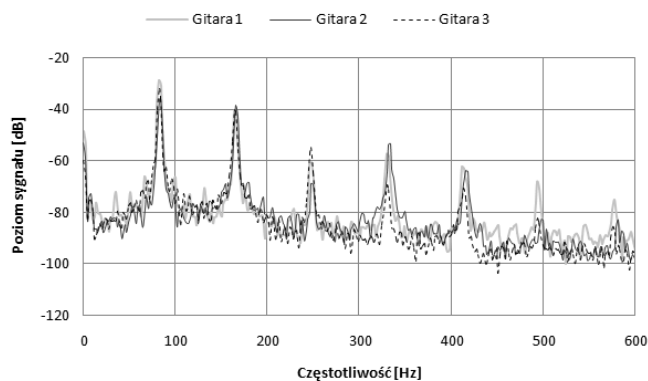
Na rysunku 4 przedstawiono uśrednione poziomy poszczególnych harmonicznymi dla wszystkich przebadanych gitar. Dla gitary 3 każda kolejna harmoniczna ma niższą wartość, w przypadku pozostałych gitar odstępstwem od takiej tendencji jest jedynie III harmoniczna, która jest niższa od IV. Powodem tego prawdopodobnie jest fakt, że gitary 1 i 2 mają bardzo zbliżone konstrukcje i pochodzą od tego samego producenta.



Rys. 4. Wykres przedstawiający uśrednione poziomy 7 składowych harmonicznymi z kamery dla wszystkich gitar

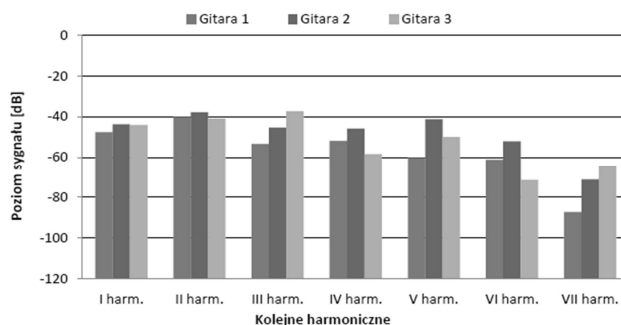
Na rysunku 5 przedstawiono uśrednione widma częstotliwościowe uzyskane z pomiarów dla każdej badanej gitary. Analizując przedstawione wyniki warto zwrócić uwagę na brak zakłóceń w sygnale, przedstawia on jedynie składowe harmoniczne dla pobudzonej struny. Dzięki temu, w łatwy sposób można wyszczególnić różnice pomiędzy poszczególnymi instrumentami. Widać, że poziomy pierwszych dwóch harmonicznymi dla wszystkich badanych instrumentów są do siebie zbliżone oraz, że największe

różnice pomiędzy tymi instrumentami występują w poziomach kolejnych składowych harmonicznymi.



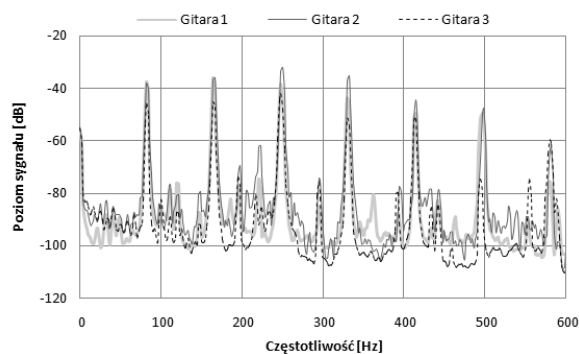
Rys. 5. Uśredniona charakterystyka częstotliwościowa sygnałów dźwiękowych odtworzonych na podstawie obrazu z kamery

Na rysunku 6 przedstawiono poziomy kolejnych badanych składowych harmonicznymi dla każdej gitary, które uzyskano z uśrednienia wyników uzyskanych w każdym pomiarze wykonanym mikrofonem pomiarowym. Można zauważyć, że w przeciwieństwie do wyników otrzymanych przy pomocy kamery nie da się zaobserwować równomiernego spadku poziomów kolejnych harmonicznymi, są one zróżnicowane.



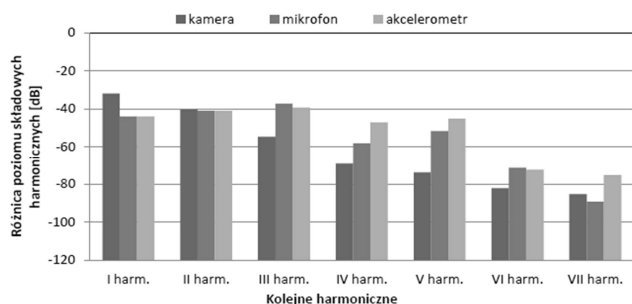
Rys. 6. Wykres przedstawiający uśrednione poziomy 7 składowych harmonicznymi z mikrofonu dla wszystkich gitar

Na rysunku 7 zaprezentowano uśrednione widma sygnałów z akcelerometru dla wszystkich mierzonych gitar. Można zauważyć, że poza składowymi harmonicznymi badanej struny, w sygnale, uwydatniają się inne składowe częstotliwościowe, są one widoczne na pomiarach każdej gitary.



Rys. 7. Uśredniona charakterystyka częstotliwościowa dla sygnałów z akcelerometru

Na rysunku 8 przedstawiono uśrednione poziomy składowych harmoniczných z gitary 3, taki sposób prezentacji wyników pozwala na łatwiejszą obserwację zależności pomiędzy poziomami harmoniczných niż w przypadku obserwacji całego widma częstotliwościowego badanego sygnału. Wyniki zarejestrowane dla II harmoniczných mają podobne poziomy, ponieważ dane pomiarowe zostały znormalizowane względem tej harmoniczných. Poziomy harmoniczných z kamery maleją wraz ze spadkiem częstotliwości. Można zauważyć, że poziom I harmoniczných dla sygnału zarejestrowanego za pomocą kamery jest wyższy w porównaniu z pozostałymi modalnościami, jednak w przypadku kolejnych harmoniczných można zaobserwować wzrost poziomu dla mikrofonu i akcelerometru.



Rys. 8. Uśrednione poziomy składowych harmoniczných dla gitary 3 z pomiarów za pomocą różnych modalności

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Analizując wyniki otrzymane z pomiarów multimodalnych można stwierdzić, że tylko mikrofon zarejestrował fazę ataku. Różnice w poziomach harmoniczných pomiędzy sygnałami z kamery a pozostałymi modalnościami najprawdopodobniej wynikają z faktu, że w odpowiedzi instrumentu zarejestrowanej przez akcelerometr i mikrofon pewne składowe zostają wzmacnione przez pudło rezonansowe gitary. Sygnał z kamery jest pozbawiony dodatkowych rezonansów, ponieważ jest on pobudzeniem pojedynczej struny, w przeciwieństwie do pozostałych modalności. Wyniki jednoznacznie wykazują istnienie różnic w brzmieniu badanych instrumentów.

## MULTIMODAL STRING VIBRATION MEASUREMENTS

The article presents string vibration measurements carried out using fast vision cameras, a microphone and an accelerometer. Various types of acoustic guitars were selected for testing. The phenomena occurring in the instrument during the creation and extraction of sound from it were described. The aim of the study was to examine the differences in the results obtained through measurements made with different modalities and to determine which method gives the most accurate results. The measurements were carried out in an anechoic chamber, due to the need to maintain the closest possible ambient conditions during all measurements. A method of stimulating the instrument was proposed, which allowed for repeated tests. High-speed industrial cameras have enabled the recording of vibrations of selected points of the measured object. The work describes the methodology of measurements taken and the algorithm for analyzing measurements made using the optical method, which enabled the recorded image to be converted into an audio signal. The process of developing measurement data was discussed. Finally, the results obtained from all modalities and conclusions from the analyses were presented, and the possibilities of further experiments were proposed.

**Keywords:** fast camera, guitar, string, vibrations.

W trakcie analiz zauważono, że gitara o największym pudle rezonansowym w większości przypadków nie dostarczała wyższego poziomu sygnału niż pozostałe badane instrumenty, jak wstępnie oczekiwano. Warto zauważyć, że była ona wykonana z innego materiału niż pozostałe instrumenty, co mogło znacząco wpłynąć na uzyskane wyniki.

W następnych badaniach można zmienić umiejscowienie akcelerometru i sprawdzić jak zmieniają się drgania w różnych miejscach instrumentu. Możliwością rozwoju badań przy pomocy szybkich kamer może być skierowanie ich na inne elementy w korpusie gitary i zarejestrowanie ich drgań.

Przedstawione zagadnienia mogą służyć dokładniejszemu poznaniu rozchodzenia się drgań instrumentów i wpływu poszczególnych elementów instrumentu na brzmienie. Dzięki tym metodom można badać współczynniki drgań poszczególnych materiałów, co umożliwiłoby określenie przydatności danego materiału do zastosowań powiązanych z szerzej pojętą akustyką. Pomiar kilkoma modalnościami może pozwolić na wczesne wykrycia usterek monitorowanych systemów przemysłowych.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Krupiński M.: I gra gitara, czyli o fizyce gitary, Foton 99, 2007.
2. French R. M.: Technology of the Guitar, Springer Science+Business Media, New York 2012.
3. Bader R.: Computational Mechanics of the Classical Guitar. Springer, Berlin, Germany 2005.
4. Rossing T. D.: The Science of String Instruments. Springer, Stanford, USA 2010.
5. French R. M.: Engineering the Guitar Theory and Practice, Springer Science+Business Media, New York 2009.
6. Góralski A.: Gitara akustyczna. GS MEDIA, Wrocław 1996.
7. Kotus J., Szczuko P., Szczodrak M., Czyżewski A.: Application of fast camera to string vibrations recording, 2015 Signal Processing (SPA), Poznań, 2015.