

*Mikrofon, mowa, wzmocnienie dźwięku, kolumna,
system mikrofonowy, charakterystyka kierunkowa,
sala konferencyjna, sala wykładowa*

Bartosz CHMIELEWSKI¹

KOLUMNA MIKROFONOWA

Praca stanowi analizę właściwości oraz metodologię projektowania kolumny mikrofonowej jako systemu mikrofonowego o szczególnej charakterystyce kierunkowości, która mogłaby znaleźć zastosowanie w systemach nagłośnienia sal wykładowych i seminaryjnych. W pracy przedstawiono wyniki wykonanej przez autora symulacji komputerowej w programie *MATLAB* oraz na ich podstawie określono właściwości charakterystyk kolumny mikrofonowej. Stworzono zależności przydatne przy projektowaniu kolumny mikrofonowej.

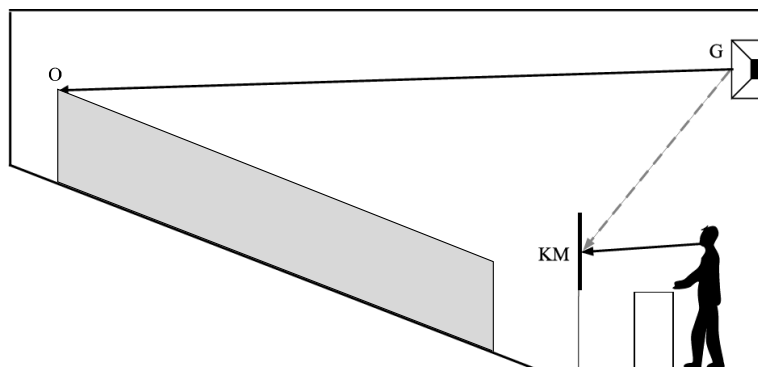
1. WSTĘP

Duże sale wykładowe oraz sale konferencyjne wyposaża się aktualnie w systemy wzmocnienia dźwięku w celu zwiększenia zrozumiałości mowy w pomieszczeniu. W systemach takich wykorzystuje się mikrofon ustawiony blisko mówcy w taki sposób, aby móc wzmocnić dźwięk mowy do pożądanego poziomu jednocześnie unikając sprzężenia w systemie. Stosowane aktualnie mikrofony sprawdzają się, ale mają też swoje wady. Mikrofony bezprzewodowe wymagają ciągłej obsługi: włączania, wymiany baterii, ustawienia głośności; mikrofony typu lavalier wymagają montażu na ubraniu w okolicach klatki piersiowej oraz noszenia nadajnika; mikrofony stacjonarne umieszczone na mównicy ograniczają ruchy prelegenta.

Autor proponuje system mikrofonowy umieszczony w większej odległości od mówcy, który umożliwi wzmocnienie dźwięków docierających do systemu tylko z obszaru gdzie porusza się mówca. Dźwięki dochodzące z innych kierunków mają być tłumione tak silnie, aby można było uzyskać wymagane wzmocnienie. Urządzeniem głośnikowym o analogicznych właściwościach do opisanego systemu

¹ Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki, Politechnika Wrocławska, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Koło Naukowe Inżynierów Dźwięku Sekcji Studenckiej Audio Engineering Society, opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki.

mikrofonowego jest kolumna głośnikowa [2]. Konstrukcja tego typu promieniuje szeroko w płaszczyźnie horyzontalnej, a wąsko w płaszczyźnie wertykalnej. Analogicznych właściwości oczekuje autor od kolumny zbudowanej z mikrofonów. Przykładową konfigurację systemu wzmacnienia mowy opartego o kolumnę mikrofonową przedstawiono na rysunku 1.

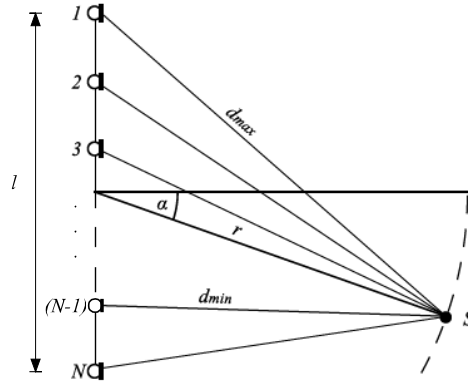


Rys. 1. Przykładowy uproszczony schemat systemu wzmacnienia mowy z wykorzystaniem kolumny mikrofonowej. *KM* – kolumna mikrofonowa, *G* – głośnik, *O* – najdalszy odbiorca. Przerywaną linią przedstawiono kierunek padania dźwięku powodującego sprzężenie w systemie.

Aby system przedstawiony na rysunku 1. działał bez sprzężeń w punkcie *KM* musi wystąpić odpowiednie tłumienie dźwięku dochodzącego z głośnika [1]. Aby określić możliwości realizacji tego zadania przez kolumnę mikrofonową przeprowadzono symulację komputerową. Wygenerowano charakterystyki kierunkowe oraz opisano ich zmienność w zależności od konstrukcji kolumny. Zdefiniowano parametry opisujące kolumnę mikrofonową oraz opracowano wzory przydatne do praktycznego projektowania.

2. KONSTRUKCJA I ZASADA DZIAŁANIA

Kolumna mikrofonowa to N takich samych mikrofonów o określonej charakterystyce kierunkowej umieszczonych w stałej odległości od siebie w linii o całkowitej długości l (rysunek 2). Dźwięk ze źródła S oddalonego od środka kolumny o r pada na kolumnę pod kątem α . Dźwięk dociera do każdego mikrofonu w kolumnie w różnym czasie wynikającym z różnych odległości d_n , gdzie $n=1,2,\dots,N$. W wyniku sumowania przesuniętych kopii tego samego sygnału uzyskujemy efekt filtrowania – efekt filtru grzebieniowego. Jeżeli zmienia się kąt padania dźwięku to zmieniają się relacje czasowe między sygnałami. Na wyjściu układu sumującego kolumny uzyskujemy sygnał o poziomie zależnym od kąta padania dźwięku na kolumnę.



Rys. 2. Konstrukcja kolumny mikrofonowej. N – liczba mikrofonów, l – długość, S – źródło dźwięku, r – odległość źródła dźwięku od środka kolumny, α – kąt padania dźwięku na kolumnę. Zaznaczono drogi dźwięku do poszczególnych mikrofonów (d_{max} i d_{min} to największa i najmniejsza odległość)

3. SYMULACJA

Wykonano program w środowisku *MATLAB*, który generuje macierz zawierającą widma sygnału na wyjściu kolumny dla kąta $\alpha = [0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, \dots, 90^\circ]$. Danymi wejściowymi symulacji są parametry N , l , r , składowa ciśnieniowa P i gradientowa G charakterystyki kierunkowej oraz pomiarowy zakres częstotliwości $freq$. Dla każdego kąta α wykonywany jest poniższy algorytm.

1. Oblicza się drogi dojścia dźwięku do każdego mikrofonu:

$$D = \sqrt{\left(\frac{l}{2} - \frac{l}{(N-1)} \cdot I\right)^2 + r^2 - 2 \cdot \left(\frac{l}{2} - \frac{l}{(N-1)} \cdot I\right) \cdot r \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)} \quad (1)$$

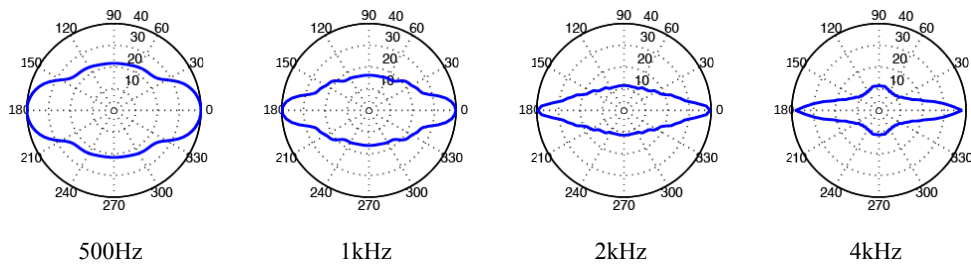
, gdzie: $D = [d_1, d_2, \dots, d_N]$ to wektor dróg dojścia, a $I = [0, 1, \dots, N-1]$.

Równanie (1) powstało na podstawie twierdzenia cosinusów.

2. Korzystając z twierdzenia cosinusów oblicza się kąty padania fali na każdy mikrofon oddzielnie. Na ich podstawie określa się dodatkowe tłumienie wynikające z zastosowanych charakterystyk kierunkowych mikrofonów.
3. Na podstawie D oblicza się wektor czasów dojść dźwięku do każdego mikrofonu $T = D/c$, gdzie c to prędkość dźwięku w powietrzu 344 m/s . Następnie oblicza się wektor przesunięć czasowych dT .
4. Tworzy się N sygnałów testowy – delt Kroneckera, nadając każdemu odpowiadający parametr: przesunięcia czasowego, tłumienia oraz dodatkowego tłumienia. Następnie sumuje się sygnały.
5. Wykonuje się FFT dla sygnału wynikowego.

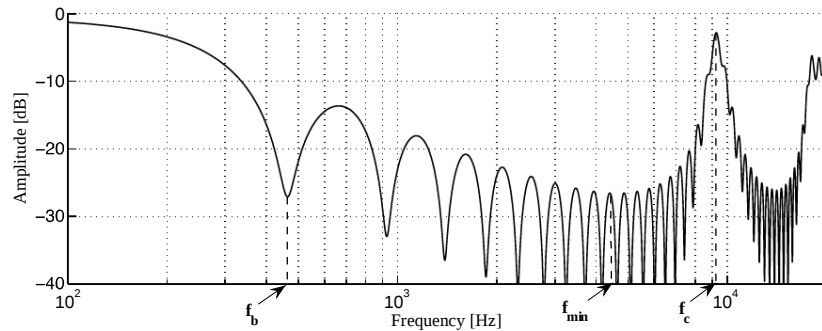
4. WYNIKI I ANALIZA

4.1. CHARAKTERYSTYKA KIERUNKOWA.



Rys. 4. Charakterystyki kierunkowe kolumny mikrofonowej ($N = 20$, $l = 1m$, $r = 5m$, char. kier. dookólna) dla czterech pasm oktaowych. Skala w dB względna z podziałką co $10dB$. Konstrukcja wykazuje silne właściwości kierunkowe. Sygnały docierające do kolumny spoza osi są silnie tłumione.

4.2. CHARAKTERYSTYKA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA.



Rys. 5. Charakterystyka częstotliwościowa kolumny mikrofonowej ($N = 20$, $l = 1m$, $r = 5m$, char. kier. dookólna) dla kąta $\alpha = 45^\circ$. f_c – częstotliwość charakterystyczna, f_b – częstotliwość podstawowa, f_{min} – częstotliwość dla której występuje minimum charakterystyki równe $20\log(N)$.

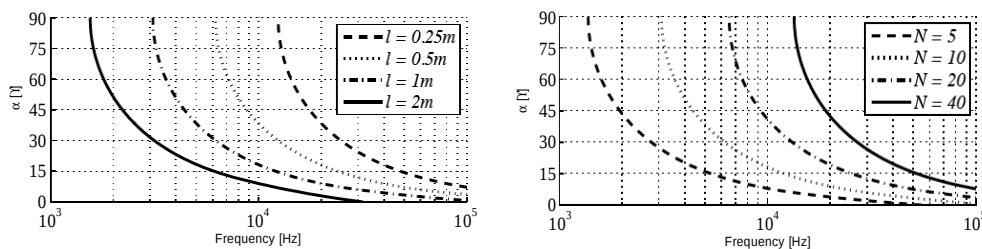
Widmo jest okresowe. Powtarza się co częstotliwość charakterystyczną f_c . Dla tej częstotliwości następuje spiętrzenie charakterystyki częstotliwościowej i kolumna traci swoje właściwości kierunkowe.

$$f_c = (N - 1) \cdot \frac{c}{d_{max} - d_{min}} \quad (2)$$

Widmo składa się z $N-1$ ząbków. Każdy ząbek występuje dla całkowitej wielokrotności częstotliwości podstawowej $f_b = f_c / N$. Można przyjąć, że począwszy od częstotliwości podstawowej kolumna zyskuje swoje właściwości kierunkowe.

Widmo osiąga minimum równe $E_{min} = 20 \cdot \log(N)$ dla częstotliwości $f_{min} = f_c / 2$.

Wszystkie powyższe parametry zależą od konstrukcji kolumny (rysunek 6).



Rys. 6. Wpływ parametrów N i l kolumny na częstotliwość charakterystyczną. f_c rośnie dwukrotnie jeżeli zastosujemy dwa razy więcej mikrofonów lub dwa razy krótszą linię.

Aby obliczyć f_c dla dowolnego kąta i dowolnych parametrów kolumny trzeba znać d_{max} i d_{min} . Wiąże się to z rozwiązaniem równania (1) dla najbliższego i najdalszego mikrofonu w kolumnie. Jeżeli jest spełniony warunek $\sin(\alpha) \geq l/2r$, wtedy d_{max} i d_{min} odpowiadają drodze do skrajnych mikrofonów w kolumnie. Przy dodatkowym założeniu, że $r \gg l$ możemy przyjąć, że $d_{max} \approx r$ i $d_{min} \approx r - l \sin(\alpha)$. Wtedy z własności trójkąta prostokątnego wynika równość:

$$d_{max} - d_{min} = l \cdot \sin(\alpha) \quad (3)$$

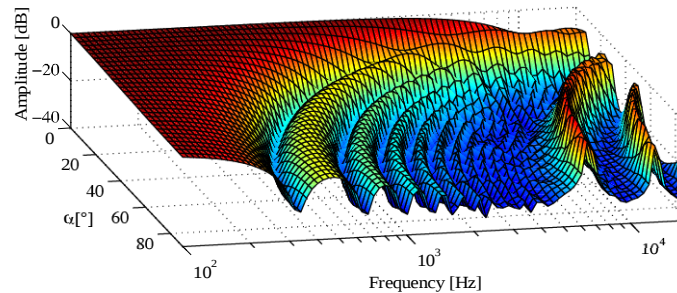
Podstawiając zależność (3) do wzoru (2) uzyskujemy wzór na częstotliwość charakterystyczną w zależności od kąta padania fali na kolumnę mikrofonową, przy zastrzeżeniu że spełnione są warunki wymienione wcześniej warunki.

$$f_c = (N-1) \cdot \frac{c}{l \cdot \sin(\alpha)} \quad (4)$$

Częstotliwość graniczna kolumny to częstotliwość do której kolumna przenosi liniowo dla $\alpha = 0^\circ$. Powyżej tej częstotliwości występuje niepożądane tłumienie charakterystyki.

$$f_{gr} = \frac{(N-1)}{N} \cdot \frac{c}{\sqrt{r^2 + (l/2)^2} - r} \quad (5)$$

4.3. CHARAKTERYSTYKA KIERUNKOWO-WIDMOWA.



Rys. 7. Charakterystyka kierunkowo-widmowa kolumny mikrofonowej ($N = 20$, $l = 1m$, $r = 5m$, char. kier. dookólna). Częstotliwości uśredniono w paśmie 1/12 oktawy.

Dla $\alpha = 0^\circ$ charakterystyka jest płaska w paśmie odpowiadającemu zakresowi przetwarzanych częstotliwości, a dla pozostałych kątów występuje dodatkowe tłumienie wg przykładowego rozkładu przedstawionego na rysunku 7.

5. PODSUMOWANIE

Zakres częstotliwości działania kolumny (tłumienia) można określić dla danego kąta obliczając częstotliwość charakterystyczną z przybliżonego wzoru 4. Można przyjąć, że dla danego kąta padania dźwięku na kolumnę w zakresie od $(f_c - f_p)$ do f_p kolumna tłumi dźwięk o przynajmniej połowę $20\log(N)$. Należy zwrócić uwagę czy częstotliwość graniczna kolumny nie jest za niska co będzie wpływało na sygnały przychodzące z osi kolumny. Według symulacji kolumna o długości $1m$ i $N = 20$, dla kąta 45° tłumi w zakresie $450Hz$ do $9kHz$ z maksymalnym tłumieniem $26dB$.

LITERATURA

- [1] BALLOU G., *Handbook for sound engineers*, Howard W. Sams & Co., 1987, 1001-1014
- [2] D. B. KEELE, Jr. *Effective Performance of Bessel Arrays*, AES Preprint, New York, 1989

COLUMN MICROPHONE

This paper presents concept of column microphone for use in speech reinforcement in lecture and conference halls. There are presented results of computer simulations made in *MATLAB* – frequency response and directional characteristics, designing rules of the column and their main properties.