

Daniel Król

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Tarnowie

System automatycznego pozycjonowania mikrofonu pomiarowego dla wirtualnej macierzy mikrofonowej

Wstęp

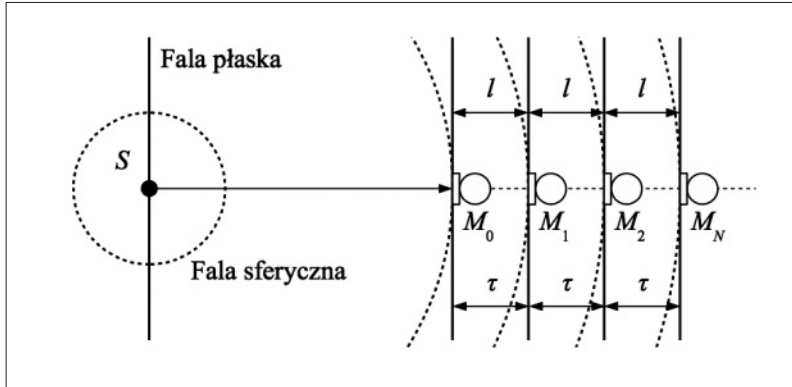
Macierze mikrofonowe umożliwiają tzw. kształtowanie wiązki akustycznej (ang. *Beamforming*) czyli osiągnięcie pożądanej charakterystyki kierunkowej w drodze cyfrowego przetwarzania sygnałów. Realizowane są jako zespoły mikrofonów, odpowiednio rozmieszczonych w przestrzeni. Do najpopularniejszych konfiguracji macierzy mikrofonowych można zaliczyć: liniowe, pierścieniowe, kołowe, prostokątne czy gwiazdowe. Ze względu na właściwości fali akustycznej, w zależności od odległości źródła dźwięku, macierze mogą być analizowane w polu bliskim lub polu dalekim. W polu bliskim fala akustyczna rozchodzi się sferycznie natomiast w polu dalekim można przyjąć, że jej czoło jest płaskie [1]. Macierze mikrofonowe znajdują szerokie zastosowanie w systemach rejestracji dźwięku, rozpoznawaniu głosów [2, 3], analizie rozkładu pola akustycznego [4, 5] a także w nowoczesnych systemach pomiarowych [6, 7].

Wirtualna macierz mikrofonowa

Najistotniejszą wadą systemów wykorzystujących macierze mikrofonowe jest ich stosunkowo wysoki koszt, na który wpływa cena wielu mikrofonów potrzebnych do realizacji macierzy oraz wielokanałowego systemu, umożliwiającego rejestrację sygnału z każdego mikrofonu oddzielnie. Problem jest szczególnie istotny w systemach pomiarowych, gdzie wykorzystywane komponenty są bardzo drogie ze względu na ich wysoką klasę dokładności.

Macierze mikrofonowe mogą zostać wykorzystane do poprawy dokładności quasi-bezechowych pomiarów zespołów głośnikowych. Dzięki cyfrowemu kształtowaniu wiązki akustycznej możliwa jest lepsza eliminacja pasożytniczych odbić pomieszczenia, w którym dokonywany jest pomiar. Metody quasi-bezechowe [8] są popularną alternatywą dla pomiarów bardzo drogiej, w budowie i utrzymaniu, komór bezechowych [9]. Na potrzeby prototypowego systemu pomiarowego, zdecydowano się na wykorzystanie liniowej macierzy mikrofonowej, w konfiguracji z przesunięciem fazowym (ang. *end-fire*). Macierz tego typu, umieszczona w przestrzeni trójwymiarowej, posiada maksymalną czułość w dokładnie jednym kierunku. Nie bez znaczenia

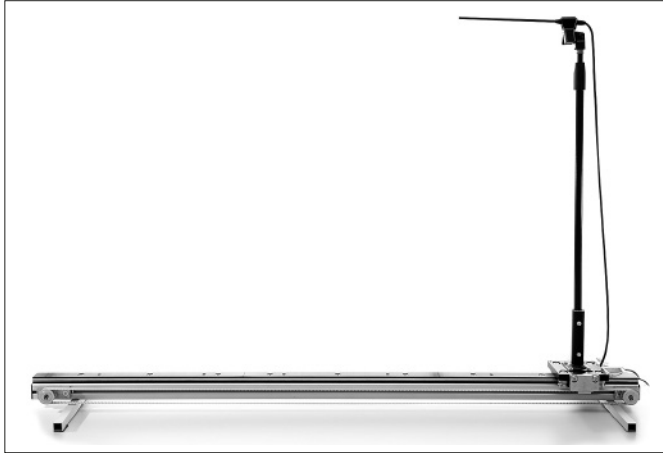
pozostaje fakt, że niezależnie czy taka macierz pracuje w polu bliskim (fala sferyczna) czy w polu dalekim (fala płaska), czoło fali dociera do poszczególnych mikrofonów z takim samym opóźnieniem, co za tym idzie algorytm kształtowania wiązki [1] posiada takie same parametry w obu przypadkach (rys. 1).



Rys. 1. Działanie macierzy liniowej z przesunięciem fazowym w polu bliskim oraz polu dalekim

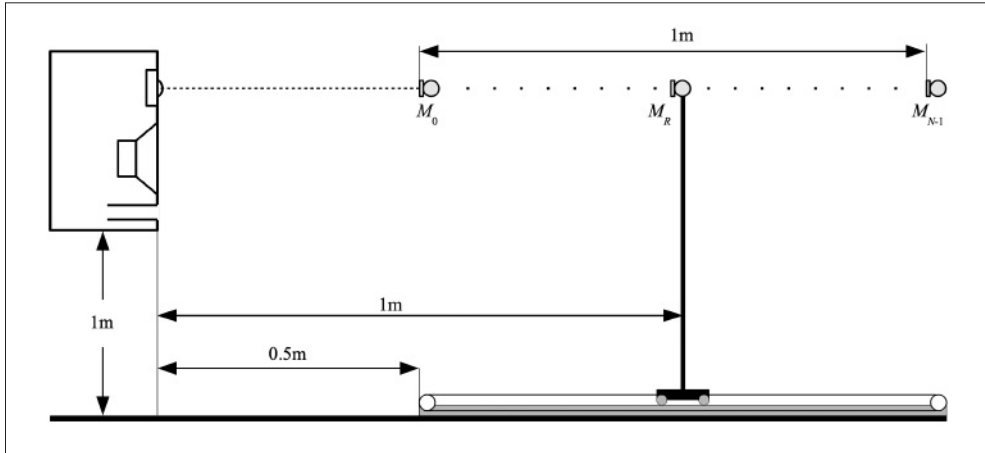
Realizacja systemu pozycjonowania mikrofonu pomiarowego

W przypadku systemu pomiarowego bardzo istotną zaletą liniowej macierzy z przesunięciem fazowym jest możliwość zastąpienia N -mikrofonów jednym, zmieniającym pozycję w przestrzeni (w linii). Na podstawie pomiarów, przeprowadzonych w różnych pomieszczeniach, przyjęto minimalny, wymagany współczynnik tłumienia odbić, który wynosi 40 dB. Standardowo spełnienie takiego założenia wymaga zastosowania 100-kanalowego systemu pomiarowego oraz macierzy składającej się ze 100 mikrofonów pomiarowych. Jak już wspomniano, taki system byłby skomplikowany i kosztowny. W związku z powyższym zdecydowano się na zastąpienie macierzy N -mikrofonowej jednym mikrofonem, zamontowanym na sterowanej mikroprocesorowo prowadnicy liniowej (rys. 2). Przy założeniu, że generowany sygnał pomiarowy jest deterministyczny, wyniki uzyskane z serii pomiarów w różnych punktach przestrzeni, mogą być traktowane jak sygnał z macierzy wielomikrofonowej. Ponadto, zaletami wynikającymi z zastosowania pojedynczego mikrofonu pomiarowego są brak różnic w charakterystykach poszczególnych mikrofonów oraz brak negatywnego wpływu sąsiednich mikrofonów na pomiar w danym punkcie. W przypadku macierzy mikrofonowej z przesunięciem fazowym, mikrofony znajdujące się pomiędzy źródłem dźwięku a N -tym mikrofonem częściowo zasłaniają go, co ma istotny wpływ na rejestrowany sygnał. Wirtualna macierz mikrofonowa została zaprojektowana do pomiarów quasi-bezechowych w pomieszczeniach względnie małych. W związku z powyższym, ważne jest, aby jej rozmiar oraz ustawienie względem badanego zespo-

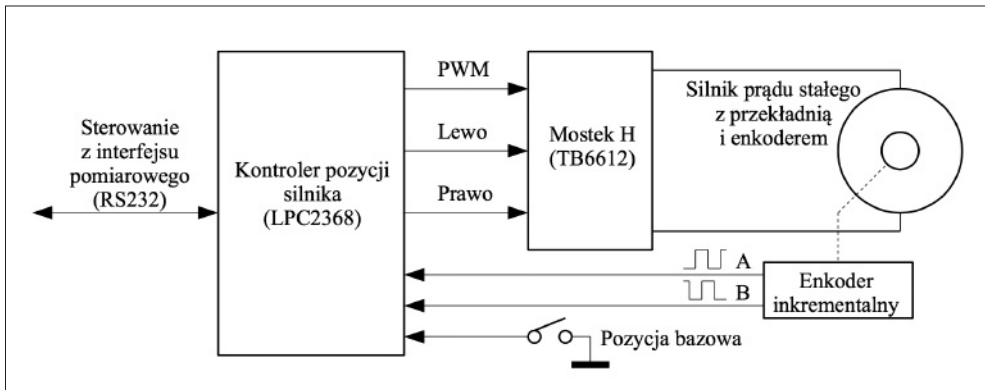


Rys. 2. Wirtualna macierz mikrofonowa – mikrofon pomiarowy zamontowany na mikroprocesorowo sterowanej prowadnicy liniowej

łu głośnikowego zajmowało możliwie małą powierzchnię. Konieczne było osiągnięcie pewnego kompromisu pomiędzy wymiarami wynikającymi z wymaganej charakterystyki kierunkowej macierzy [1] oraz z realnych rozmiarów całego systemu pomiarowego. Ostatecznie do budowy systemu wykorzystano precyzyjną liniową prowadnicę CNC (ang. *Computerized Numerical Control*) o przestrzeni roboczej $L=1$ m, w której wydzielono 100 punktów pomiarowych, w odległościach $l=1$ cm. Mikrofon pomiarowy zamocowany jest na ruchomym wózku, poruszającym się po prowadnicy liniowej (rys. 3). Wózek napędzany jest silnikiem prądu stałego za pośrednictwem pasa zębatego. Silnik wykorzystany do napędu wózka posiada zintegrowaną przekładnię oraz halotronowy enkoder inkrementalny, umożliwiający odczyt położenia wału silnika z dokładnością $1/64$ obrotu. Uwzględniając współczynnik przełożenia przekładni i średnicę koła pasowego, dokładność pozycjonowania wózka wynosi $1/34$ cm. Schemat blokowy układu sterowania wózka prowadnicy przedstawiono na rysunku 4. Sterownik silnika zrealizowano w oparciu o 32-bitowy mikrokontroler z rdzeniem ARM, w którym zaimplementowano algorytm regulatora, sterującego prędkością oraz kierunkiem obrotów. Silnik podłączony jest do mikrokontrolera za pośrednictwem scalonego mostka „H”. Regulację obrotów zrealizowano w oparciu o sprzętowy moduł PWM (ang. *Pulse Width Modulation*), zintegrowany w mikrokontrolerze. Pozycja wózka obliczana jest na podstawie liczby impulsów generowanych przez enkoder inkrementalny. Odpowiednie sterowanie dla silnika obliczane jest na podstawie błędu pomiędzy wartością zadaną a aktualną pozycją wózka. Zadana pozycja mikrofonu pomiarowego przesyłana jest z interfejsu pomiarowego do sterownika silnika za pośrednictwem magistrali RS232. Zastosowania enkodera inkrementalnego wymusza tzw. bazowanie prowadnicy, które realizowane jest po włączeniu zasilania. Służy do



Rys. 3. Pomiar zespołu głośnikowego z wykorzystaniem wirtualnej macierzy mikrofonowej



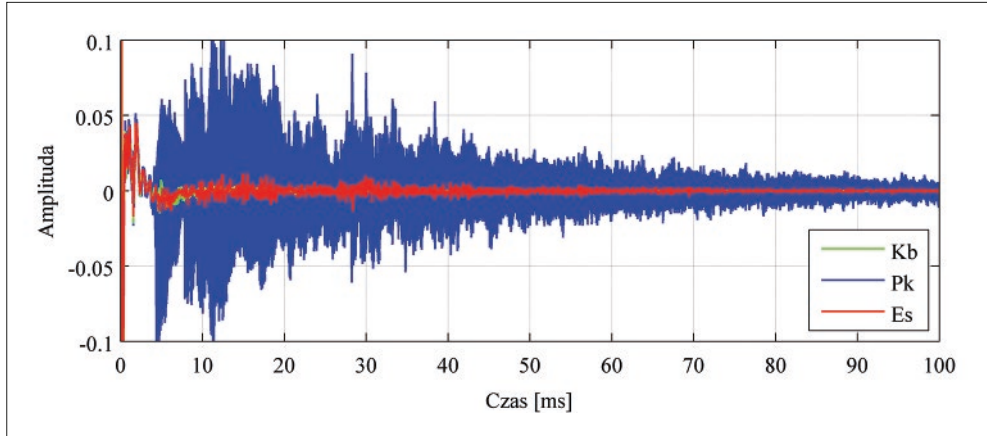
Rys. 4. Schemat blokowy sterownika napędu prowadnicy liniowej

tego wyłącznik krańcowy umieszczony w pozycji zerowej wózka. Jeżeli po włączeniu zasilania wyłącznik krańcowy jest otwarty, mikrokontroler wymusza jazdę wózka w kierunku pozycji zerowej aż do momentu jego zamknięcia. Obsługa wyłącznika krańcowego realizowana jest w przerwaniu o najwyższym priorytecie, gdyż niezatrzymanie silnika grozi mechanicznym uszkodzeniem napędu. Wywołanie procedury obsługi przerwania wyłącznika krańcowego powoduje natychmiastowe zatrzymanie silnika oraz zerowanie zmiennej, przechowującej pozycję wózka.

Przykładowe wyniki

Na rysunku 5. (w 10-krotnym powiększeniu) przedstawiono porównanie (początkowych 100 ms) pojedynczych odpowiedzi impulsowych zespołu głośnikowego, uzyskanych w pomieszczeniu testowym (Pk) oraz odpowiedź impulsową, estymowaną algorytmem adaptacyjnego kształtowania wiązki z wykorzystaniem wirtualnej ma-

cierzy mikrofonowej (E_s) w odniesieniu do pomiaru w komorze bezechowej (K_b). Estymowana charakterystyka czasowa jest zbliżona do odpowiedzi uzyskanej w komorze bezechowej, co potwierdza prawidłowe działanie systemu.



Rys. 5. Powiększone 10-krotnie, odpowiedzi impulsowe zespołu głośnikowego: uzyskana w komorze bezechowej (K_b), 100 odpowiedzi uzyskanych w pomieszczeniu (P_k) oraz odpowiedź estymowana z wykorzystaniem kształtowania wiązki (E_s)

Podsumowanie

Zaproponowana realizacja wirtualnej macierzy mikrofonowej została wykorzystana do eksperymentalnych pomiarów zespołu głośnikowego w zwykłym pomieszczeniu mieszkalnym. Charakterystyka estymowana z wykorzystaniem adaptacyjnego kształtowania wiązki jest zbliżona do charakterystyki uzyskanej w profesjonalnej komorze bezechowej. Zastosowanie mikroprocesorowo sterowanej prowadnicy do transportu mikrofonu pomiarowego jest mniej kosztowne od konwencjonalnego systemu wielomikrofonowego. Co więcej, wykorzystanie jednego mikrofonu rozwiązuje problem różnic w charakterystykach ścieżek sygnałowych poszczególnych przetworników. Nie bez znaczenia pozostaje fakt, że liczba wirtualnych mikrofonów oraz odległość pomiędzy nimi może być dowolnie konfigurowana w oprogramowaniu pomiarowym.

Bibliografia

1. D. Król, *Macierze mikrofonowe i głośnikowe*, [w:] T.P. Zieliński, P. Korohoda, R. Rumian, *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w telekomunikacji. Podstawy, multimedia, transmisja*, Warszawa 2014.
2. J. Benesty, J. Chen, Y. Huang, *Microphone Array Signal Processing*, Springer 2008.
3. P. Vary, R. Martin, *Digital Speech Transmission: Enhancement, Coding and Error Concealment*, Hoboken, New Jersey 2006.

4. A. Lorenc, D. Król, K. Klessa, *An acoustic camera approach to studying nasality in speech: The case of Polish nasalized vowels*, "The Journal of the Acoustical Society of America", 144(6):3603–3617, DOI: 10.1121/1.5084038, December 2018.
5. Ł. Mik, A. Lorenc, D. Król, R. Wielgat, R. Świąciński, R. Jędryka, *Fusing the electromagnetic articulograph, high-speed video cameras and a 16-channel microphone array for speech analysis*, "Bull. Pol. Ac.: Tech." 66(3) 2018.
6. D. Król, R. Wielgat, *Quasi-Anechoic Measurement of Loudspeakers Using Beamforming Method*, "Electronics-Constructions, Technologies, Applications", Vol. 54, No. 2/2013.
7. D. Król, *Quasi-Anechoic Measurement of Loudspeakers Using Adaptive Beamforming Method*, International Conference on Signals and Electronic Systems, ICSES'14, 11–13 September 2014, Poznań, Poland.
8. L. Kirchner, *Loudspeaker measurement technology*, Braunschweig Patents pending, 2007.
9. G. Dodd, G. Schmid, *Can We Save the Cost of Building Anechoic Chambers?*, "New Zealand Acoustics", vol. 25, no. 1, 2012.

Streszczenie

W artykule przedstawiono prototypowy system automatycznego pozycjonowania mikrofonu pomiarowego. Proponowane rozwiązanie daje możliwość znacznej poprawy dokładności quasi-bezechowego pomiaru zespołów głośnikowych, dzięki wykorzystaniu cyfrowego kształtowania wiązki akustycznej. Opracowanie wirtualnej macierzy mikrofonowej, opartej na mikroprocesorowo sterowanym napędzie liniowym, umożliwia redukcję kosztu realizacji konwencjonalnej macierzy mikrofonowej oraz wielokanałowego systemu akwizycji danych pomiarowych. Ponadto, konfiguracja wirtualnej macierzy mikrofonowej wykorzystanej w badaniach pozwala na uzyskanie dokładniejszych wyników w stosunku do macierzy wielomikrofonowej.

Słowa kluczowe: kształtowanie wiązki, wirtualna macierz mikrofonowa, pomiary akustyczne

Summary

The paper describes a prototype automatic microphone positioning system. The proposed solution gives the opportunity to significantly improve the accuracy of quasi-anechoic measurement of loudspeakers, thanks to the use of digital acoustic beamforming. The development of a virtual microphone array, based on a microprocessor-controlled linear drive, allows reducing the cost of implementing a conventional microphone array and a multi-channel measurement data acquisition system. Moreover, the configuration of the virtual microphone array used in the research allows for more accurate results in relation to the multi-microphone array.

Keywords: beamforming, virtual microphone array, acoustical measurements