

Witold MICKIEWICZ, Michał Jakub JABŁOŃSKI
 ZACHODNIOPOMORSKI UNIWERSYTET TECHNOLOGICZNY W SZCZECINIE,
 Al. Piastów 17, 70-310 Szczecin

Zautomatyzowany system do przestrzennego obrazowania pola akustycznego

Dr inż. Witold MICKIEWICZ

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej (mgr inż. 1994, dr inż. 1999) oraz Wydziału Instrumentalnego Akademii Muzycznej w Poznaniu (mgr sztuki 2000). Adiunkt w Katedrze Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki WE ZUT. Zainteresowania naukowe koncentrują się wokół inżynierii dźwięku. Obecnie związany z natężeniową i laserową techniką obrazowania pól akustycznych.



e-mail: witold.mickiewicz@zut.edu.pl

Mgr inż. Michał Jakub JABŁOŃSKI

W 2011 ukończył studia magisterskie na Wydziale Elektrycznym Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego na kierunku Elektronika i Telekomunikacja. Aktualnie uczestnik studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym, w Katedrze Inżynierii Systemów, Sygnałów i Elektroniki. Zainteresowania badawcze: akustyka wektorowa, przetwarzanie sygnałów, układy FPGA.



e-mail: michal.jablonski@zut.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono zautomatyzowany system do przestrzennego obrazowania wektorowego pola akustycznego. Omówiono podstawy jego funkcjonowania wraz z implementacją. Zawarto dyskusję dot. optymalizacji stosowanych algorytmów w celu ich przystosowywania do pracy na jednostkach obliczeniowych różnej mocy. Zaprezentowano wizualizacje dla dwóch modeli wykonane za pomocą nowego systemu oraz przeanalizowano osiągnięty zysk czasowy wynikający z jego użycia w porównaniu z systemem wcześniej stosowanym.

Słowa kluczowe: natężenie dźwięku, automatyzacja, przyrząd wirtualny.

Automatised system for spatial visualisation of acoustic field

Abstract

In the paper an automatised system for spatial visualisation of the vector acoustic field is presented. There is discussed the theoretical basis of vector acoustic field visualization based on a vector parameter which is the sound intensity (formula (1)). The measuring method and practical implementation of the system which uses an intensity probe – Microflown USP are described. The presented system was created using the LabVIEW programming environment as two virtual instruments. The first virtual instrument integrates the acquisition and positioning blocks based on a DAQ card and a translating unit driver ISEL. The second instrument is responsible for converting the pressure and velocity components into the vector of sound intensity. This part is the most computationally complex operation performed by the system. The paper includes a discussion about optimisation of the used algorithms in order to adapt them to work on different class computing machines. There is proposed a serial and parallel solution of computing the sound intensity (Fig. 1). At the end of the paper a sample visualisation carried out by the new system for two models is presented and the time benefit of using the new system comparing to the old one is analysed.

Keywords: sound intensity, automatisation, virtual instrument.

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach zaobserwować można ciągle wzrost ilości badań elementów i systemów technicznych objętych badaniami pod kątem właściwości i parametrów akustycznych. Powszechnie stosowanymi parametrami używanymi do opisu właściwości akustycznych urządzeń i systemów są różnego rodzaju pochodne wielkości skalarnej, jaką jest ciśnienie akustyczne. Aparatura do pomiarów ciśnienia akustycznego jest powszechnie dostępna i jedynym wymaganym przetwornikiem jest pomiarowy mikrofon pojemnościowy. Jednak wnioskowanie na podstawie ciśnienia obarczone jest z reguły przyjęciem wielu założeń upraszczających dotyczących m.in. kształtu powierzchni falowych wokół źródeł itp. Ponadto obserwacja samego ciśnienia, a nawet jego rozkładu przestrzennego, nie daje pełnej informacji o źródłach dźwięku i ich właściwościach. Pełny obraz zjawisk akustycznych w badanym

obszarze może dać jedynie obserwacja przestrzennych przepływów energii akustycznej. Związane jest to z koniecznością pomiaru zarówno ciśnienia akustycznego – wielkości skalarnej, jak i prędkości akustycznej – wielkości wektorowej. Dopiero powiązanie zależności między tymi wielkościami daje możliwości pełnego opisu pola akustycznego za pomocą rozkładu wektora natężenia dźwięku. Fakty te znane są akustykom od dawna, lecz skomplikowanie i czasochłonność pomiarów ciągle stoi na przeszkodzie powszechności stosowania badań natężeniowych [1]. Tę sytuację można uprościć dzięki zastosowaniu automatyzacji i komputerowej techniki cyfrowego przetwarzania sygnałów. W niniejszym artykule przedstawiono system do zautomatyzowanego pomiaru przestrzennego rozkładu natężenia dźwięku wraz z rozważaniami dotyczącymi optymalizacji takiego systemu pod kątem szybkości działania i wymagań stawianych komputerowej jednostce akwizycyjno-obliczeniowej. Zbudowany system porównano z wcześniej stosowanym w celu walidacji jego właściwości i ewentualnych zalet.

2. Pomiar i obliczanie natężenia dźwięku

Prezentowany system pomiarowy służy do pomiaru natężenia dźwięku rozumianego jako długookresowy średni przepływ energii akustycznej przez powierzchnię jednostkową [2]:

$$\vec{I} = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{u}(t) \cdot p(t) dt \quad (1)$$

Z praktycznego punktu widzenia interesujące jest również widmo tej wielkości, kiedy pomiar odbywa się w polu akustycznym wymuszonym szumem szerokopasmowym. Dla danego punktu w badanej przestrzeni pomiar polega na akwizycji zmiennych w czasie wartości chwilowych ciśnienia akustycznego i składowych ortogonalnych wektora prędkości akustycznej. W celu wyznaczenia widmowego rozkładu składowej czynnej natężenia dźwięku konieczne jest wykonanie szeregu procedur przetwarzania sygnału. W pierwszym kroku należy dokonać rozdzielania zarejestrowanych sygnałów pomiarowych na sygnały pasmowe o szerokości 1/12 oktawy. Następnie dla każdego pasma dokonywane jest wymnażanie sygnału ciśnienia i odpowiedniej składowej prędkości. W wyniku tej operacji dostępne są 3 składowe przestrzenne wartości chwilowych natężenia dźwięku w danym paśmie. Składowe stałe (ze znakiem) tych sygnałów są poszukiwanymi składowymi przestrzennymi mierzonego wektora natężenia dźwięku. W następnym kroku należy obliczyć moduł wektora i wyrazić go w skali logarytmicznej oraz jego orientację przestrzenną (kąty azymutu i zenitu). Przeprowadzenie powyższych operacji dla wszystkich pasm i wszystkich zadanych punktów pomiarowych umożliwia ostateczną przestrzennie-częstotliwościową reprezentację danych pomiarowych. Z opisanego wyżej algorytmu, ze względu na dużą (rzędu 100) liczbę pasm

analizy oraz liczbę punktów pomiarowych jasno wynika, że taka procedura jest czasochłonna i wymaga dużej mocy jednostki obliczeniowej.

3. Procedura pomiarowa

W systemie wykorzystywany jest kompaktowy czujnik pomiarowy w postaci miniatury sondy Microflown USP [5]. Sonda wyposażona jest w mikrofon pojemnościowy 0,1 cala oraz 3 przetworniki prędkości akustycznej, każdy odpowiadający za jedną składową prędkości osrodka. Szybkość i powtarzalność procedury pomiarowej uzyskano dzięki zastosowaniu robota o 3 stopniach swobody. Pomiar napięć na zaciskach sondy wykonywany jest przy pomocy wyspecjalizowanej karty do akwizycji danych. Karta NI DAQ umożliwia synchroniczną akwizycję sygnałów z 4 kanałów napięciowych z rozdzielczością 24 bity i częstotliwością próbkowania do 102,4 kS/s. W fazie przygotowania do eksperymentu pomiarowego należy zaplanować rozkład dyskretnych punktów pomiarowych w badanej przestrzeni. Wygenerowana na tej podstawie siatka pomiarowa jest podstawowym, wejściowym, zbiorczym parametrem procedury pomiaru, pozwalającym na automatyczne dotarcie do każdego z zaplanowanych punktów. Siatka pomiarowa jest równocześnie parametrem dla części obliczeniowej systemu oraz skutecznej rekonstrukcji obrazu natężenia pola akustycznego. W celu uzyskania dokładnego obrazu rozplywu energii akustycznej w dużej przestrzeni niezbędne jest wykonanie pomiarów w dużej liczbie punktów. Kwestia odpowiedniej generacji siatki pomiarowej (a co za tym idzie wyznaczenia trajektorii, po jakiej porusza się sonda pomiarowa) leży u podstaw wydajności całego systemu. Dobrze uporządkowana siatka daje możliwość uniknięcia długich czasów przesuwania sondy, jak i oszczędzenia czasu potrzebnego na uspokojenie się sondy wprowadzonej w wibracje poprzez bezwładność układu robota z ramieniem. Kołysanie sondy można ograniczyć również poprzez odpowiedni dobór prędkości przesuwu. Wszystkie te aspekty mają istotny wpływ na czas trwania serii pomiarowej. Właściwy pomiar rozpoczyna się od doboru odpowiedniego zakresu pomiarowego, co zapewni możliwie najlepszy stosunek sygnału do szumu przy niedopuszczeniu do przesterowania wejściowych przetworników analogowo-cyfrowych. Po jego zakończeniu rozpoczyna się właściwa seria pomiarowa w kolejnych punktach siatki. Dla jakości pomiarów natężeniowych konieczne jest zapewnienie odpowiednio długiego czasu pomiaru w poszczególnych punktach. Ze względu na zakres częstotliwości akustycznych, w których ma być dokonywana analiza danych pomiarowych oraz żądaną statystyczną dokładność pomiaru system umożliwia wybór czasu akwizycji sygnału w pojedynczym punkcie pomiarowym. W opisywanych pomiarach czas ten ustalono na 15 s, co przy użytecznym zakresie częstotliwości od 100 Hz gwarantuje dokładność na poziomie 0,1 dB [4]. Podczas pomiaru w każdym punkcie operator ma możliwość obserwowania widma sygnału mierzonego. Dzięki temu istnieje zawsze możliwość wzrokowej kontroli stabilności warunków pomiarowych i ewentualnego ręcznego odrzucenia wybranych pomiarów, jeżeli zauważone zostaną jakieś zakłócenia. W takim przypadku system rozpocznie ponowny pomiar bez przechodzenia do następnego punktu siatki. W przypadku braku ingerencji ze strony operatora system automatycznie zakończy pomiar w danym punkcie, utworzy na dysku plik z danymi i przemieści sondę do następnego punktu w skanowanej przestrzeni. Ostatnią fazą procedury pomiarowej po zakończeniu pomiarów we wszystkich punktach zadanej siatki jest obliczenie wartości składowych wektora natężenia dźwięku dla każdego punktu. Obliczenia dokonywane są dla pasm 1/12 oktawy.

4. Optymalizacja struktury systemu

Z przeprowadzonej analizy procedury pomiarowej wynika, że do części odpowiedzialnej za akwizycję nie jest wymagana duża moc obliczeniowa. Procesem o znacznie większych wymaganiach sprzętowych jest przetwarzanie. Konieczność akwizycji 4 niez-

ależnych wielkości oraz stosunkowo długi czas pomiaru zapewniający odpowiednią wiarygodność wyników sprawia, że pliki z danymi pomiarowymi są relatywnie duże, a co za tym idzie ich przetwarzanie wymaga dużo pamięci. Współczesne procesory w swojej architekturze zawierają wiele rdzeni, co pozwala na równoległe wykonywanie operacji. Prowadzi to do znacznej redukcji czasu obliczeń złożonych algorytmów. Pewnym problemem pozostaje tylko napisanie oprogramowania w taki sposób, aby mógł być on wykonywany w wielu wątkach jednocześnie.

W przedstawionym systemie rozważono dwa sposoby zarządzania zajętością zasobów. W pierwszym z nich zaprogramowano algorytm uzyskiwania natężenia dźwięku do wykorzystania na komputerze, którego zadaniem jest akwizycja sygnału. Zakłada się, że możliwości sprzętowe tej jednostki nie muszą być wykorzystane. Na komputerze tym nie zachodzi bowiem potrzeba obliczenia dokładnej wartości natężenia dźwięku. Gdyby jednak taka konieczność pojawiła się (np. okresowa kalibracja sondy), rozwiązaniem umożliwiającym dokonywanie tej czynności jest wielokrotna filtracja tego samego sygnału kolejno przez blok filtru, którego współczynniki obliczane są w pętli dla poszczególnych pasm analizy. Z przeprowadzonej analizy zajętości procesora przy takim podejściu wynika, że najczęściej wykorzystywany jest tylko jeden rdzeń procesora a zajęta pamięć ogranicza się tylko do objętości pliku z zapisanymi wynikami pomiaru dla jednego punktu. Architektura systemu przeznaczonego na komputer z procesorem wielordzeniowym, którego głównym zadaniem jest obliczanie wartości natężenia dźwięku w pasmach 1/12 oktawy, jest odmienna. Celem optymalizacji kodu systemu jest możliwość minimalizacji czasu obliczeń oraz maksymalne możliwe wykorzystanie dostępnych zasobów. Dzięki stosowaniu wielu równoległych pętli filtracji oraz syntezy filtrów przed rozpoczęciem procesu przetwarzania możliwe jest znaczne zmniejszenie czasu przetwarzania jednego pliku przy osiągnięciu znacznego stopnia zajętości zasobów komputera obliczeniowego. Załadowanie pliku do pamięci RAM a następnie jego zwielokrotnienie w pamięci skutkuje zwiększeniem obciążenia pamięci jak i zmniejszeniem czasu dostępu, a co za tym idzie zwiększeniem wydajności. Z punktu widzenia systemu operacyjnego takie rozłożenie danych daje możliwość optymalnego wykorzystania procesora poprzez udostępnienie mu wszystkich danych, na których mają być wykonywane obliczenia.

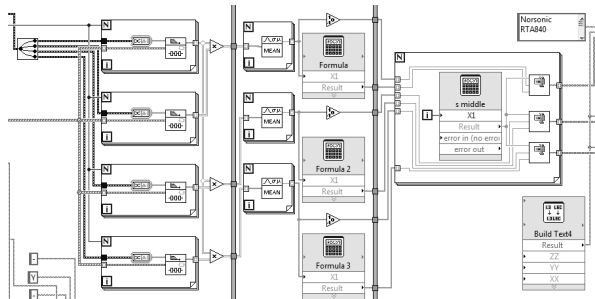
5. Realizacja systemu w środowisku LabVIEW

Przedstawiony system został zaimplementowany w środowisku LabVIEW. Ze względu na optymalizację zasobów koniecznych do obsługi akwizycji i przetwarzania, procedurę pomiarową obsługują dwa wirtualne przyrządy pomiarowe. W pierwszym przyrządzie odpowiedzialnym za akwizycję, wbudowane są algorytmy do pozycjonowania sondy za pomocą robota sterowanego interfejsem szeregowym. Na podstawie danych z listy punktów pomiarowych generowane są odpowiednie rozkazy ruchów względnych zgodne ze standardem sterownika ISEL i wysyłane do sterownika. Do budowy bloku akwizycji użyto bloków składowych niższego poziomu. Podgląd widma natężenia dźwięku podczas pomiaru możliwy jest dzięki wykorzystaniu procedury FFT i szybkiego spłotu zespolonego w dziedzinie widma. Widmo odświeżane jest co 0,5s.

Wirtualny przyrząd do przetwarzania danych pomiarowych istnieje w dwóch wersjach. Przyrząd w wersji niewymagającej dużych zasobów sprzętowych zawiera blok przetwarzania sygnałów z szeregową filtracją sygnału. Przetwarzanie rozpoczyna się od wczytania z dysku pliku siatki a następnie kolejnych plików z danymi pomiarowymi. Dane z pliku siatki pomiarowej sterują kolejnością przetwarzania danych oraz rekonstrukcją wyników. Zawartość każdego pliku danych rozdzielana jest na 4 kanały, odpowiedzialne za ciśnienie oraz składowe prędkościowe. W pętli kolejno dla wszystkich pasm syntezywane są 4 filtry pasmowe o takich samych współczynnikach, przez które przepuszczane są 4 kanały danych z pojedynczego pliku. W celu zmniejszenia

zapotrzebowania na zasoby wszystkie operacje są wykonywane w pojedynczej pętli, co uniemożliwia w dużym stopniu zwielokrotnienie operacji. Algorytm ten może z powodzeniem być uruchamiany na starszym sprzęcie bez ryzyka, że procedura obliczenia natężenia dźwięku okaże się niemożliwa do wykonania ze względu na małą ilość zainstalowanej pamięci RAM.

Na rys. 1 przedstawiono blok przetwarzania sygnałów pomiarowych z równoległą filtracją sygnału – przyrząd w wersji wymagającej dużych zasobów sprzętowych.



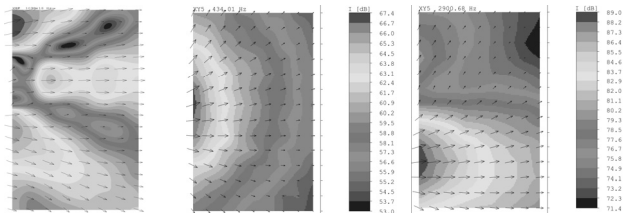
Rys. 1. Zrównoleżony moduł przetwarzania sygnału
Fig. 1. Parallelised module of signal processing

Przetwarzanie danych rozpoczyna się od generacji macierzy filtrów. W pętli przygotowany jest zestaw 100 filtrów pasmowo-przepustowych, do których potem algorytm odwołuje się przez cały proces obliczeń. Jest to zestaw danych, który nie zmienia się w czasie obliczeń więc należy wykonać tę operację tylko raz. Plik pomiarowy wczytywany jest w głównej pętli programu. Dla zwiększenia szybkości przetwarzania oraz zmniejszenia objętości plików wczytywanych wskazane jest używanie plików w standardzie National Instrument TDMS. Ten rodzaj plików jest specjalnie przeznaczony do zapisu danych pomiarowych. Kolejnym krokiem jest rozdzielanie danych pomiarowych na poszczególne kanały, gdyż dla większej przejrzystości oraz optymalizacji prędkości zostały one zapisane do jednego pliku. Kanały reprezentujące ciśnienie oraz 3 składowe prędkości są filtrowane niezależnie przy użyciu tego samego zestawu filtrów. Rozdzielenie filtracji wszystkich 4 składowych na oddzielne pętle zezwala na optymalne rozdzielanie procesu na wiele rdzeni procesora, a tym samym przyspieszenie działania całego algorytmu. Jako wynik tej operacji otrzymujemy macierz składającą się ze 100 zestawów danych dla każdego kanału danych osobno. Jest to krytyczny element algorytmu, to właśnie on wymaga największych zasobów pamięciowych, a jednocześnie w tym miejscu odbywa się największa poprawa wydajności w stosunku do wersji szeregowej. Następnym elementem jest zgodnie z definicją wyznaczenie składowych prędkościowych z ciśnieniem. W tym momencie w pamięci przechowywane są wartości chwilowe trzech składowych natężenia dźwięku. Po tym elemencie następuje również zgodnie z definicją uśrednianie każdego z kanałów natężeniowych. Po uśrednianiu, ważnym elementem jest zapamiętanie znaku uśrednionego natężenia dźwięku.

6. Walidacja

Prezentowane rozwiązanie zastąpiło wcześniej stosowany system półautomatyczny na bazie analizatora NORSONIC RTA-840. Analizator na podstawie pomiaru ciśnienia oraz jednej składowej prędkości obliczał widmo wybranej składowej natężenia dźwięku. Z tego powodu dla każdego punktu pomiarowego pomiar trzeba było przeprowadzać kolejno dla każdej składowej. Oznaczało to, że kolejne składowe tego samego wektora obliczane były na podstawie danych pomiarowych rejestrowanych w innym czasie. Nawet przy założeniu stacjonarności procesu mogło to być źródłem błędów. W ramach walidacji nowego systemu wykonano pomiary pola akustycznego na szeregu obiektów. Porównania wartości liczbowych otrzymywanych z dwóch systemów wskazywały na odchyłki rzędu 0,5 dB w zakresie częstotliwości powyżej

300Hz i do 2,5 dB w pasmach najniższych. W pierwszym przykładzie wizualizacji zaprezentowano rozkład natężenia dźwięku za metalowym stożkiem zawieszonym w komorze bezdechowej. Pomiar obejmował 144 punkty pomiarowe. Na rys. 2 (lewy) pokazano wektorowy rozkład pola akustycznego za stożkiem. W drugim prezentowanym przykładzie obiektem wizualizacji jest zestaw głośnikowy dwudrożny (Creative GigaWorks T20). Pomiar obejmował 1134 punkty. Na rys. 2 (środek) i (prawy) przedstawiono rozkład natężenia dźwięku dla dwóch wybranych częstotliwości pokazującą podział emisji energii akustycznej pomiędzy dwa przetworniki oraz ich inne charakterystyki kierunkowości.



Rys. 2. Otrzymany rozkład natężenia dźwięku za stożkiem (lewy) oraz przed emitującym głośnikiem niskotonowym (środek) i wysokotonowym (prawy) zestawu Creative

Fig. 2. Sound intensity distribution behind the cone (left) and in front of radiating woofer (middle) and tweeter (right) of Creative loudspeaker set

W tabeli 1 zestawiono porównanie czasów trwania pomiarów dla nowego systemu oraz systemu Norsonic.

Tab. 1. Porównanie czasów pomiarów dwóch systemów
Tab. 1. Comparison of the performance of two systems

czynności	Norsonic RTA 840	Nowy system
pomiar jednej składowej natężenia	15s	15s
ustawienie zakresu	ok. 5s	0,5s
zapis danych	1s	0,2s

Stożek / Zestaw głośnikowy	Norsonic RTA 840	Nowy system
Liczba punktów pomiarowych	144 / 1134	144 / 1134
Czas pomiaru	125 min / 17h	40 min / 5,5 h

7. Wnioski i podsumowanie

Zbudowany system zapewnia ponad 3-krotne przyspieszenie wykonywanych pomiarów przy jednoczesnym obniżeniu niepewności wynikającej z jednoczesnego pomiaru 3 składowych wektora natężenia dźwięku. Dodatkową zaletą jest możliwość aplikowania innych procedur przetwarzania sygnałów do danych pomiarowych zapisanych w systemie. System może znaleźć zastosowanie w wielu dziedzinach badań przemysłowych i naukowych, m.in. w diagnostyce hałasu oraz walidacji modeli numerycznych stosowanych w aeroakustyce. Autorzy planują dalsze prace nad systemem związane również z wykorzystaniem do obliczeń procesora graficznego GPU z architekturą CUDA.

8. Literatura

- [1] Weyna S.: Rozpływ energii akustycznych źródeł rzeczywistych. WNT, Warszawa 2005.
- [2] Fahy F.: Sound Intensity. Elsevier Applied Science, London 1989.
- [3] Chruściel M.: Labview w praktyce. Wydawnictwo BTC, 2008.
- [4] Randal R.: Application of B&K Equipment to Frequency Analysis. Bruel & Kjaer, 1977.
- [5] Karta katalogowa: USP Regular. Microflown Technologies, www.microflown.com

otrzymano / received: 21.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2012

artykuł recenzowany / revised paper